

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS**

**DESIGN E ANÁLISES DE MASTROS DE BAMBU
PARA APLICAÇÕES ESTRUTURAIS**

Autor: Fernando José da Silva

Prof. Orientador: Dr. Luís Eustáquio Moreira
Prof. Coorientador: Dr. Francisco Carlos Rodrigues

Belo Horizonte, 13 de Novembro de 2014

S586d

Silva, Fernando José da.

Design e análises de mastros de bambu para aplicações estruturais
[manuscrito] / Fernando José da Silva. - 2014.
xviii, 205 f., enc.: il.

Orientador: Luís Eustáquio Moreira.

Coorientador: Francisco Carlos Rodrigues.

Tese (doutorado) Universidade Federal de Minas Gerais,
Escola de Engenharia.

Bibliografia: f.199-205.

1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Bambu - Teses. 3. Projeto
estrutural - Teses. 4. Análise numérica - Teses. I. Moreira, Luís Eustáquio.
II. Rodrigues, Francisco Carlos. III. Universidade Federal de Minas Gerais.
Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.039(043)

Fernando José da Silva

DESIGN E ANÁLISES DE MASTROS DE BAMBU PARA APLICAÇÕES ESTRUTURAIS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, da Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Título de “Doutor em Engenharia de Estruturas”.

Comissão Examinadora:

Professor: Dr. Luís Eustáquio Moreira (Orientador)
Instituição: Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG

Professor: Dr. Francisco Carlos Rodrigues (Coorientador)
Instituição: Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG

Professor: Dr. Estevam Barbosa de Las Casas
Instituição: Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG

Professor: Dr. Sebastião Salvador Real Pereira
Instituição: Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG

Professor: Dr. Fernando Betim Paes Leme
Instituição: Universidade PUC – Rio de Janeiro RJ

Professor: Dr. Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti
Instituição: Universidade de São Paulo (POLI-USP)

Belo Horizonte, 13 de Novembro de 2014.

DEDICATÓRIA

A Deus, pela Vida,
Aos meus pais: Pedro e Maria Raquel, por eu estar aqui,
À minha esposa Iracema, pelo amor todos os dias.

A G R A D E C I M E N T O S

Agradeço a todas as pessoas que colaboraram com este trabalho, entre elas:

Em especial, ao prof. Luís Eustáquio Moreira, por todos os momentos de orientação e aprendizado sobre este vasto e riquíssimo conhecimento que aqui apresento;

Ao prof. Francisco Carlos Rodrigues, pelas palavras, auxílios, e colaboração substancial no desenvolvimento dos experimentos de laboratório;

Ao prof. Edgar V. Mantilla Carrasco, pelas ajudas nos procedimentos e calibrações de células de carga, e palavras de colaboração na banca de qualificação;

Aos professores Estevam Barbosa de Las Casas e Ruy Marcelo O. Pauletti (USP), pela colaboração na banca de qualificação;

Ao prof. Rodrigo Caldas, pela contribuição nos experimentos de laboratório;

Aos bolsistas Leandro Lara Santos, Bernardo Félix Santiago Lana, Lucimar Guimarães de Abreu, Lucas Augusto Magalhães Guerra, pelos auxílios e colaborações nas pesquisas;

Aos técnicos Marcus Vinicius Pereira, Afonso, Geraldo, Sr Luís, do LAEES, pela grande ajuda nas organizações e atividades de ensaio;

Ao técnico Elieser (Laboratório LAMEC) pelo suporte técnico;

A todos os professores do Departamento de Engenharia de Estruturas;

Ao prof. Khosrow Ghavami (PUC-Rio), pelas oportunidades e publicações nos congressos;

Às Secretárias da Pós-Graduação DEES, Maria Inês M. Souza e Patrícia, pela presteza e colaboração em suas atividades;

À CNPq e à CT Agro, pelo apoio financeiro do projeto nas pesquisas com os bambus;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, pelos incentivos e ajudas financeiras nas publicações;

À Direção da Escola de Arquitetura, pelo incentivo e ajuda financeira às publicações;

Aos colegas de turma do Grupamento B, pelos incentivos e trocas de experiências no curso;

E a todos os amigos e colegas que compartilharam comigo esta etapa tão importante em minha vida acadêmica.

RESUMO

SILVA, Fernando José. *Design e análises de mastros de bambu para aplicações estruturais*. Belo Horizonte, 2014, Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.

O presente trabalho consiste no desenvolvimento de mastros híbrido, composto e de feixe com barras de bambu da espécie *Phyllostachys pubescens* e estabelecimento de estados-limites de utilização. Foram realizadas pesquisas quanto ao uso de mastros em estruturas arquitetônicas e seu funcionamento, desde as estruturas mais remotas às mais recentes que usam sistemas de coberturas de membranas. A construção e ensaios experimentais possibilitaram o conhecimento e desenvolvimento de técnicas que permitiram o aperfeiçoamento dos processos de construção bem como otimização do sistema estrutural proposto. Obteve-se ganho em eficiência no segundo mastro híbrido devido à maior pretensão dos cabos, aumento do braço das cruzetas e melhor distribuição ao longo da barra do bambu principal. O Diagrama de Southwell permitiu conhecer a força axial de flambagem global (Carga de Euler), imperfeição inicial do sistema e maior segurança à aplicação de carga nos ensaios seguintes. Os procedimentos adotados aos ensaios tiveram êxito quanto às diversas etapas, logística e controles de atividades, com resultados e dados de boa precisão. O mastro composto com barras laterais e interpostas com espaçadores internos, fixadas com barras roscadas de aço apresentou grande desempenho frente aos mastros iniciais, visto sua capacidade de carga próxima de 45 kN, com seis metros de comprimento e deflexão lateral de apenas 70 mm. Contudo, pode-se observar que a carga limite ficou restrita pelo esmagamento dos furos do espaçador na extremidade de menor diâmetro e espessura de parede e pelas tensões de contato que podem ser substituídas por parafusos lisos com roscas apenas nas extremidades, evitando concentração de tensões. Para estudos paramétricos, foram criados sete tipos de bambu com diferentes diâmetros e espessuras de parede, e comprimentos da ordem de dois a seis metros. Por questões de folgas em parafusos, os modelos numéricos ficam mais rígidos cerca de 25% para estruturas de bambu, sendo perfeitamente admissível. Observou-se também que a curva PDelta de descarga não apresentou uma forma coerente, sendo registrado deformações plásticas ocorridas por concentração de tensões nos furos dos parafusos, relaxando o sistema. Assim, analisou-se a fluência do mastro quanto aos dados e considerações para aplicações deste tipo em estruturas. Os ensaios com mastros de feixe, de dimensões de laterais de 3600 e 5400 mm, e alma contínua de seis metros, mostraram funcionamento bastante previsível. Seu processo de fabricação é relativamente fácil, não perfurando a parede do bambu para passagem de parafusos, evitando concentração de tensões, embora consuma mais barras de bambu, sendo mais apropriado ao aproveitamento de bambus de menor diâmetro, como os das espécies *Phyllostachys aurea* e *Bambusa tuldoides*. Em todos os casos, a modelagem numérica pode acompanhar o comportamento ocorrido no experimento, com ajustes perfeitos, validando os resultados para generalizações dos resultados a cálculos posteriores de novas estruturas. Concluiu-se que a opção pelo tipo de mastro dependerá das cargas de utilização e relação custo benefício, além do ponto de vista estético-arquitetônico com uso de bambus, elemento estrutural contemporâneo, sustentável, viabilizando novas possibilidades de aplicação em estruturas deste tipo, favorecendo a biodiversidade, interagindo Design e Engenharia.

Palavras-chave: mastros, bambu, design estrutural, análise numérica, ensaio experimental.

ABSTRACT

SILVA, Fernando José. *Design and analysis of bamboo masts for structural applications*. Belo Horizonte, 2014, Doctorate Thesis. Structural Engineering Department Program, School of Engineering, Federal University of Minas Gerais.

The present work shows the development of hybrid, composite and beam masts with bamboo bars of the species *Phyllostachys pubescens* and establishment of its limit states. Research has been done on the use of masts in architectural structures and their functioning, structures from the earliest to the latest architectural structures, using roofing membrane systems. The construction and experimental trials enabled the development of knowledge and techniques that allow the improvement of the construction processes and optimization of the proposed structural system. Obtained gains in efficiency to the second hybrid mast, due to the increased claim cables, crosses the rising arm and better distribution along the main bamboo bar. The Southwell diagram allowed to know the global buckling axial force (Euler load), initial imperfection of the system and increased security to the application load in the following testing. The procedures were successful testing for the various steps, logistics and controls activities, results and data with good accuracy. The composite mast with side bars with internal spacers interposed, secured with threaded steel bars showed great performance against the initial masts, as their next load capacity of 45 kN, with six meters long and lateral deflection of only 70 mm. However, it can be seen that the load limit was limited by the crushing of the spacer holes in the end of smaller diameter and wall thickness and the contact stresses which may be substituted by straight screws with threaded only at the ends, thus avoiding stress concentration. For parametric studies, seven types of bamboo with different diameters and wall thicknesses, and lengths of the order of two to six meters have been created. For questions about gap in bolts, the numerical models are stricter about 25% for bamboo structures, being perfectly acceptable. It was also observed that the PDelta unload curve did not show a consistent shape, and recorded plastic deformation occurred by stress concentration in the screw holes, relaxing the system. Thus, was analyzed the fluency of the mast of data and considerations for applications of this type in structures. The tests with masts beam, with lateral dimensions of 3600 and 5400 mm, and continuous soul six meters, showed the fairly predictable operation. Its manufacturing process is relatively easy, not piercing the wall of bamboo for the passage of screws, avoiding stress concentration, although consume more bars, bamboo is appropriate for the use of smaller diameter bamboo, such as of the species *Phyllostachys aurea* and *Bambusa tuldoides*. In all cases, the numerical modeling can monitor the behavior occurred during the experiment, with perfect fits, validating the results to generalize the results of subsequent calculations of new structures. It was concluded that the option of type of masts will depend of loading and cost benefit, beyond the aesthetic and architectural point of view with the use of bamboo, contemporary structural element, sustainable, enabling new application possibilities in structures of this type, favoring biodiversity, interacting Design and Engineering.

Key-word: masts, bamboo, structural design, numerical analysis, experimental testing.

SUMÁRIO

Página

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
1.1 – Generalidades sobre Estruturas com mastros	2
1.2 – Breve Histórico sobre Estruturas Tensionadas	3
1.3 – O uso de Bambu	7
1.4 – Objetivos	8
1.5 – Justificativa	9
1.6 – Conteúdo Geral desse Projeto de Tese	10
 CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	 11
2.1 – Introdução	11
2.2 – Mastros e Estruturas Tensionadas	11
2.3 – Bambu: características e exemplos de utilização	18
2.4 – Plantação do Bambu como incentivo ao Créditos de Carbono	32
2.5 – Interação Design & Engenharia	34
2.6 – Flambagem de Colunas	37
 CAPÍTULO 3: MATERIAL E MÉTODOS	 47
3.1 – Introdução	47
3.2 – Processos construtivos	47
3.2.1 – Gabaritos	47
3.2.2 – Perfuração de barras	50
3.2.3 – Desenvolvimento dos aparelhos de apoio	50
3.2.4 – Cabos de aço	53
3.2.5 – Barras roscadas	53
3.2.6 – Cinta metálica	54
3.2.7 – Acessórios: porcas, arruelas, sapatilhas, presilhas, braçadeiras e tensionadores	55
3.3 – Projeto do experimento	58
3.3.1 – Pórtico de reação	58
3.3.2 – Sistema de aplicação de cargas	58
3.3.3 – Apoio para rótula universal	59
3.3.4 – Células de carga	60
3.4 – Aquisição de dados	60
3.4.1 – Fase de montagem dos ensaios	61
3.4.2 – Instrumentação	62
3.4.3 – Procedimentos de ensaio	63

CAPÍTULO 4: PRODUÇÃO DOS PROTÓTIPOS, ENSAIOS MECÂNICOS,	
ANÁLISE NUMÉRICA	67
Introdução	67
PARTE 1: BAMBU: Tipologia e suas características	69
4.1.1 – Teste de Compressão Paralela às Fibras em Corpo de Prova	70
4.1.2 – Teste de compressão em barras isoladas de 6 metros	73
4.1.2.1 – Análise Experimental	73
4.1.2.2 – Modelagem numérica com Inércia Variável	76
4.1.2.3 – Modelagem numérica com Inércia Constante	76
4.1.3 – Fluência dos Bambus Isolados	83
PARTE 2: MASTRO HÍBRIDO	91
Introdução	91
4.2.1 – Projeto do Mastro	91
4.2.2 – Design do primeiro protótipo	92
4.2.3 – Análise Numérica da barra central isolada	95
4.2.4 – Realização do Ensaio	97
4.2.5 – Análise numérica do primeiro protótipo do mastro	100
4.2.6 – Fabricação do segundo protótipo	104
4.2.7 – Ensaio do segundo protótipo: resultados experimentais e numéricos	111
PARTE 3: MASTRO COMPOSTO	123
Introdução	123
4.3.1 – Projeto do Mastro	124
4.3.2 – Modelagem Numérica	126
4.3.3 – Projeto do experimento	129
4.3.4 – Ensaio mecânico	130
4.3.5 – Análises dos resultados experimentais e numéricos.....	133
4.3.6 – Considerações acerca dos resultados	137
4.3.7 – Validação e Aferição do modelo numérico	139
4.3.8 – Estudos paramétricos para aplicações estruturais com Bambus Tipo	141
4.3.8.1 – Utilização das Tabelas	150
4.3.8.2 – Fluência do mastro	151
4.3.8.3 – Quando se deve considerar a fluência	153
4.3.8.4 – Quantas divisões adotar quando o comprimento se situar entre 3 e 4,5 m.	157
4.3.8.5 – Equação diferencial da Linha Elástica	157
4.3.8.6 – Flexão dos parafusos	163
4.3.8.7 – Compressão máxima da alma no topo do mastro	164
PARTE 4: MASTRO DE FEIXE	165
Introdução	165
4.4.1 – Projeto do Mastro	165
4.4.2 – Análise Numérica	166
4.4.3– Design e fabricação	168

4.4.4 – Ensaio mecânico e resultados	170
4.4.5 – Análises dos resultados experimentais e numéricos	172
4.4.6 – Segundo protótipo	174
4.4.7 – Ensaio do segundo protótipo	175
4.4.8 – Análise dos resultados	178
4.4.8.1 – Análise das perdas de energia	179
4.4.8.2 – Análise das Imperfeições	180
4.4.8.3 – Cargas limites	183
4.4.8.4 – Aplicação	186
4.4.9 – Amassamento dos bambus nas extremidades	188
CAPÍTULO 5: CONSIDERAÇÕES FINAIS	193
5.1 – Conclusões	193
5.2 – Sugestões para trabalhos futuros	198
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	199

Lista de Figuras

Figura	Legenda:	Página
1.2.1	Distinção entre estruturas rígidas e flexíveis	3
1.2.2	Estrutura interna do Yurta, antes da cobertura	4
1.2.3	Yurta com cobertura	4
1.2.4	Tendas na região do Irã, com uso de madeira e amarrações de cordas	5
1.2.5	<i>Black tends</i> de tribos na região do Irã	5
1.2.6	Detalhes e da cobertura no Complexo Olímpico de Munique	6
1.2.7	Aspecto interno do Estádio Rei Fahd (Riad, Arábia Saudita)	6
1.2.8	Estrutura da cobertura tensionada, da Feira de Ananindeua, PA	7
1.2.9	Vista da estrutura da Feira de Ananindeua, PA	7
2.2.1	Categorias de superfícies estruturais	12
2.2.2	Sistema de cobertura com cabos	13
2.2.3	Elementos constitutivos de coberturas com cabos, mastros e membrana	13
2.2.4	Esquema da estrutura com mastro de sustentação	13
2.2.5	Exemplo de estrutura com mastros de sustentação	13
2.2.6	Vista externa do Domo do Milênio, com os mastros principais estaiados	14
2.2.7	Modelamento com materiais diversos	14
2.2.8	Processo de fabricação de membranas	14
2.2.9	Frei Otto em Montreal	15
2.2.10	Pavilhão Musical para a Exposição Federal de Jardins, em Kassel, Alemanha, 1955..	15
2.2.11	Otto durante ensaios em modelo para o Estádio Olímpico	16
2.2.12	Mastro da estrutura de cobertura	16
2.2.13	Aspecto interno do Estádio Olímpico de Munique	16
2.2.14	Mastro na confecção das estruturas	17
2.2.15	Mercado Popular da Rocinha – Rio de Janeiro RJ	17
2.3.1	Alguns tipos de rizoma	19

2.3.2	Colmo do Bambu	19
2.3.3	Elementos constituintes do colmo	19
2.3.4	Grande estrutura projetada por Simon Vélez	20
2.3.5	Estrutura de bambu, na Colômbia	20
2.3.6	Aspecto interno da Capela de Nossa Senhora da Pobreza, de Simón Vélez, Colômbia	21
2.3.7	Configuração do interior do internó do bambu	23
2.3.8	Parede do bambu, com a distribuição das fibras.....	23
2.3.9	Imagem aproximada dos vasos condutores, fibras e parênquimas do bambu	23
2.3.10	Uso de parafusos e braçadeira em estruturas com bambu	27
2.3.11	Uso de amarração com a própria fibra do bambu	27
2.3.12	Uso de fitas de bambu nas amarrações	27
2.3.13	Pilares de barras de bambu, Colômbia	28
2.3.14	Feixes de bambu, em coberturas, no Equador	28
2.6.1	Coluna de Euler, com apoios birrotulados	38
2.6.2	Flexão em coluna apoiada em apenas uma extremidade	39
2.6.3	Flexão em coluna com apoio fixo nas duas extremidades	39
2.6.4	Flexão em colunas de seções diferenciadas, e localização dos momentos de inércia I_1 e I_2	40
2.6.5	Esquema de coluna engastada apenas numa extremidade	40
2.6.6	Coluna birrotulada inicialmente curvada	42
3.2.1.1	Gabarito para furo de barras de bambu	48
3.2.1.2	Gabarito para construção do mastro de parafusos	49
3.2.1.3	Amarração para construção do mastro de feixe	49
3.2.2.1	Esquema de furação das barras de bambu	50
3.2.3.1	Projeto da ponteira de aço	51
3.2.3.2	Simulação de encaixe da ponteira com software AUTOCAD	51
3.2.3.3	Simulação de fixação da ponteira com software AUTOCAD	51
3.2.3.4	Ponteira de aço usinada, com acessórios de fixação dos cabos de aço	52
3.2.3.5	Distância entre pontos de fixação dos cabos e a extremidade da barra de bambu	52
3.2.4.1	Cabo de aço utilizado no protótipo do mastro	53
3.2.5.1	Barra roscada utilizada na construção dos protótipos dos mastros	54
3.2.6.1	Cinta metálica	54
3.2.6.2	Máquina de cintamento	54
3.2.6.3	Clip de travamento da cinta metálica	54
3.2.7.1	Porcas utilizadas na montagem do protótipo do mastro	55
3.2.7.2	Arruelas utilizadas na montagem do protótipo do mastro	55
3.2.7.3	Sapatilhas utilizadas na montagem do protótipo do mastro	56
3.2.7.4	Presilhas utilizadas na fixação dos cabos de aço	56
3.2.7.5	Uso de braçadeiras junto às cruzetas	57
3.2.7.6	Uso das braçadeiras nas extremidades das cruzetas	57
3.2.7.7	Braçadeiras de reforço local	57
3.2.7.8	Esticadores com os cabos de aço do mastro híbrido	57
3.3.1.1	Pórtico de reação com a instalação do protótipo do mastro híbrido	58
3.3.2.1	Bomba a óleo sob pressão e o cilindro hidráulico	59
3.3.3.1	Rótula de apoio fixado em placa no pórtico	60

3.3.3.2	Rótula de apoio posicionado entre a ponteira do mastro e o êmbolo do cilindro hidráulico	60
3.3.4.1	Célula de carga no sistema de aplicação de carga	60
3.3.4.2	Células de carga instaladas nos cabos de aço	60
3.4.1.1	Panorama do ensaio com ligação das células de carga ao SAD	61
3.4.1.2	Ligação dos cabos das células de carga ao SAD	61
3.4.1.3	Ligação dos cabos das células de carga ao SAD	61
3.4.1.4	Computador portátil conectado ao SAD para registro dos dados	61
3.4.2.1	Placas equalizadoras de alumínio junto à barra central do mastro	62
3.4.2.2	Instalação dos DTs com base imantada em placas metálica	63
3.4.2.3	Instalação dos três DTs: um na vertical e outros dois a 45 graus	63
3.4.3.1	Esquema do ensaio com várias pessoas durante os trabalhos	63
4.1.1	Aspecto visual de bambus da Espécie <i>Phyllostachys</i>	69
4.1.2	Aspecto visual do bambu <i>Phyllostachys pubescens</i>	70
4.1.3	Esquema de montagem dos extensômetros no corpo de prova e Esquema de ligação entre os extensômetros, para Ponte de Wheatstone	71
4.1.4	Posicionamento do corpo de prova no local de ensaio	72
4.1.5	Ligação dos terminais no Sistema de aquisição de dados	72
4.1.6	Início do ensaio, com aplicação de carga no corpo de prova	72
4.1.7	Instalação do “clip gage” no corpo de prova	72
4.1.8	Barra isolada com a ponteira, no pórtico	73
4.1.9	Instalação dos DTs em contato com as placas equalizadoras	73
4.1.10	Flambagem da barra durante o ensaio	74
4.1.11	Segmentação da barra isolada, modelada numericamente	76
4.1.12	Comparação carga descarga experimental e numérico	77
4.1.13	Comparação do Diagrama de Southwell experimental e numérico	78
4.1.14	Curva PDelta Bambu nº1	79
4.1.15	Curva PDelta Bambu nº2	79
4.1.16	Curva PDelta Bambu nº3	79
4.1.17	Curva PDelta Bambu nº4	79
4.1.18	Curva PDelta Bambu nº5	79
4.1.19	Curva PDelta Bambu nº6	79
4.1.20	Curva PDelta Bambu nº7	80
4.1.21	Curva PDelta Bambu nº8	80
4.1.22	Curva PDelta Bambu nº9	80
4.1.23	Curva PDelta Bambu nº10	80
4.1.24	Curva PDelta Bambu nº11	80
4.1.25	Curva PDelta Bambu nº12	80
4.1.26	Diagrama de Southwell do Bambu nº1	81
4.1.27	Diagrama de Southwell do Bambu nº2	81
4.1.28	Diagrama de Southwell do Bambu nº3	81
4.1.29	Diagrama de Southwell do Bambu nº4	81
4.1.30	Diagrama de Southwell do Bambu nº5	81
4.1.31	Diagrama de Southwell do Bambu nº6	81

4.1.32	Diagrama de Southwell do Bambu nº7	82
4.1.33	Diagrama de Southwell do Bambu nº8	82
4.1.34	Diagrama de Southwell do Bambu nº9	82
4.1.35	Diagrama de Southwell do Bambu nº10	82
4.1.36	Diagrama de Southwell do Bambu nº11	82
4.1.37	Diagrama de Southwell do Bambu nº12	82
4.1.38	Southwell da Carga e Descarga da Barra B1	84
4.1.39	Southwell da Carga e Descarga da Barra B2	84
4.1.40	Southwell da Carga e Descarga da Barra B3	84
4.1.41	Southwell da Carga e Descarga da Barra B4	84
4.1.42	Southwell da Carga e Descarga da Barra B5	84
4.1.43	Southwell da Carga e Descarga da Barra B6	84
4.1.44	Southwell da Carga e Descarga da Barra B7	85
4.1.45	Southwell da Carga e Descarga da Barra B8	85
4.1.46	Southwell da Carga e Descarga da Barra B9	85
4.1.47	Southwell da Carga e Descarga da Barra B10	85
4.1.48	Southwell da Carga e Descarga da Barra B11	85
4.1.49	Southwell da Carga e Descarga da Barra B12	85
4.1.50	Relaxação da estrutura do bambu por cisalhamento	86
4.1.51	Comportamento visco-elástico das madeiras em flexão	88
4.1.52	Coefficientes de fluência para os bambus <i>Phyllostachys pubescens</i>	89
4.2.1	Modelo em escala reduzida	92
4.2.2	Protótipo de dois metros de comprimento durante ensaio	92
4.2.3	Configuração tridimensional do mastro	92
4.2.4	Esquema geométrico	93
4.2.5	Mastro concluído	94
4.2.6	Design da ponteira e detalhes de fixação	94
4.2.7	Detalhe dos esticadores instalados nos cabos de aço	94
4.2.8	Configuração inicial do bambu isolado	95
4.2.9	Momento fletor inicial no eixo do mastro sem cabos	96
4.2.10	Deformada da barra de bambu sem os cabos de aço (fator de escala 1)	96
4.2.11	Força cortante na barra sem os cabos de aço	96
4.2.12	Momento fletor na barra sem os cabos de aço	96
4.2.13	Flambagem localizada no intervalo 1	97
4.2.14	Flambagem global do protótipo	98
4.2.15	Carga aplicada vs carga nos cabos	99
4.2.16	Curva carga vs deslocamento transversal experimental	99
4.2.17	Sobreposição das curvas PDelta (numérico e experimental)	99
4.2.18	Configuração deformada teórica no mastro	100
4.2.19	Forças axiais	100
4.2.20	Forças cortantes	101
4.2.21	Momento fletor	101
4.2.22	Diagrama de Southwell (numérico)	103
4.2.23	Diagrama de Southwell (experimental)	103
4.2.24	Feixe luminoso durante a medição da imperfeição inicial do bambu	104

4.2.25	Extremidade do feixe luminoso na medição da imperfeição inicial do bambu	104
4.2.26	Medição da imperfeição inicial do bambu	105
4.2.27	Dimensões do segundo protótipo	106
4.2.28	Configuração deformada da barra central sem os cabos (fator de escala = 1)	107
4.2.29	Configuração deformada do protótipo do mastro (numérico)	108
4.2.30	Mastros modelados com força aplicada correspondente à carga máxima experimental	108
4.2.31	Diagrama de forças axiais	109
4.2.32	Diagrama de forças cortantes	109
4.2.33	Diagrama de momentos fletores	109
4.2.34	Detalhe construtivo do segundo protótipo	110
4.2.35	Segundo protótipo com os cabos de aço instalados	110
4.2.36	Protótipo II no pórtico de reação	110
4.2.37	Instalação dos DTs (transdutores de deslocamento)vista 1	110
4.2.38	Instalação dos DTs, vista 2	110
4.2.39	Vistas do modo de flambagem	112
4.2.40	Vistas do modo de flambagem	112
4.2.41	Forças nos cabos de aço (apenas carregamento)	113
4.2.42	Forças nos cabos de aço (carga e descarga)	113
4.2.43	Curvas força axial versus deslocamento transversal	113
4.2.44	Curva Carga vs deslocamento transversal (cargamento e descargamento)	113
4.2.45	Diagrama de Southwell (numérica)	114
4.2.46	Diagrama de Southwell (experimental)	114
4.2.47	Diagramas de Southwell (mastro sem clip para mastro com clip)	116
4.2.48	Modelagem numérica do mastro híbrido e as forças atuantes	117
4.2.49	Design do clip	118
4.2.50	Instalação do clip	118
4.2.51	Instalação do clip no mastro	118
4.2.52	Clip completo, vista interna	118
4.2.53	Vista do clip fixando o cabo de aço no mastro	118
4.2.54	Curva PDelta experimental do mastros com clip	119
4.2.55	Curvas PDelta comparativas dos mastros sem clip e com clip	119
4.2.56	Diagrama de Southwell com cabos clipados	120
4.2.57	Diagrama de Southwell com cabos livres	120
4.2.58	Deformada visual ocorrida no eixo do mastro, durante o ensaio	121
4.2.59	Diferença de tensão nos cabos de aço, durante o ensaio	121
4.3.1	Esquema da alma descontínua com espaçadores internos	125
4.3.2	Seção transversal dos trechos interligados	125
4.3.3	Modelo numérico	126
4.3.4	Dimensões do sistema estrutural	128
4.3.5	Diagrama de Southwell Numérico	128
4.3.6	Instalação dos DTs no centro do mastro	129
4.3.7	Atuador hidráulico e célula de carga	129
4.3.8	Fixação das chapas equalizadoras	130
4.3.9	Cordas de segurança	130

4.3.10	Curva P (carga) $\times \delta$ (deslocamento)	130
4.3.11	Ciclos iniciais P (carga) $\times \delta$ (deslocamento)	131
4.3.12	Diagrama de Southwell Experimental	131
4.3.13	Comparação das curvas PDelta (Numérico e Experimental)	132
4.3.14	Comparação dos Diagramas de Southwell (Numérico e Experimental)	133
4.3.15	Linha elástica para $P = 45$ kN – perspectiva longitudinal	133
4.3.16	Linha elástica para $P = 45$ kN – perspectiva lateral	133
4.3.17	Deflexões laterais – fator de escala = 1	134
4.3.18	Forças axiais	134
4.3.19	Forças cortantes	134
4.3.20	Momentos Fletores	135
4.3.21	Forças cortantes nos parafusos	135
4.3.22	Momentos Fletores nas extremidades	136
4.3.23	Ângulo de afastamento das barras	137
4.3.24	Perda de espessura de parede	137
4.3.25	Penetração dos fios de rosca na parede do bambu	137
4.3.26	Flexão do pino	137
4.3.27	End Slip (deslizamento relativo de extremidade)	137
4.3.28	Capela construída	138
4.3.29	Detalhe dos elementos compostos parafusados	138
4.3.30	Curvas PDelta experimental e numérico do mastro de parafusos	140
4.3.31	Diagramas de Southwell experimental e numérico do mastro de parafusos	141
4.3.32	Distância entre espaçadores e parafusos no mastro de 2 metros	142
4.3.33	Distância entre espaçadores e parafusos no mastro de 3 metros	142
4.3.34	Distância entre espaçadores e parafusos no mastro de 4,5 metros	143
4.3.35	Distância entre espaçadores e parafusos no mastro de 6 metros	143
4.3.36	Curva de rigidez para mastro de 3 m com alma descontínua	144
4.3.37	Curva de rigidez para mastro de 4,5 m com alma descontínua	145
4.3.38	Curva de rigidez para mastro de 6 m com alma descontínua	145
4.3.39	Curva de rigidez para mastro de 2 m com alma contínua	145
4.3.40	Curva de rigidez para mastro de 3 m com alma contínua	146
4.3.41	Curva de rigidez para mastro de 4,5 m com alma contínua	146
4.3.42	Curva de rigidez para mastro de 6 m com alma contínua	146
4.3.43	Disposição dos bambus para cálculo do Momento de Inércia da seção bruta	150
4.3.44	Curva P Delta (carga e descarga) experimental	152
4.3.45	Coefficiente de Fluência	152
4.3.46	Cortante máximo nos parafusos	158
4.3.47	Apoios e cargas no centro das paredes dos bambus	160
4.3.48	Momentos fletores	161
4.3.49	Forças cortantes	161
4.3.50	Esforços solicitantes no parafuso mais carregado do mastro	163
4.4.1	Projeto e localização das cintas metálicas no mastro I	169
4.4.2	Linha elástica para $P = 18$ kN	169
4.4.3	Diagrama de Southwell Numérico	169
4.4.4	Instalação da cinta metálica	170

4.4.5	Tensão e corte da cinta metálica	170
4.4.6	Mastro finalizado, e instalado no pórtico de reação	170
4.4.7	Projeto do experimento	171
4.4.8	Posicionamento dos DTs	171
4.4.9	Chapas equalizadoras	171
4.4.10	Ponteira, célula de carga e atuador hidráulico	171
4.4.11	Cargas $P \times$ deslocamentos δ	172
4.4.12	Cargas $P \times$ Deslocamentos δ (Numérica \times Experimental)	172
4.4.13	Diagrama de Southwell Experimental	173
4.4.14	Rotações relativas da extremidade de menores inércias	174
4.4.15	Posicionamento da caneta laser na extremidade superior da barra	174
4.4.16	Deflexão de 20 mm no centro do mastro	174
4.4.17	Momento fletor no plano XZ	175
4.4.18	Tração máxima nos parafusos	176
4.4.19	Forças cortantes, no eixo XZ	176
4.4.20	Configuração e design do mastro II	177
4.4.21	Curva P x Delta experimental	178
4.4.22	Diagrama de Southwell experimental	179
4.4.23	Modelo numérico extrudado com barras prismáticas	179
4.4.24	Comparação das Curvas P x Delta experimental e numéricas	179
4.4.25	Comparação dos Diagramas de Southwell experimental e numéricas	180
4.4.26	Curvas PDelta dos ciclos de carga e descarga do experimento	181
4.4.27	Comparação dos carregamentos – ciclo III e IV	182
4.4.28	Seção transversal do mastro de feixe	185
4.4.29	Localização das algemas conforme o mastro ensaiado	190
4.4.30	Momento fletor na extremidade do mastro	191
4.4.31	Amassamento das extremidades das barras da coroa	191
4.4.32	Experimentos de monitoramento descritivo – Instituto Kairós	194
4.4.33	Aplicação de estruturas em feixe no Instituto Kairós	194

Lista de Tabelas

Tabela	Legenda	Página
2.3.1	Módulo de Elasticidade do bambu <i>Bambusa blumeana</i>	22
2.3.2	Distribuição de vasos fibras e parênquimas (%).....	24
2.3.3	Configuração orgânica de algumas espécies de bambu (%).....	24
2.3.4	Estabilidade dimensional (%).....	25
2.3.5	Tensão de ruptura à compressão para o bambu	25
2.3.6	Tensão de ruptura à tração para o bambu	26
2.3.7	Resistência à flexão para o bambu	26
2.6.1	Valores para o Fator m	41
4.1.1	Propriedades geométricas dos bambus isolados	75
4.1.2	Dados obtidos pelos experimentos e numericamente, das barras ensaiadas	83
4.1.3	Carga, descarga e razões entre ambas	87

4.2.1	Características geométricas e físicas do bambu	93
4.2.2	Dados de ensaio do primeiro protótipo do mastro	98
4.2.3	Características geométricas do bambu do segundo protótipo	105
4.2.4	Diâmetros e espessuras da barra principal de bambu	106
4.2.5	Comparação entre as características geométricas dos bambus 1 e 2	107
4.2.6	Bambu 1 e 2: comparação das cargas limites numéricas e deflexão total	107
4.2.7	Dados do primeiro ensaio de compressão no segundo protótipo	111
4.2.8	Dados do segundo ensaio de compressão no segundo protótipo	112
4.3.1	Características geométricas da barra central e das barras paralelas	124
4.3.2	Carga de Euler e imperfeição inicial do sistema	141
4.3.3	Propriedades geométricas dos bambus tipo	144
4.3.4	Produto <i>EI</i> versus comprimento dos mastros, alma contínua	148
4.3.5	Produto <i>EI</i> versus comprimento dos mastros, alma descontínua	149
4.3.6	Esbeltez dos mastros tipo de alma contínua	155
4.3.7	Esbeltez dos mastros tipo de alma descontínua	156
4.3.8	Medidas para comprimentos máximos destravados	157
4.4.1	Características geométricas da barra central (alma) e das barras laterais (coroa) do primeiro mastro de feixe	168
4.4.2	Dimensões das barras do segundo mastro de feixe	177
4.4.3	Carga de Euler e imperfeição inicial do sistema	180

Lista de Abreviaturas e Siglas

3D	Tridimensional
cel	Célula
CEPAM3	Centro de Pesquisa Avançada em Móveis, Madeira e Novos Materiais
CIMGC	Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima
CO ₂	Gás Dióxido de Carbônico
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CT Agro	Programa de Ciência e Tecnologia para o Agronegócio
CRE's	Certificado de Redução das Emissões
DfE	Design for Environment
DfX	Design for excellence
DfA	Design for Assembly
DfC	Design for Compliance
DfM	Design for Manufacturability
DfS	Design for Serviceability
DTs	Transdutores de deslocamento
EE	Escola de Engenharia
FAPEMIG	Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de Minas Gerais
GEE	Gases geradores do efeito estufa
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau (instituição financeira alemã)
LAEES	Laboratório de Análises Experimentais de Estruturas
LASE	Laboratório de Sistemas Estruturais
lim Elast	Limite elástico
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
NBR	Denominação de norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas
NOCMAT	International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies
ONG	Organização Não Governamental
ONU	Organização das Nações Unidas
O ₂	Gás Oxigênio
PBD	Programa Brasileiro de Design

XVIII

PNMCB	Política Nacional de Incentivo ao Manejo Sustentado e ao Cultivo do Bambu
PTFE	Politetrafluoretileno
PVC	Policloreto de Vinila
RC	Relógio comparativo
SiO_2	Sílica
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais

Lista de Símbolos

Letras Romanas Minúsculas

<i>cm</i>	Centímetro
<i>et al</i>	e outros (bibliografia)
<i>i</i>	Raio de giração
<i>h</i>	Hora
<i>kfg</i>	Quilograma força
<i>km</i>	Quilômetro
<i>kN</i>	Quilo Newton
l_0	Medida, largura inicial
<i>m</i>	Metro
m^2	Metro quadrado
<i>min</i>	Tempo em minutos
<i>mm</i>	Milímetro
<i>t</i>	Espessura
<i>u</i>	Deslocamento (distância)

Letras Romanas Maiúsculas

<i>A</i>	Área da seção transversal
<i>D</i>	Diâmetro
<i>E</i>	Módulo de elasticidade longitudinal
<i>E</i>	Exponencial
<i>Fe</i>	Carga crítica de flambagem elástica de Euler (Carga de Euler)
<i>G</i>	Módulo de elasticidade transversal
<i>GPa</i>	Giga Pascal
<i>I</i>	Momento de inércia da seção transversal
<i>L, l</i>	Vão, distância, comprimento do elemento
<i>L</i>	deformação ocorrida com o teste utilizando os extensômetros
<i>M</i>	Momento fletor atuante
M_f	momento final
M_i	momento inicial
<i>MPa</i>	Mega Pascal
<i>N</i>	Unidade em Newton
<i>P</i>	Carga aplicada
<i>Pa</i>	Unidade em Pascal
<i>T</i>	Tensão
<i>V</i>	Força cortante

Letras Gregas

α	Comprimento
δ	Delta, Flecha, deslocamento, deflexão lateral total
δ_0	Distância inicial, Imperfeição inicial
δ_m	Deflexão medida
δ_t	Distância final

ϵ_x	Resultado da deformação no teste realizado com o <i>Clip Gage</i>
θ	Ângulo
λ	Estiramento de uma fibra genérica; índice de esbeltez (adimensional)
$\mu\epsilon$	Micro strain
ν	Coefficiente de Poisson
π	Pi, proporção numérica com relação entre perímetro e diâmetro de uma circunferência
ρ	Densidade relativa ou massa volumétrica
σ	Tensão normal ou de engenharia de uma fibra
σ_p	limite de comportamento elástico
σ_r	limite de carga aplicada
ϕ	Coefficiente de fluência
Ω	Unidade de medida em Omhs

1

INTRODUÇÃO

Três décadas após o primeiro Congresso Internacional do Bambu, em Singapura, a pesquisa do bambu é uma realidade para os povos ocidentais. Na América Latina, o bambu é uma fonte reconhecida de riquezas, viabilizando a produção de diferentes objetos de utilidade. Sabe-se que as primeiras vantagens das florestas de bambu são a captura de carbono, a produção de oxigênio, a proteção da erosão do solo e assoreamento de rios, lagos e lagoas. Vê-se também que os bambus têm aplicações diversas sejam em habitações ou sistemas estruturais leves e resistentes. A estrutura atual dessa planta foi o resultado de processos adaptativos ao longo de 200 milhões de anos, resultados dos acoplamentos necessários com o meio, para manutenção da nova ordem sujeita aos agentes naturais como ventos, insetos, fungos, chuvas ácidas, dentre outros. Disto resultou que hoje apenas alguns tubos poliméricos *high tech* possuem um funcionamento mecânico similar ao dos bambus, com elevada resistência, baixo peso e flexibilidade.

Neste âmbito de desenvolvimento de estruturas com bambu, esta Tese, desenvolvida no Grupamento B do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Estruturas, da Escola de Engenharia – UFMG, consiste do design e fabricação de protótipos, ensaios mecânicos e análise numérica realizados sobre elementos compostos de bambu, aqui denominados mastros devido ao comprimento, dividindo-se em três tipos conforme a composição: mastros híbridos, mastros compostos e mastros de feixe, normalmente utilizados como suporte de estruturas de tendas, apoio de velas em veleiros, colunas em construções de regiões de sismos, entre outras aplicações. Esta contribuição à ciência das estruturas oferece informações necessárias para dimensionamento de futuros mastros possibilitando desenvolvimento de sistemas construtivos de elementos do design de estruturas para conexões e suportes necessários para implementação nos usos mencionados (tendas, veleiros, colunas, sistemas de coberturas tensionadas, dentre outros).

1.1 – Generalidades sobre estruturas com mastros

O desenvolvimento tecnológico e científico que a humanidade presencia passa por descobertas e usos de novos materiais em áreas antes não pensadas. Dessa pesquisa para se melhorar a sociedade em que vivemos, o desenvolvimento exige ação local e global para atender às necessidades de sistemas de produção e uso racional de recursos ambientais. É inevitável reconhecer o desequilíbrio entre os recursos disponíveis e as demandas vigentes, que impõem novas regras sustentáveis às novas construções, estruturas e sistemas. Algumas habitações leves que levam o nome de tendas são facilmente construídas e utilizam pouco material para cobrir uma grande área. Para a cobertura dessas tendas, membranas de diferentes materiais podem ser tracionadas por meio de mastros que no caso trabalham como suportes estruturais. Além das tendas, pode-se vislumbrar atualmente uma imensa gama de oportunidades em aplicações desse sistema de cobertura para abrigar as mais variadas atividades humanas, desde residência, eventos efêmeros ou ambientes de uso contínuo, fazendo uso das estruturas tensionadas com mastros como elemento estrutural.

Dentre os materiais mais utilizados como mastros nessas estruturas, observa-se o aço, o concreto e a madeira. Pauletti (2003, p.4) afirma que quanto aos materiais, somente aços de alta resistência e materiais compósitos e sintéticos deste século permitiram melhorar a qualidade e exploração das estruturas tensionadas. A partir dos novos materiais, foram desenvolvidos também elementos das estruturas, como apoios, ganchos, suportes dentre outros. Com objetivo de desenvolvimento científico e tecnológico, o bambu se apresenta como novo material, sustentável, natural, econômico, de fácil produção e com destaque relativo à resistência a compressão e a tração. Constata-se seu uso em aplicações tanto estrutural como os pilares, vigas, substituindo o aço em concreto armado, andaimes, sistemas de coberturas, calhas, forros, como também em fabricação de objetos, mobiliário, estrutura de bicicleta e veículos, brinquedos, artesanato, decoração e acabamentos como pisos laminados, painéis de vedação, sistema hidráulico, dentre outros. Quanto à sua aplicação estrutural, o bambu se mostra adequado substituindo a madeira ou aço em mastros com diversas aplicações. Desse modo, essa tese faz uso desse nobre material como suporte principal da estrutura projetada, o mastro, como é observado na caracterização e nos resultados dos ensaios das estruturas confeccionadas, trazendo novos conceitos construtivos à sociedade.

Além disso, o uso do bambu tem se mostrado como elemento que agrega valor local, com facilidade e rapidez em resolver o problema de uso de espaços e acessibilidade, além de

que em alguns casos, a estrutura paleativa ou provisória pode se tornar algo permanente entre as comunidades. Tem-se assim a importância em se propôr projetos alternativos que se utilize de materiais, processos de construção e design estrutural atuais e versáteis frente aos desafios que o dia-a-dia apresenta.

1.2 – Breve Histórico sobre Estruturas Tensionadas

Na história evolutiva humana pode-se identificar em seus primórdios, a partir de pinturas rupestres em cavernas e outros vestígios, que o povo nômade utilizava estruturas tensionadas e membranas para se proteger das intempéries. Jota e Porto (2006) comentam que eles usavam peles de animais sobre armações de madeira ou árvores como suporte.

Alguns espaços arquitetônicos em teatros e anfiteatros romanos eram construídos no esquema de velas, a partir de couro estendido sobre pátios e ruas, fixadas com cordas, para proteger as pessoas contra o vento, o sol e a chuva (SIMÕES, 2002). Em alguns casos, era utilizado tecido em trama, mesmo sendo mais caro que o couro. O Coliseu, em Roma, apesar de suas dimensões colossais, tinha uma complexa cobertura de lona para os espectadores, constituída de vigas em balanço e cordas tensionadas.

Pauletti (2003, p.2) conceitua dentre as possíveis nomenclaturas, os tipos de estruturas sob tensão por meio de seu comportamento, classificando-as como sistemas flexíveis, os quais sofrem drásticas mudanças de forma quando alterado seu padrão de carregamento, diferente de sistemas estruturais rígidos, como se observa na Figura 1.2.1, e complementa que nas estruturas flexíveis, os carregamentos externos devem ser equilibrados por esforços de tração.

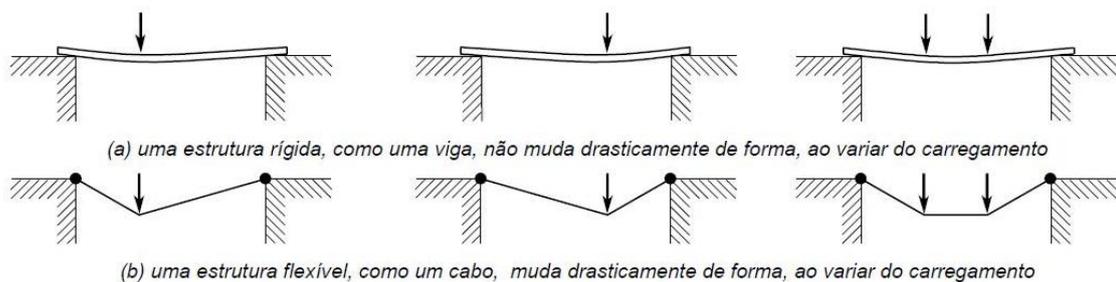


Figura 1.2.1: Distinção entre estruturas rígidas e flexíveis (PAULETTI, 2003, p.2).

Quanto ao peso das estruturas, o autor define que geralmente as estruturas tensionadas são identificadas como estruturas leves, mas que apesar da vantagem de sua redução de peso, essas estruturas tornam-se críticas quando recebem carregamento de vento, criando instabilidades aeroelásticas. Enquanto elementos construtivos, Pauletti (2003) conceitua ainda

que essas estruturas leves se subdividem em dois grupos: estruturas de cabos, aquelas capazes de suportar carregamentos externos apenas desenvolvendo esforços axiais de tração, e as estruturas de membrana, onde seus elementos de superfícies equilibram os esforços externos desenvolvendo tensões de tração e cisalhamento.

Para Pauletti (2003), as estruturas tensegrity e as estaiadas são do tipo mista, combinando elementos que trabalham sob compressão ou à flexo-compressão e cabos tracionados, que são elementos típicos das estruturas tensionadas. Este tipo de estrutura é comum como as utilizadas em habitações leves. Na maioria dessas estruturas tem se observado o uso de mastros enquanto elemento estrutural, de modo que novos designs e materiais se fazem necessários ao desenvolvimento dessa técnica construtiva.

Uma estrutura tensionada muito comum nos povos do oriente são os *yurtas*, uma espécie de tenda com paredes, no formato de uma gaiola circular de madeira que é coberta com tecido grosso ou lã, e fechada com uma porta de madeira. Nas Figuras 1.2.2 e 1.2.3 são apresentados alguns exemplos de *yurtas*, encontrados em alguns países como na Mongólia e Rússia. Alguns mercadores mais ricos viajavam e levavam tendas luxuosas com tapetes e suntuosos objetos de luxo, e se instalavam por onde passavam. Otto (*apud* ROLAND, 1973) explica que esses povos nômades tinham um sentido de propriedade em relação às suas tendas, igual aos povos sedentários o tem com seus edifícios de pedra.

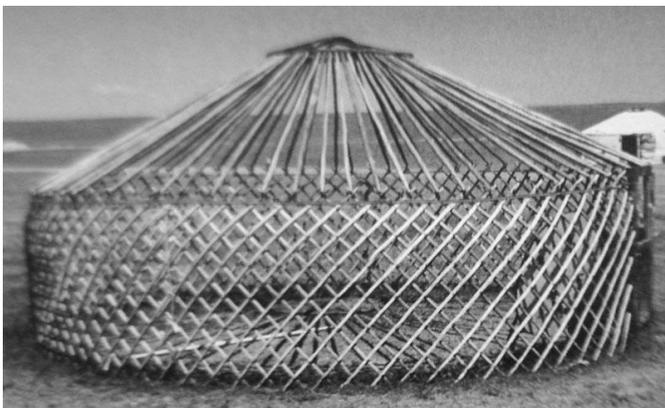


Figura 1.2.2: Estrutura interna do Yurta, antes da cobertura. (Fonte: OLIVER, 1990, p.157)



Figura 1.2.3: Yurta com cobertura. (Fonte: OLIVER, 1990, p.157)

Outro tipo de estrutura encontrada no deserto do Saara, na Arábia Saudita, Afeganistão, Irã e na Jordânia, são os “*black tents*”, onde as tribos nômades utilizam em suas tendas tanto cordas como pedras locais para fixação e apoio, como pode ser visto nas Figuras 1.2.4 e 1.2.5.



Figura 1.2.4: Tendas na região do Irã, com uso de madeira e amarrações de cordas.
(Fonte: OLIVER, 1990, p.26).



Figura 1.2.5: *Black tents* de tribos na região do Irã.
(Fonte: OLIVER, 1990, p.50).

Berger (2005) apresenta alguns modelos de tendas dos povos nômades, com utilização de peles e ossos de animais na confecção e estruturação das tendas. O autor comenta ainda que por se tratar de material biodegradável, é difícil precisar quanto tempo eles utilizaram esses materiais. Apenas nas regiões mais frias como Sibéria ou Alaska pode-se observar evidências dessa cultura e uso dos materiais. Essa retrospectiva passa pelas velas de cobertura nas arenas romanas, derivadas das estruturas de embarcações ancestrais, até as pontes estaiadas do século XIX e XX, como a ponte Brooklyn (completada em 1883), a ponte George Washington (de 1929), e a ponte Severin, em Colônia (de 1959). Quanto aos materiais utilizados, nesta panorâmica Berger (2005) mostra ainda que o algodão e couro foram substituídos por modernos materiais não combustíveis com padrões científicos computadorizados, saindo de cena as cordas e entrando os cabos de aço galvanizados, com estruturas de aço ou alumínio, arcos de concreto e estruturas com tensões predeterminadas. O arquiteto alemão Frei Otto foi quem desenvolveu o uso de estrutura construída com membrana têxtil e cabos de aço de tração no contorno (ROLAND, 1973). Otto desenvolveu técnicas para análises de esforços dinâmicos, padronagem, corte e montagem de superfícies com uso de modelos físicos reduzidos ensaiados em túnel de vento e técnicas de medição, algo que nenhum outro pesquisador havia realizado até então. Uma de suas obras mais conhecidas é o Complexo Olímpico de Munique, para os Jogos Olímpicos de 1972 (Figura 1.2.6), onde se pode observar uso de mastros tanto de compressão quanto tração, nas junções do sistema de cobertura e da base.



Figura 1.2.6: Detalhes da cobertura no Complexo Olímpico de Munique (OTTO, 2005).

Outro exemplo de uso de mastros em estruturas de coberturas tensionadas é o estádio Rei Fahd, em Riad (Arábia Saudita), inaugurado em 1987, que utiliza 24 módulos de mastros de 60 metros de altura, sustentando todo o conjunto de cobertura de membrana, como se pode observar na Figura 1.2.7.

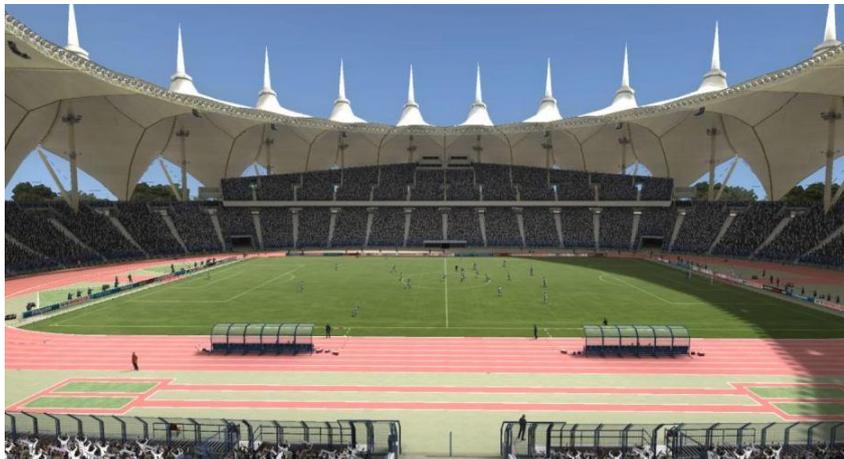


Figura 1.2.7: Aspecto interno do Estádio Rei Fahd (Riad, Arábia Saudita).
<http://www.xbox360brasil.com/2012/06/veja-imagens-do-king-fahd-international.html>

Para espaços menores, o uso de mastros e estruturas tensionadas também se faz presentes, como é o caso da cobertura da Feira de Ananindeua (PA), inaugurada em 2006, destinada ao comércio de frutas, peixes e outros alimentos. Gelinski (2007) comenta que a cobertura é composta por três módulos que se interligam entre si, tendo formas de cálice (com 9,6 metros de diâmetro e 5,5 metros de altura), de guarda-chuva invertido (de 16 metros de diâmetro) e outro cônico (apoiadas em mastros metálicos de 21 metros de altura), garantindo

troca de ar naturalmente no ambiente e permitindo um adequado conforto ambiental, evitando efeito estufa (Figuras 1.2.8 e 1.2.9).



Figura 1.2.8: Estrutura da cobertura tensionada, Feira de Ananindeua, PA. (GELINSKI, 2007)



Figura 1.2.9: Vista da estrutura da Feira de Ananindeua, PA. (GELINSKI, 2007)

Quanto ao sistema de estruturas atualmente existente, Bechthold (2008) mostra que existem dois grupos principais: o sistema clássico rígido que apresenta pequenas deformações quando sujeitas a cargas, enquanto que o sistema não rígido apresenta grandes deslocamentos quando submetidos a carregamentos. Membranas tensionadas e cabos, e membranas com carregamentos mecânicos ou pré-tensionadas pneumáticamente fazem parte do grupo das estruturas não rígidas. Já as colunas, vigas, feixes, treliças, conchas e placas dobradas fazem parte de sistemas rígidos. Para o autor, rígido neste caso não significa que estão sem cargas e deformações. O autor comenta ainda que as deformações estão sempre presentes, mas o deslocamento é muito pequeno se comparado com a dimensão da estrutura. No capítulo 2 são detalhados esses dois sistemas e suas características, e alguns nomes de destaque que fizeram pesquisas e criações na área de estruturas tensionadas.

1.3 – O uso de Bambu

A presença do bambu nas atividades humanas pode ser observada há milênios. Desta cultura, muito se tem pesquisado e aproveitado deste material natural. O clima no Brasil favorece o cultivo desta gramínea, por se tratar de uma cultura de características tropicais, inclusive com incentivos recentes do governo para este tipo de plantio e produtos gerados a partir desta matéria prima.

Enquanto possibilidades estruturais, renomados autores trabalham neste sentido. Dentre alguns dos principais nomes, pode-se citar Janssen (1983 e 1991), Arce-Villalobos (1986), Dunkelberg (1985), Ghavami e Marinho (2003) e Tung (2010), com estudos de

propriedades geométricas e mecânicas e uso do bambu enquanto material estrutural para construções. Janssen (1983), por exemplo, aborda possibilidades de uso do bambu enquanto estrutura, especialmente em treliças, coberturas e pontes. Ele mostra inicialmente comparações de energia necessária para produção entre concreto, aço, madeira e o bambu, apresentando ampla vantagem deste último material frente aos demais. Em sua tese, no capítulo sobre propriedades mecânicas, Janssen mostra algumas características físicas e mecânicas do bambu, como resultados de ensaios de compressão para posições topo meio e base da barra do bambu, além dos resultados de ensaios de flexão e cisalhamento. Apresenta também análise dos resultados de testes utilizando conexões com parafusos e amarração em treliças de bambu.

Arce-Villalobos (1986, capítulos 2 e 4) também aborda temas como a tensão e compressão de barras de bambu e conexões, bem como o design de estruturas de bambu. Em seu capítulo 6, o autor apresenta algumas possibilidades de design para estruturas de bambu, e complementa que “estruturas de bambu oferecem ótimos desempenhos estruturais sob forças axiais” (p.87). O autor mostra alguns sistemas de conexão com elementos centrais de aço, tubos e placas de aço, conexões com fundação ou com elementos de concreto, e elementos de feixes compostos de três e quatro barras de bambu conectadas com anel, sem, no entanto, apresentar resultados de testes de compressão deste feixe.

Moreira e Ghavami (2001) demonstram a influência da imperfeição inicial de colunas de bambu quanto à flambagem. Pesquisas de Moreira, Melo e Ripper (2004) deram início a estudos, os quais possibilitaram o desenvolvimento desta tese, quanto à utilização de bambu na construção de mastros, a ser abordado no capítulo 4.

1.4 – Objetivos

O objetivo geral da tese é o desenvolvimento do design de três tipos de mastros: híbrido, composto e de feixe, utilizando bambus, cabos de aço, parafusos e cintas metálicas, através de experimentos mecânicos de protótipos com análise numérica para o estabelecimento de estados-limites últimos e estados-limites de serviço.

Como objetivos específicos, têm-se:

- a) design dos mastros, incluindo conexões e apoios;
- b) desenvolvimento de técnicas construtivas;

- c) análise do comportamento estrutural global a partir dos ensaios mecânicos;
- d) modelagem numérica dos mastros ensaiados e respectivas análises teórico-experimentais.

1.5 – Justificativa

A flexibilidade do bambu enquanto elemento estrutural faz com que elementos longos sejam individualmente utilizados em grande quantidade nas edificações, para melhor distribuição do carregamento solicitante. Essa configuração, longe de ser uma má solução, uma vez que conduz a uma estética arquitetônica genuína, se mostra adequada a regiões sujeitas a sismos; se a construção tiver condicionantes principalmente econômicos, tem a desvantagem de utilizar um número excessivo de barras, o que tende a onerar os processos de construção e de manutenção das estruturas.

Por outro lado, as estruturas mais leves da contemporaneidade, as estruturas tensionadas, utilizam elementos longos e resistentes como suportes, normalmente de ligas metálicas. Os softwares atuais permitem o fácil traçado de superfícies anticlásticas (ROLAND, 1973; MOREIRA, SANTOS e SILVA, 2014), que dispostas em moldes, podem ser soldadas eletronicamente ou costuradas, conforme o material e porte da superfície. Essa leveza e relativa facilidade construtiva das membranas podem ser coerentemente associadas à leveza do bambu, resultado da geometria tubular e do baixo peso específico do material, que para a espécie em estudo, *Phyllostachys pubescens*, é igual a $7,9 \text{ kN/m}^3$. Neste caso, a utilização dos bambus como suportes de estruturas tensionadas de pequeno porte, exige que se façam composições sistêmicas dos bambus individuais, ou seja, mastros de bambus. Ainda que as estruturas tensionadas sejam as coberturas mais leves para grandes vãos, a pré-tensão da membrana, superposta às ações de vento e cargas acidentais, faz com que os mastros sejam comprimidos por forças relativamente elevadas.

Essa potencialização dos bambus em mastros viabiliza nova possibilidade de aplicação dos bambus a estruturas deste tipo e outras, tornando acessíveis às populações em geral e às populações rurais em particular, como apontam Moreira, Santos e Silva (2014). Em termos práticos, o bambu é um elemento estrutural contemporâneo por atender aos requisitos da produção sustentável, além de ser muito eficiente dentro de seu domínio de capacidade de carga, numa análise comparativa de custo-benefício.

Atualmente, com um desenvolvimento tecnológico e científico sendo trabalhado em diversos âmbitos, observam-se mudanças sócio-culturais as quais exigem grande esforço e

colaboração global para acompanhar as necessidades de novos sistemas de produção e de uso racional dos recursos ambientais. O desenvolvimento local com base em recursos locais e gestão social é visto como política correta para erradicar a pobreza e promover a igualdade entre as pessoas. Neste contexto, sustentabilidade é uma palavra de ordem e os bambus são uma das riquezas que permitem a criação de diferentes sistemas de produção sustentável, os quais podem ser utilizados como suporte em diversas estruturas. Isto tem sido caracterizado pelo empenho de profissionais técnicos nas últimas décadas na obtenção de estruturas com eficaz grau de resistência e baixo consumo de materiais, além de rapidez na montagem e desmontagem das estruturas, processo cada vez mais notável com a utilização de bambu enquanto elemento estrutural.

1.6 – Conteúdo Geral

No Capítulo 2 tem-se a revisão bibliográfica apresentando o estado da arte, a evolução e características de estruturas tensionadas e o uso de mastros nesse tipo de estrutura como parte integrante do sistema construtivo. Há também um subcapítulo que trata das vantagens de florestas de bambu quanto à captura de carbono e a produção de oxigênio, além de proteger o solo contra erosão e evitando assoreamento de rios, lagos e lagoas.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada no desenvolvimento das atividades da tese, bem como todo o processo construtivo dos mastros e a realização dos ensaios de compressão axial.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados e análises das modelagens numéricas e dos ensaios experimentais realizados nos protótipos construídos.

O Capítulo 5 apresenta as considerações da pesquisa, desenvolvimento e análises realizados, e recomendações para futuros trabalhos.

2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Neste capítulo, tem-se uma abordagem sobre o estado da arte de mastros, estruturas tensionadas e estruturas de bambu; apresenta-se o bambu como elemento estrutural possível em sistemas construtivos e referências quanto à utilização do bambu como crédito de carbono em tempos de busca por soluções de baixo impacto ambiental e a interação entre o design e a engenharia como fundamental ao desenvolvimento de projetos inovadores; apresenta-se também teoria quanto à flambagem de colunas.

2.2 Mastros e Estruturas tensionadas

Em pesquisas sobre estruturas de bambu, observam-se muitos artigos e materiais sobre estruturas moleculares, utilizando-se de compósitos de fibras e materiais cimentícios em conjunto com as barras de bambu, bem como fraturas em ensaios de flexão, mas em bambus isolados (AMADA e UNTAO, 2001, GHAVAMI *et al*, 2003, TAN *et al*, 2011, BRESCANSIN, 2003, SILVA, GHAVAMI e ALMEIDA, 2003). Mastros de torres de iluminação, torres metálicas em túnel de vento são outros elementos comumente observados quando se trata de pesquisa de mastros, visto a grande aplicação quanto a torres de comunicação e transmissão de energia. No entanto, não se constatou publicações sobre ensaios de compressão e flexão em mastros de bambu.

Dunkelberg (1985), Arce-Villalobos (1986), Lopez (2003), Lugt, Dobbelsteen e Janssen (2006), e Pereira e Beraldo (2008) mostram a importância e o potencial de construções com o bambu, comparando-o com outros materiais comumente utilizados.

Sabe-se que toda atividade humana necessita de proteção quanto às intempéries naturais, e desse modo, estruturas de cobertura precisam de apoio e suporte para sua construção. Desde os primórdios, materiais diversos têm sido utilizados como apoio estrutural sejam madeira, aço, concreto ou mais recentemente os materiais compósitos.

A evolução nos sistemas de cobertura se mostrou mais acentuada nos séculos XIX e XX, como apontam Jota e Porto (2006), devido principalmente à evolução dos materiais e ao desenvolvimento de cabos de aço de alta resistência e de membranas capazes de suportar altos níveis de tensão, com melhor durabilidade e boa estabilidade.

Bechthold (2008) apresenta de imediato uma classificação das estruturas encontradas, subdividindo-as em duas grandes categorias: as estruturas não rígidas e as rígidas; dentre essas duas, apresenta ainda algumas subcategorias de modo a melhor explicar sua forma estrutural, como se observa na Figura 2.2.1:

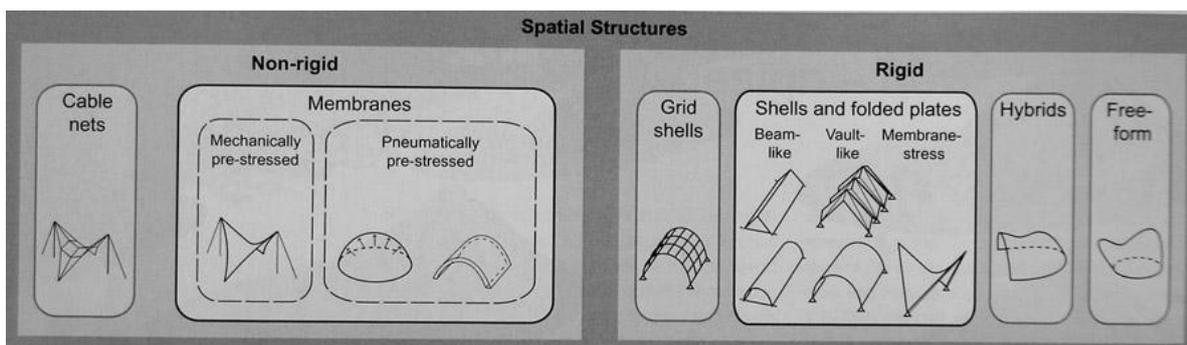


Figura 2.2.1: Categorias de superfícies estruturais (BECHTHOLD, 2008, p.4).

Dentre as estruturas não rígidas, fazem parte estruturas construídas com cabos e redes, e as estruturas construídas com membranas mecanicamente e pneumaticamente pré-tensionadas. Dentre as estruturas rígidas, encontram-se as coberturas construídas com rede de barras entrelaçadas, sistema denominado *grids* ou cascas, além das superfícies retas e em curvas, das estruturas híbridas e das estruturas de formas livres. Com base nessas características estruturais, o autor defende que é preciso romper com alguns paradigmas construtivos estabelecidos, gerando novos modelos, e que as invenções e usos não convencionais de construções estratégicas trabalham com grandes desafios nos projetos de complexas superfícies curvas e dobradas. Para tanto, o parâmetro primário desta organização é o comportamento estrutural. Exemplificando casos de estruturas construídas nessas subcategorias, o autor mostra como esses sistemas trabalham, como no caso de estruturas

tensionadas, utilizando cabos, mastros e membranas de cobertura, como se observa nas Figuras 2.2.2 e 2.2.3:

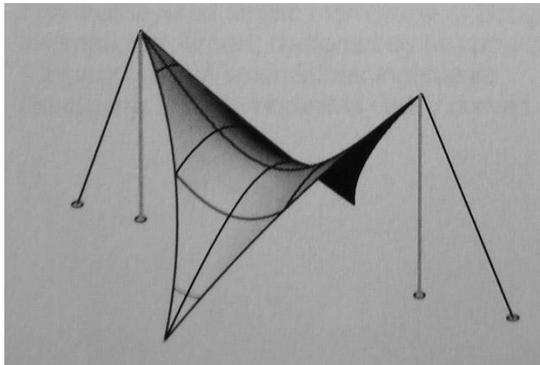


Figura 2.2.2: Sistema de cobertura com cabos. (BECHTHOLD, 2008, p.50)

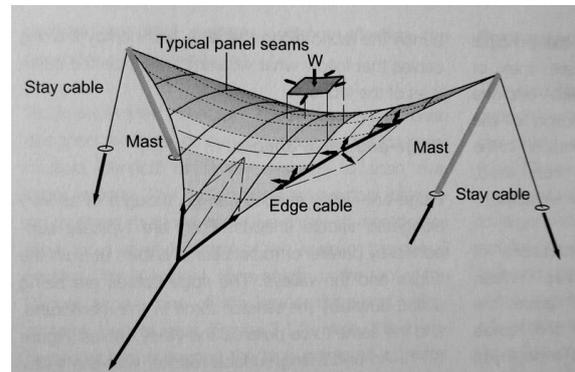


Figura 2.2.3: Elementos constitutivos de coberturas com cabos, mastros e membrana. (BECHTHOLD, 2008, p.53)

Quanto ao sistema de coberturas com membranas, Bechthold (2008, p.51) comenta que na prática, níveis de pré-tensão são determinados com base nos carregamentos externos e nas deformações toleráveis da membrana. Nos exemplos dados pelo autor, vê-se a presença de mastros de sustentação, Figuras 2.2.4 e 2.2.5.

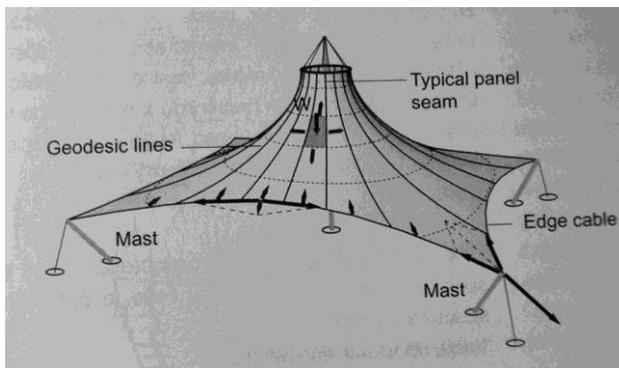


Figura 2.2.4: Esquema da estrutura com mastro de sustentação. (BECHTHOLD, 2008, p.55)

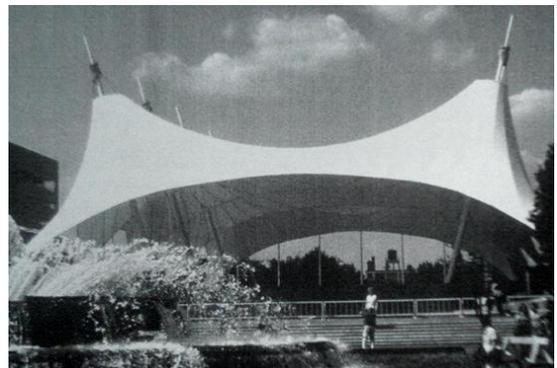


Figura 2.2.5: Exemplo de estrutura com mastros de sustentação. (BERGER, 2005, p.86).

Como exemplo desse sistema, pode-se observar na Figura 2.2.6 o Domo do Milênio, em Londres, que utiliza de doze imensos mastros metálicos, cabos e uma grande área coberta com painéis de membrana de fibra de vidro revestido de PTFE (politetrafluoretileno):



Figura 2.2.6: Vista externa do Domo do Milênio, com os mastros principais estaiados. (DREW, 2008, p.116)

Estudos da forma, sistemas de cobertura, análise estrutural e sistema de construção passam por vários âmbitos como o desenvolvimento de modelos de apresentação em escala (Figura 2.2.7), com diversos materiais como demonstra Bechthold (*apud*, p.68), similar a um dos processos de desenvolvimento de modelos no LASE (EE-UFGM). Estes processos envolvem também sistemas computacionais de escaneamento digital tridimensional, modelamento da superfície, cálculo estrutural, definição do material e sofisticado processo de fabricação (Figura 2.2.8) com detalhes de conexão e montagem.

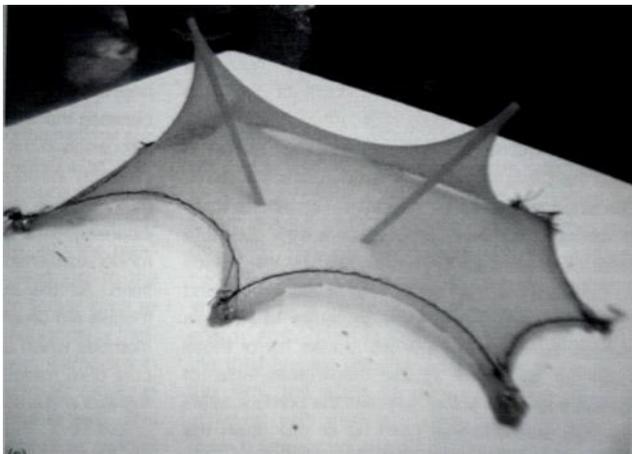


Figura 2.2.7: Modelamento com diversos materiais. (BECHTHOLD, 2008, p.68).

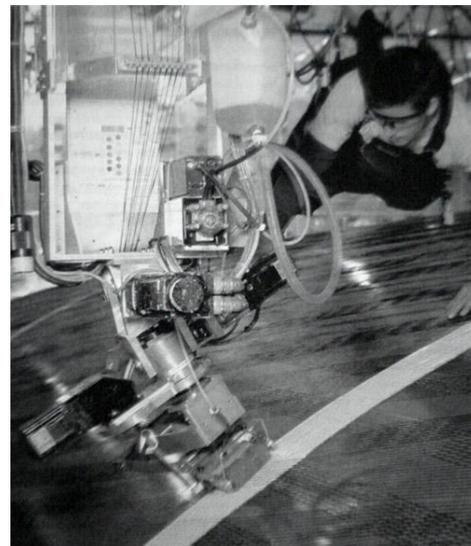


Figura 2.2.8: Processo de fabricação de membranas. (BECHTHOLD, 2008, p.87).

Otto (Figura 2.2.9), após a finalização de seu doutorado em Engenharia, fundou em Berlim em 1957 o Centro de Desenvolvimento de Construções Leves, partindo depois para a criação do Instituto de Estruturas Leves na Universidade de Stuttgart. Roland (1973) comenta que um de seus primeiros trabalhos na área de estruturas tensionadas foi um pequeno Pavilhão Musical para a Exposição Federal de Jardins, na cidade de Kassel, na Alemanha, em 1955,

ainda durante seus estudos (Figura 2.2.10). Esta estrutura foi construída com membrana têxtil e cabos de aço de tração de borda. Suas técnicas de análises de esforços dinâmicos e de medição foram algo inovador. Objetivando melhorar a resistência da cobertura das estruturas em seus projetos, ele trabalhou membranas de fibra de vidro com revestimento de poliuretano para proteger as fibras da umidade do ar e das chuvas.

O material sintético Policloreto de Vinila, conhecido pela sigla PVC, só foi utilizado na década de 1960, no pavilhão Alemão em Montreal, em 1967, apesar de existir desde 1940, melhorando o desempenho das superfícies colocadas sob tração. Roland (1973) explica ainda que o Pavilhão Musical em Kassel foi construído para durar apenas três anos, mas permaneceu em uso por seis anos ininterruptos. Jota e Porto (2006) mostram que, com a adição de camadas de acrílico sobre o PVC e um filme de PVF14, o tempo de vida útil aumentou de oito e quinze anos respectivamente. A estimativa hoje é em torno de 25 anos para esses materiais.



Figura 2.2.9: Frei Otto em Montreal. (OTTO, 2005, p.90)

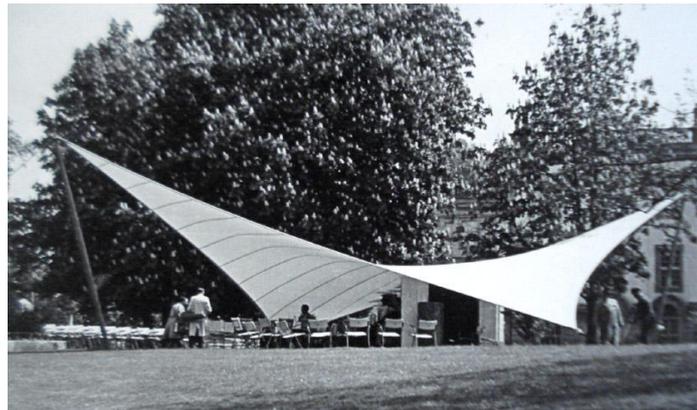


Figura 2.2.10: Pavilhão Musical para a Exposição Federal de Jardins, em Kassel, Alemanha, 1955. (OTTO, 2005, p.10)

Na década de 1960, John Argyris e Klaus Linkwitz desenvolveram cálculos matemáticos que se tornaram cada vez mais precisos. Argyris, nascido em Vólos, Grécia, estudou em Atenas e Munique e trabalhou como professor pesquisador na Universidade de Stuttgart. Foi um dos pioneiros no desenvolvimento do MEF (método dos elementos finitos), e recebeu a Medalha Timoshenko em 1981, prêmio concedido a pesquisadores que se destacam pelas contribuições à Engenharia Mecânica. Linkwitz, engenheiro, ex-diretor do Instituto de Aplicações Geodésicas para Engenharia em Stuttgart, desenvolveu novos métodos computacionais para cálculos de estruturas espaciais de longa extensão. Estes métodos agregaram conhecimento construtivo para o desenvolvimento e cálculo de estruturas, o que possibilitou a Otto seu trabalho na elaboração do Estádio Olímpico de Munique em 1972, o

qual contou com um modelo físico reduzido em escala 1 : 125, de onde foram extraídos dados geométricos construtivos (Figura 2.2.11).



Figura 2.2.11: Otto durante ensaios em modelo para o Estádio Olímpico (OTTO, 2005, p.124).

Esse estádio foi um marco na fase das construções tensionadas, com o uso de computadores e tecnologia digital. Projetado para mais de 80 mil expectadores, contou com uma área de 85 mil m², com estrutura de aço e coberturas de chapas acrílicas sustentadas por mais de 400 quilômetros de cabos de aço. As chapas utilizadas permitem a transmissão de luz do Sol e oferecem segurança contra ventos fortes, chuvas e nevascas.

Nas Figuras 2.2.12 e 2.2.13 podem-se observar a estrutura dos mastros do Estádio Olímpico de Munique, bem como parte de sua cobertura de chapas acrílicas. Vê-se também um aspecto do interior do estádio, com a cobertura sobre a arquibancada.



Figura 2.2.12: Mastro da estrutura de cobertura. (OTTO, 2005, p.268).



Figura 2.2.13: Aspecto interno do Estádio Olímpico de Munique. (OTTO, 2005, p.266).

O projeto e o desenvolvimento desse estádio olímpico abriram um leque de possibilidades de aplicação de estruturas tensionadas que remetem desde as formas arquitetônicas islâmicas, às velas dos navios e às montanhas. Assim, o desenvolvimento e

aplicação de novos materiais permitem coberturas flexíveis, com possibilidades de difusão de luz, transparência, ancoragem e sistemas de apoio diferenciados, o que não havia sido proporcionado com a tecnologia tradicional até então realizada.

As estruturas tensionadas estão sendo utilizadas em diversos projetos arquitetônicos em vários países, principalmente com a utilização de softwares que auxiliam nos cálculos estruturais e na descoberta de novos materiais para membrana de cobertura. Estas precisam de maior resistência para suportar as cargas aplicadas e design diferenciado na busca de um conforto adequado ao uso que se dará ao ambiente construído e também ao aspecto estético e visual. Pode-se ainda listar algumas vantagens das estruturas tensionadas, como:

- ✓ Leveza, com boa capacidade técnica de ser lançada para grandes vãos;
- ✓ Facilidade de montagem e desmontagem;
- ✓ Elementos estruturais mais simples de serem fabricados;
- ✓ Grande possibilidade de geometria estética utilizada nas formas de construção, o que garante também uma apresentação de vocação simbólica da estrutura;

Outro exemplo dessa aplicação é o projeto Mercado Popular da Rocinha (2004), Rio de Janeiro, do arquiteto Rodrigo Azevedo; buscou-se a leveza plástica da obra solucionando questões técnicas, como o escoamento de águas pluviais. Melendez (2005) comenta que o terreno já era utilizado pelos comerciantes locais, sendo uma calçada de cerca de 150 metros de extensão, com largura variável de 6 a 20 metros, por onde transitam diariamente cerca de 50 mil pessoas. O mercado funciona 24 horas por dia e tornou-se referência urbana, agregando pessoas, cultura popular e desempenhando função econômica relevante na economia local. A iluminação é difusa, instalada sobre a lona tensionada apoiada em mastros metálicos em aço tubular, ancorados em estrutura de concreto armado, como podem ser observados nas figuras 2.2.14 e 2.2.15.

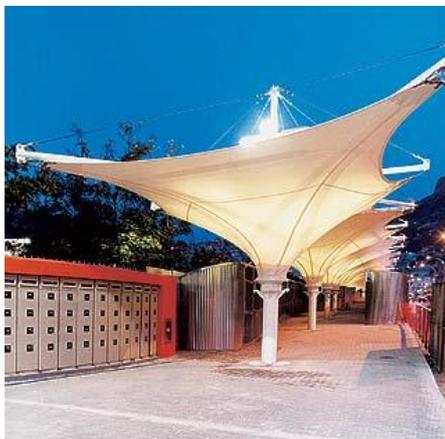


Figura 2.2.14: Mastro na confecção das estruturas. (MELENDEZ, 2005, p.66).



Figura 2.2.15: Mercado Popular da Rocinha – Rio de Janeiro RJ. (MELENDEZ, 2005, p.68).

Neste levantamento do estado da arte, breve histórico aqui apresentado, as estruturas fizeram uso de materiais convencionais como o aço e alumínio na confecção dos mastros e concreto armado como suporte da estrutura tensionada. Artigos publicados no NOCMAT (*International Conference on Non Conventional Construction Materials and Technologies*), em suas 14 edições desde 1984, demonstram a preocupação com materiais não convencionais na proposição de estruturas, especialmente o uso do bambu como alternativa estrutural à construção. Verschleisser (2008) apresenta possibilidades de uso do bambu na confecção de objetos com a técnica de tensegrity, trabalhando conceitos das barras tensionadas e cabos tracionados.

2.3 – Bambu: características e exemplos de utilização

Os bambus são classificados por McClure (1973), Liese (1998), Lopez (2003) e Beraldo *et al* (2003) como *Bambusoideae*, ou seja, pertencem ao grupo de gramíneas arborescentes gigantes. Seus colmos crescem a partir de rizomas subterrâneos e são abundantes em toda região tropical e subtropical do planeta. Pereira e Beraldo (2008, p.43) citam que existem aproximadamente 1300 espécies e 50 gêneros, mas esses números são discutíveis visto que cada autor aborda tomando uma classificação botânica de um vegetal, que ora considera a morfologia e ora suas flores e frutos. Alguns autores atribuem apenas uma florada ao bambu que em seguida desaparecem. A planta é constituída basicamente de rizoma subterrâneo (Figura 2.3.1) e de colmo lenhoso normalmente oco (Figuras 2.3.2 e 2.3.3), com feixes de fibras e vasos (responsáveis pela resistência mecânica) e de células de parênquima (responsáveis pela flexibilidade do colmo) dispostos longitudinalmente.

Beraldo *et al* (2003, p.254) comentam também que, apesar do bambu fazer parte da paisagem brasileira, em sua grande maioria é de origem asiática, foi trazida pelos colonos portugueses (*Dendrocalamus* e *Bambusa*) e mais recentemente por imigrantes asiáticos (*Phyllostachys*). Já os bambus *Guadua* presentes na Amazônia são considerados bambus nativos. É muito utilizado como demarcação de curvas de nível, cercas, estrados, esteiras, comedouros, cestos, forros, proteção de terrenos contra erosão, carvão, drenagem, condução de água, alimentação, lazer, dentre outros. Por ser uma planta de rápido crescimento, o bambu viabiliza colheita com ciclos curtos, de dois a quatro anos, com elevado nível de produção. E se tiver um manejo adequado, como desbaste, corte seletivo, tratos culturais, sua produção aumenta o rendimento e permite uma obtenção de colmos de melhor qualidade (BERALDO *et al*, 2003, p.255). Este material se apresenta como elemento estrutural leve tanto do ponto de

vista de resistência como por suas características ecológicas, atendendo às demandas do nosso tempo, que exigem sustentabilidade dos processos produtivos. Outras características técnicas do bambu, juntamente com dados de ensaio são apresentadas no Capítulo 4.

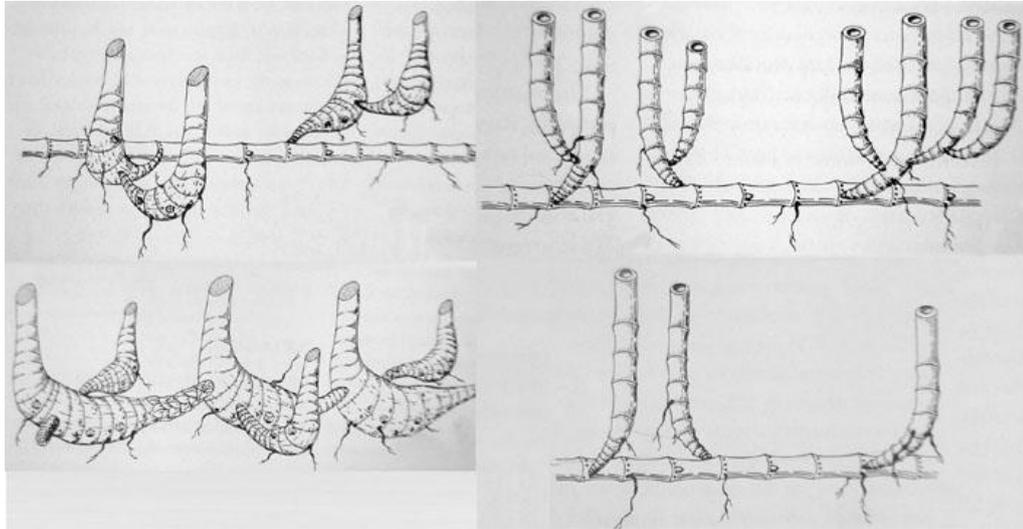


Figura 2.3.1: Alguns tipos de rizoma. (JUDZIEWICZ *et al*, 1999, p.8)

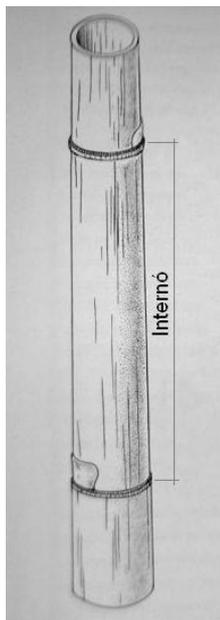


Figura 2.3.2: Colmo do Bambu. (JUDZIEWICZ *et al*, 1999, p.15)

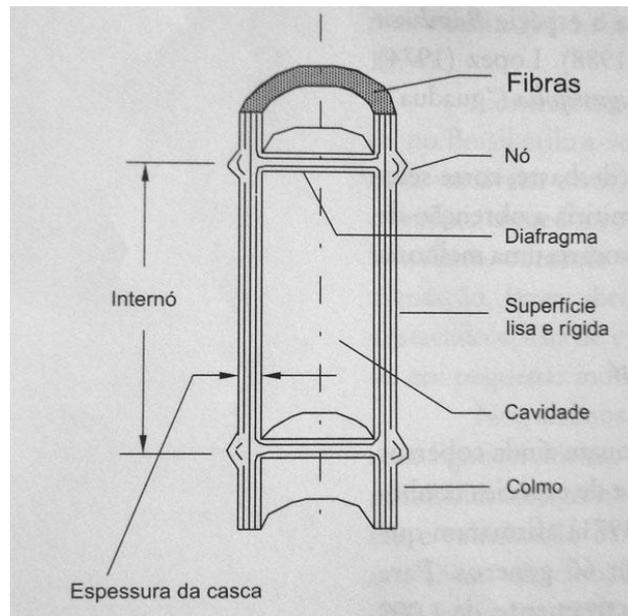


Figura 2.3.3: Elementos constituintes do colmo. (BERALDO *et al*, 2003, p.256)

Na América do Sul, Equador e Colômbia despontam com projetos arrojados e amplo uso desta matéria prima, como as obras de grande porte do arquiteto Simón Vélez (Figuras 2.3.4 e 2.3.5):



Figura 2.3.4: Grande estrutura projetada por Simon Vélez. (VILLEGAS, 2003, p.56).

Na estrutura da construção apresentada na Figura 2.3.5, o arquiteto utiliza mastros de alma descontínua, com extremidades fixadas com parafusos junto à estrutura de cobertura.



Figura 2.3.5: Estrutura de bambu, na Colômbia. (VILLEGAS, 2003, p.68).

Na Figura 2.3.6, tem-se outro exemplo de aplicação do bambu como estrutura na construção da Capela de Nossa Senhora da Pobreza, na cidade de Pereira, Colômbia, também obra do arquiteto Simón Vélez.

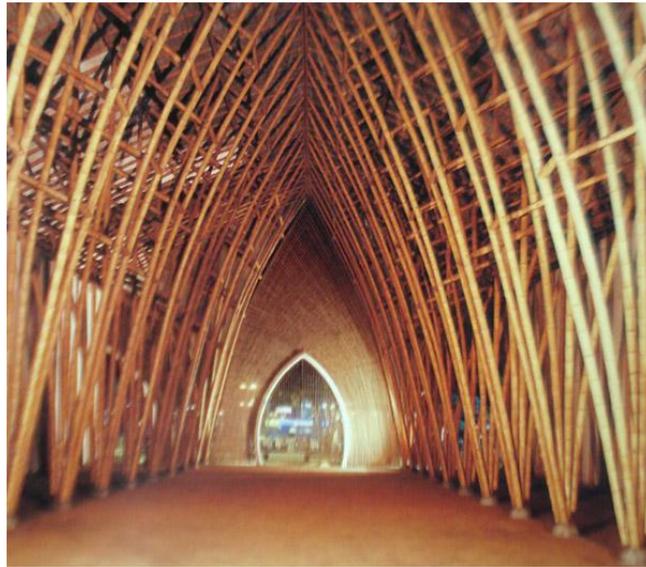


Figura 2.3.6: Aspecto interno da Capela de Nossa Senhora da Pobreza, de Simón Vélez, Colômbia. (VILLEGAS, 2003, p. 47).

A produção de bambu pode ocorrer em áreas comuns como campos, encostas, escarpas, pois ele se adapta à maioria dos tipos de clima e altitude, o que favorece a aplicação do conceito de uso do bambu em diversas situações.

Por ser uma planta da família das gramíneas e de rápido crescimento, a partir do terceiro ou quarto ano já podem ser coletados os colmos, tendo em vista que o período da primeira poda é muito curto; em termos de durabilidade ou vida útil, dependendo da aplicação e tratamentos de preservação, o bambu pode durar 20 anos ou mais, o que garante a aplicação em situações de construções que não demandem estruturas para 50 anos de uso.

Uma peça de bambu, de 6 metros de comprimento e 10 cm de diâmetro médio pesa apenas 13 kgf, com 8% de umidade, permitindo grande facilidade de transporte, do local do plantio até o local de uso. Assim, por ser um material leve e fácil de ser manuseado, o processamento do bambu não necessita de grandes maquinários, fazendo com que possa ser beneficiado com ferramentas simples como serrote ou serra de arco, furadeiras manuais, lixas, canivetes para pequenos encaixes, e auxílio de parafusos de fixação, materiais baratos e que podem ser encontrados em quaisquer lojas de materiais de construção.

Arce-Villalobos (1986, p. 111-113) apresenta alguns resultados experimentais para módulo de elasticidade de tração paralela às fibras, para módulo do internó e módulo do nó para a espécie *Bambusa blumeana*, originário das Filipinas, com 10,04% de umidade, como se observa na Tabela 2.3.1:

Tabela 2.3.1: Módulo de Elasticidade do bambu *Bambusa blumeana*:

	Módulo do Internó (GPa)	Módulo do nó (GPa)
Mínimo	8,928	5,511
Máximo	26,795	9,794

Mais adiante (p.122), o autor observa que a média do módulo de elasticidade para esta espécie ficou em 18,785 GPa. Para a espécie *Guadua s.p.*, (p.123-124), amostras de internó, proveniente da Costa Rica, o autor apresenta mínimo e máximo Módulo de Elasticidade de 14,062 GPa e 25,233 GPa respectivamente, com média de 18,465 GPa, com umidade de 12%.

Espinosa, em 1930, (*apud* ARCE-VILLALOBOS, 1986, p.38) testou algumas amostras de bambu sob compressão, de tamanhos de 1200 mm e 350 mm de altura, com uma velocidade de deformação da ordem de 0,02 mm/s, da espécie *Bambusa spinosa*, das Filipinas. Como resultado, obteve dados de 27 a 32 MPa para peças de 1200 mm, e de 51,8 a 82,8 MPa para as peças curtas. Já para a espécie *Phyllostachis edulis* e *Phyllostachis reticulata*, Ota em 1950 (*apud* ARCE-VILLALOBOS, 1986, p.38) chegou a resultados próximos, com teste de compressão, obtendo 81,6 MPa e 83,1 MPa respectivamente.

Quanto às características anatômicas do bambu, Liese (1998) apresenta uma extensa análise de sua composição, com imagens microscópicas de sua configuração dos vasos condutores, parênquimas e das fibras. Na Figura 2.3.7, pode-se observar um interior do colmo do bambu, com a espessura das paredes e os nós do bambu. Na Figura 2.3.8 observa-se uma imagem microscópica da parede do bambu, corte transversal, com a distribuição de densidade das fibras. E na Figura 2.3.9, tem-se uma imagem ampliada do sistema de vasos condutores, parênquimas e fibras na parede do bambu. Pode-se observar também nesta figura, que o amido está depositado em grãos no interior dos parênquimas.

Essa arquitetura natural tem um componente genético que resultou das constantes interações do bambu com as ações do vento, que estimularam o aumento de resistência local dos pontos mais solicitados mecanicamente, não somente pela lignificação concentrada nos tecidos celulósicos, como pelas variações geométricas localizadas. Do ponto de vista da ciência dos materiais compósitos, o bambu pode ser definido como uma composição de dois diferentes materiais: um primeiro com fibras e vasos orientados e alinhados ao longo do colmo nos trechos internodais, que se conectam a um outro segundo material composto de fibras e vasos embolados – denominados anastomose – que compõem os enrijecedores intermitentes supra citados, os nós.

Em ambos os materiais as fibras e vasos estão envolvidos por uma matriz parenquimatosa, de células ocas que armazenam açúcares. Do ponto de vista mecânico, o bambu, devido à configuração, rigidez e resistência dos componentes e à geometria tubular, é um elemento estrutural flexível de alta resistência mecânica. Essa flexibilidade faz com que os elementos longos tenham baixa capacidade de carga em flexo compressão, se o objetivo é a aplicação do bambu em estruturas da construção civil.

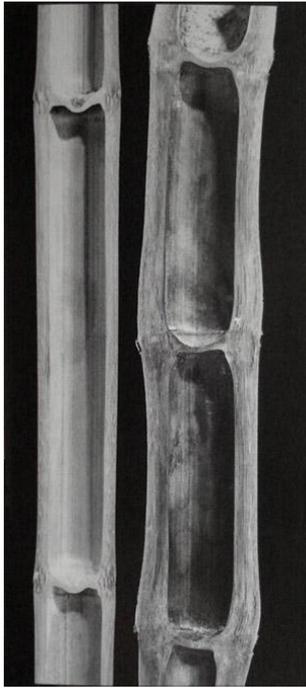


Figura 2.3.7: Configuração do interior do internó do bambu. (LIESE, 1998, p.13)



Figura 2.3.8: Parede do bambu, com a distribuição das fibras. (LIESE, 1998, p.36)

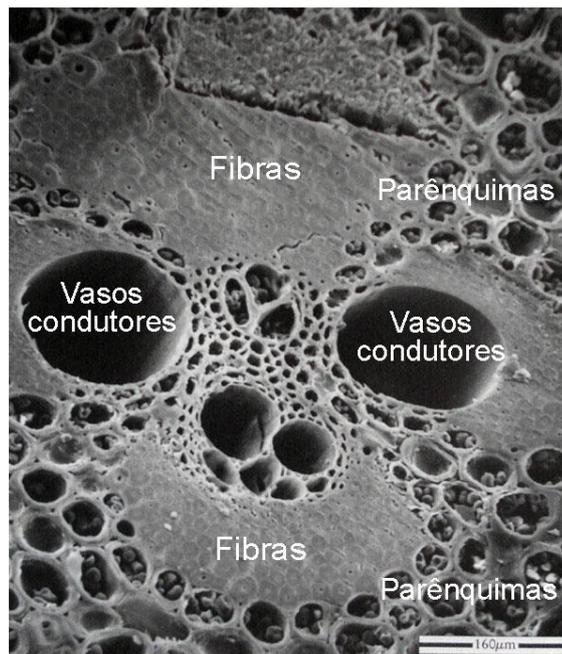


Figura 2.3.9: Imagem aproximada dos vasos condutores, fibras e parênquimas do bambu. (LIESE, 1998, p.45)

Esta questão pode ser contornada através de composições sistêmicas, denominadas mastros, como apresentam Silva, Rodrigues e Moreira (2014) e Silva *et al* (2014), em que se consegue aplicar bambus longos em um único elemento resistente a cargas de compressão relativamente altas.

Pereira e Beraldo (2008, p.68) também apresentam uma vasta pesquisa quanto aos elementos anatômicos de diversas espécies de bambu, bem como suas características físicas e estruturais. Na Tabela 2.3.2, podem ser observadas porcentagens de vasos, fibras e parênquimas distribuídos nas camadas do bambu de duas espécies:

Tabela 2.3.2: Distribuição de vasos, fibras e parênquimas (%).

Camada de colmo	<i>D.giganteus</i>			<i>P.viridis</i>		
	Vasos	Fibras	Parênquima	Vasos	Fibras	Parênquima
Interna	11	16	73	13	24	63
Intermediária	9	32	59	13	37	50
Externa	8	55	37	10	63	27

A composição orgânica é mostrada por Pereira e Beraldo (2008, p.119), Tabela 2.3.3:

Tabela 2.3.3: Composição orgânica de algumas espécies de bambu (%).

Determinações:	<i>B.vulgaris</i>	<i>E.saligna</i>	<i>P.elliottii</i>
Celulose	49,2	54,6	55,5
Lignina	14,5	25,5	26,0
Pentosanas	22,3	16,4	7,1
Solubilidade em soda a 1%	33,4	14,8	16,9
Solubilidade em água quente	15,0	1,6	3,8
Solubilidade em álcool-benzeno	5,2	1,4	6,7
Cinzas	1,8	0,3	0,3

Em relação à estabilidade dimensional de três espécies, Pereira e Beraldo (2008, p.134) apresentam porcentagem de umidade e retração radial, tangencial e longitudinal, como se observa na Tabela 2.3.4:

Tabela 2.3.4: Estabilidade dimensional (%):

ESPÉCIE	Região do colmo	Umidade saturação	Umidade ao ar	Retração Radial	Retração Tangencial	Retração Longitudinal
G.angustifolia	Base	73,36	16,88	-5,52	-8,75	-1,77
	Meio	71,82	15,87	-8,82	-8,14	-0,88
	Ponta	57,71	14,09	-7,47	-5,43	-0,84
D.giganteus	Base	59,96	13,45	-5,29	-5,73	-0,19
	Meio	37,59	13,17	-5,13	-5,23	-0,26
	Ponta	34,78	15,67	-6,65	-5,46	-0,15
G.verticillata	Base	64,08	12,34	-3,70	-2,83	-0,29
	Meio	52,86	9,89	-7,10	-5,95	-0,17
	Ponta	47,55	9,63	-8,70	-5,48	-0,21

Quanto à capacidade de carga à compressão, Pereira e Beraldo (2008, p.139) apresentam alguns dados do bambu, para a espécie *Dendrocalamus giganteus* de 3,5 anos, em corpos de prova de dimensões de 20 mm (largura) x 30 mm (altura) x 5 mm a 6 mm (espessura), como se observa na Tabela 2.3.5:

Tabela 2.3.5: Tensão de ruptura à compressão para o bambu:

Compressão – Material simples (ripas)						
	Sem Nó			Com Nó		
Região do colmo	<i>fco</i> * (MPa)	<i>Eco</i> * (GPa)	Umidade (%)	<i>fco</i> * (MPa)	<i>Eco</i> * (GPa)	Umidade (%)
Base (n=16)	68,5	16,9	11,9	59,1	15,9	11,9
Meio (n=16)	70,8	16,6	11,8	65,4	17,5	11,9
Topo (n=16)	71,5	19,0	11,9	65,6	20,9	12,0
Colmo	70,3	17,5	11,9	63,4	18,1	11,9
Desvio	5,86	0,36	–	5,97	0,29	–
C.V. (%)	8,3	12,6	–	9,4	8,6	–

* *fco* = Valores médios de resistência à compressão.

* *Eco* = Módulos de Elasticidade longitudinal.

Quanto à capacidade de carga à tração, Pereira e Beraldo (2008, p.143) apresentam os seguintes dados em geral, como se vê na Tabela 2.3.6:

Tabela 2.3.6: Tensão de ruptura à tração para o bambu:

Tração – Material simples (ripas)						
	Sem Nó			Com Nó		
Região do colmo	f_{to}^* (MPa)	E_{to}^* (GPa)	Umidade (%)	f_{to}^* (MPa)	E_{to}^* (GPa)	Umidade (%)
Base (n=16)	240,1	20,1	12,0	103,3	16,9	11,9
Meio (n=16)	250,0	20,7	12,0	117,5	18,6	11,9
Topo (n=16)	246,8	20,7	11,9	114,4	19,5	12,0
Colmo	245,4	20,5	12,0	111,9	18,3	11,9
Desvio	22,5	1,7	–	14,5	2,2	–
C.V. (%)	9,2	8,3	–	13,0	12,2	–

* f_{to} = Valores médios de resistência à tração.

* E_{to} = Módulos de Elasticidade longitudinal.

E quanto à capacidade de carga à flexão, Pereira e Beraldo (2008, p.146) mostram os seguintes dados para o bambu, com corpos de prova sem e com nó, como se vê na Tabela 2.3.7:

Tabela 2.3.7: Resistência à flexão para o bambu:

Flexão – Material simples (ripas)						
	Sem Nó			Com Nó		
Região do colmo	MOR^* (MPa)	MOE^* (GPa)	Umidade (%)	MOR^* (MPa)	MOE^* (GPa)	Umidade (%)
Base (n=16)	169,1	15,5	11,9	118,7	12,6	12,0
Meio (n=16)	161,1	16,0	11,9	104,9	12,3	11,9
Topo (n=16)	170,7	15,3	11,9	111,9	12,0	11,9
Colmo	166,9	15,6	11,9	111,8	12,3	11,9
Desvio-padrão	19,7	1,3	–	18,0	1,2	–
C.V. (%)	11,8	8,3	–	16,1	9,4	–

* MOR = Valores médios de Módulo de Ruptura.

* MOE = Módulos de Elasticidade longitudinal.

Para as estruturas de bambu, não é aconselhável o uso de pregos, pois podem rachá-los, sendo normalmente utilizados parafusos inclusive com uso de braçadeiras metálicas quando o bambu começa a apresentar rachaduras, como se observa na Figura 2.3.10, em sistemas longitudinais e amarrações com fibras naturais, sisal, cordas e barbante, enrolados e colados para atar as barras de bambu (Figuras 2.3.11 e 2.3.12).



Figura 2.3.10: Uso de parafusos e braçadeira em estruturas com bambu. (VILLEGAS, 2003, p.133).

Lopez (2003, p.205) apresenta ainda uma série de aplicações estruturais com uso de bambu, como painéis reforçados com armação grades de bambu em grelha; estruturas para pisos elevados (*apud*, p.235); paredes reforçadas ou construídas com grades fechadas de bambu, preenchidas com cimento (*apud*, p.239-245); estruturas para telhado (*apud*, p.246-263); sistemas de casas pré-fabricadas, no Equador, Costa Rica, Colômbia e Peru (*apud*, p.264-283); sistemas de treliças para telhados e coberturas (*apud*, p.299-304); possíveis conexões das barras de bambu utilizando-se de elementos cilíndricos parafusados, chapas de metal e outros formatos (*apud*, p.329-331 e 335-336 e 350); como uso de barras de bambu como colunas na construção de residências e prédios.

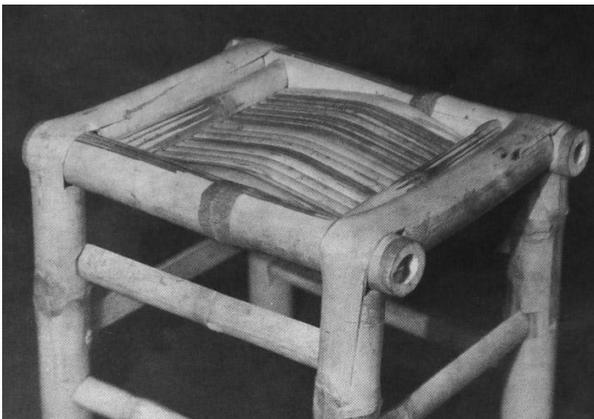


Figura 2.3.11: Uso de amarração com a própria fibra do bambu. (LOPEZ, 2003, p.137).



Figura 2.3.12: Uso de fitas de bambu nas amarrações. (LOPEZ, 2003, p.293).

Lopez (2003, p.377) mostra também outros casos de construções na Colômbia, com arranjos de barras verticais e diagonais, Figura 2.3.13, e sistemas de feixes de bambu para coberturas, como algumas construções de Simon Vélez no Equador (Figuras 2.3.4, 2.3.5 e 2.3.14). Mesmo com os exemplos publicados de uso de barras de bambus e feixes, não há na

literatura experimentos mecânicos para esse design. Outros casos de uso estrutural do bambu são abordados por Lopez (*apud*, p.422-432), como uso aeronáutico, o modelo Demoisele de Santos Dumont em 1909, dirigíveis, e fuselagem de pequenas aeronaves.

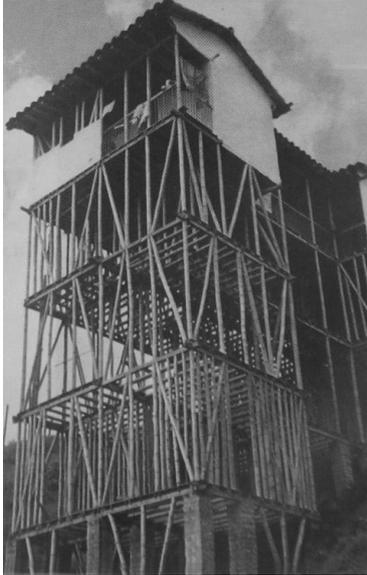


Figura 2.3.13: Pilares de barras de bambu, Colômbia. (LOPEZ, 2003, p.377).



Figura 2.3.14: Feixes de bambu, em coberturas, no Equador. (LOPEZ, 2003, p.386).

Por que se utilizar o bambu natural como elemento estrutural?

As pesquisas do bambu como elemento estrutural foram estimuladas a partir do primeiro Congresso Internacional do Bambu, realizado em Singapura em 1980. Este tempo é relativamente curto em se tratando de uma pesquisa de base científico tecnológica, que partiu praticamente do zero. Até o final da década de 90, o banco de dados relativo às propriedades físicas e mecânicas do material constituinte dos bambus ainda estava se montando, com pesquisas esparsas pelo globo, incluindo não apenas países orientais, principalmente China e Índia, como países da América, como o Brasil, Colômbia, Equador e Costa Rica. Com a aquisição da ideia de que o bambu é um recurso renovável subutilizado, de alta produção de biomassa por hectare, com potencial de desdobramento em diferentes produtos, a cada dia cresce esse banco de dados dos bambus em diferentes áreas do conhecimento (mecânica estrutural, anatomia e micro-estrutura, silvicultura, laminados colados, compósitos, tecidos, papel, cerveja, refrigerantes, entre outros). Contudo, há ainda muitas lacunas a serem preenchidas, visto existirem aproximadamente 1300 espécies de bambus catalogadas.

Por outro lado, a divulgação dos resultados científicos e tecnológicos facilitados pelos meios de comunicação em rede, estimula igualmente a população na utilização do bambu para

os objetos mais imediatos, como móveis, utensílios domésticos e estruturas. Ou seja, as aplicações mais imediatas são aquelas que exigem um mínimo de transformação do material bruto, o bambu em forma tubular. E não poderia deixar de ser diferente, pois se amplia uma visão mais aprofundada do material e elemento estrutural que ele compõe, facilitando seu entendimento, descrição e mesmo a formulação matemática de muitos dos fenômenos capturados de forma global ou macro, incluindo diferentes variáveis em jogo, que são tratadas em princípio, de maneira acoplada, trabalhando-se com as respostas médias.

Nesse sentido, países que já tinham um uso tradicional do bambu na construção, como os países citados acima, à exceção do Brasil, já disponibilizaram uma norma de Projeto e Dimensionamento de Estruturas de Bambu, aqui se considerando o bambu em forma tubular. Ou seja, procedimentos para determinação das propriedades físicas e mecânicas dos materiais, com dimensões de corpos de prova, estão disponíveis na literatura (vide por exemplo as “*Normas Técnicas para la utilización de la Guadua Angustifolia Kunth em la construcción*” do Equador de 2011, “*Proyecto Normativo Diseño y construcción con Bambú*”, do Peru de 2011, e a “*NSR-10 Capítulo G.1 Estructuras de Madera y Estructuras de Guadua*” da Colômbia de 2010). Do mesmo modo, as normas abordam diferentes tipos de conexões para as estruturas, com os respectivos critérios de dimensionamento.

Contudo, antes mesmo que se esgotassem as investigações desses fenômenos mecânicos relativos ao bambu em estado bruto, principalmente a estabilidade dos elementos comprimidos e segurança das conexões, os preceitos industriais já vêm mudando a direção da pesquisa do bambu, que tem dado mais ênfase aos laminados colados e materiais compósitos com fibras de bambu. Torna-se evidente que a indústria visa atendimento a demandas em larga escala, com o maior controle possível do produto, e isso somente é possível se a partir das matérias primas, a técnica cria o material de seu interesse, submetendo os elementos estruturais dele advindos a geometrias controladas e dimensionadas de acordo com as tensões provocadas pelos carregamentos. Indústria remete a normatizações, enquadramentos, gabaritação, produção em série, maquinários pesados, energia elétrica, Taylorização do trabalho, tudo o que o bambu em estado natural contradiz.

Logo, não deve haver dúvidas de que as motivações para se trabalhar o bambu em estado natural não estão imediatamente ligadas aos preceitos industriais, ainda que os produtos industriais estejam presentes nas construções que utilizam o bambu (preservativos para aumento de durabilidade, ignífugos, conexões metálicas, conexões sintéticas, janelas envidraçadas, dentre outros).

Observa-se também que os bambus são barras muito leves, de baixa densidade, $\rho_{ap} = 8$ kN/m³ e normalmente ocos, incomparáveis a qualquer outro elemento estrutural feito com outro material. Por exemplo, um bambu com diâmetro médio de 9 cm e 9 mm de espessura de parede, com 6 metros de comprimento, pesa 11 kgf, com um momento de inércia igual a 190 cm⁴. Essa barra, seja em flexão ou compressão axial, não tem problemas de instabilidade local. Um tubo metálico com 9 cm de diâmetro e 1 mm de espessura de parede e mesmo comprimento pesaria 13,2 kgf. Além de mais pesado, um tubo de aço com essa espessura não teria condições de absorver o mesmo carregamento do bambu, não somente porque o momento de inércia é bem menor, 28 cm⁴, mas principalmente por problemas de instabilidade local se submetido à flexo-compressão.

Comparando-se por outro lado, barras laminadas coladas de bambu com o bambu natural, chega-se também a importantes relações que justificam a pesquisa do bambu natural. Uma barra laminada colada de bambu com 6 cm de largura, como são as dimensões das bitolas de madeira serrada disponíveis no mercado brasileiro em geral, deveria ter uma altura de 7,2 cm para se ter o momento de inércia máximo de 190 cm⁴. Como o terço interno da parede do bambu é bem menos resistente do que os dois terços externos, sendo normalmente desprezada na produção das barras laminadas estruturais, seriam necessários 2,5 a 3 bambus para se produzir a barra, que por sua vez pesaria 2,5 a 3 vezes o peso de um bambu. Ou seja, a mesma barra com 6 metros de comprimento pesaria no mínimo 27,5 kgf, visto que a depender da técnica de prensagem e dos adesivos utilizados, a densidade do material pode ter um aumento considerável. Tudo isto está sendo substituído pela vantagem do maior controle geométrico da barra, melhor desempenho estrutural em termos de propagação de fissuras e resistência das conexões. Assim evitam-se os problemas naturais apresentados pelo bambu tubular, mas sob penalidade de um aumento considerável do consumo de materiais e peso da estrutura.

Uma vez definido o âmbito da pesquisa pela utilização do bambu em estado natural, depara-se com todos os problemas evitados pelo caminho da industrialização. Estruturalmente, depara-se com um primeiro grande inconveniente: - os colmos colhidos de um mesmo bambuzal, ainda que selecionados visualmente segundo alguns princípios: eixo retilíneo, diâmetros aproximadamente iguais e mesma idade, são entidades com geometria totalmente particular. As seções transversais não são círculos perfeitos, a espessura de parede também varia significativamente em uma mesma seção transversal, o eixo não é retilíneo e os centróides das seções transversais descrevem as mais diferentes curvas ao longo do eixo imaginário que une seções extremas, como observa Moreira (1998). Por outro lado, o

diâmetro e a espessura de parede variam da base para o topo de maneira aproximadamente linear, mas com leis independentes, e assim por diante.

A anastomose das fibras dos bambus nos nós faz com que o material nodal tenha menor resistência e rigidez nesses pontos, o que é compensado pelo aumento de espessura de parede. O bambu é um material higroscópico, e as propriedades mecânicas variam muito com o conteúdo de umidade da amostra, assim como acontece com a madeira. Outro parâmetro de igual importância é a idade dos colmos. 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, para bambus da espécie *Phyllostachys pubescens*, utilizada nessa tese.

Por outro lado, tem-se uma grande ausência de resultados experimentais tecnológicos, para comparação dos resultados, principalmente em se tratando do comportamento dos elementos estruturais e conexões. Para estes elementos tem-se sim coletâneas de soluções utilizadas em várias partes do globo, como observa Lopez (2003), mas a maior parte delas está aberta a investigações.

O problema vem se agravando principalmente devido ao apelo industrial de transformar os bambus em laminados colados e em compósitos, que obviamente carregam para essa direção a maior parte dos jovens pesquisadores. Ou seja, as estruturas de bambu ainda não têm uma bibliografia rica disponível em artigos de revistas, e muitas das propostas estruturais acabam sendo sempre originais nestes meios. Assim, há muitas informações esparsas, e principalmente relativas à caracterização do material, mas dificilmente se encontram dois pesquisadores trabalhando um mesmo problema estrutural. Isto é o que se tem constatado no congresso internacional que mais tem difundido a pesquisa dos materiais naturais em todo o globo, *Non Conventional Materials and Sustainable Technologies – NOCMAT*, cujo último encontro (de 14ª edição) ocorreu na cidade de João Pessoa, Paraíba, no ano de 2013.

Contudo, a utilização do bambu tubular em estruturas tem sido uma realidade, no Brasil em pequena escala, e na Colômbia, em maior escala, bem como no Equador, Peru, Costa Rica, Indonésia, Malásia, Vietnam, entre outros, e por todas as razões expostas, os pontos obscuros sobre o bom funcionamento estrutural merecem ainda muitas investigações, com o objetivo de aumentar a gama de possibilidades construtivas do elemento estrutural, dentro dos preceitos de segurança da Engenharia de Estruturas.

2.4 – Plantação do Bambu como incentivo ao Crédito de Carbono

Apelos ecológicos aconteceram nas últimas décadas, deixando legados e tratados refletindo as preocupações sociais quanto à preservação da natureza. Dentre eles, o Tratado de Meio Ambiente Humano, ocorrido em Estocolmo, Suécia, em 1972; a Convenção de Viena, Áustria, em 1985 sobre a camada de Ozônio da atmosfera; a Convenção de Proteção à Biodiversidade, em Montreal, em 1992, ratificada no Brasil em 1994; a Eco-92 que ocorreu no Rio de Janeiro envolvendo 154 nações, as quais compunham a “Cúpula da Terra”. Depois, o Protocolo de Kyoto, originado em 1997 e ratificado em 2002, no Japão, e a Rio+20, ocorrido no Rio de Janeiro, em 2012.

Paralelamente, várias pesquisas apontam um crescente volume de dióxido de carbono (CO₂), emitido e lançado na natureza pelas indústrias, automóveis e queimada de madeira. Silva (2009) orienta que outros gases geradores do efeito estufa, conhecidos pela sigla GEE, há muito tempo são liberados pelas indústrias químicas e de transformação ao redor do planeta, e como consequência direta desse desequilíbrio, também o descongelamento das grandes geleiras e o aumento do nível dos mares, com a invasão da costa litorânea em diversos países. Neste cenário, surge após a assinatura do Protocolo de Kyoto, o mercado de “créditos de carbono”, um certificado que é emitido para as indústrias quando existe uma diminuição comprovada de emissão de gases que provocam o efeito estufa e o aquecimento global do planeta. Essa “produção” de créditos de carbono se dá tanto pela indústria que reduz sua emissão de CO₂ quanto pela produção de biomassa, que em sua composição “sequestra” o CO₂ presente na atmosfera; ou seja: quando se tem uma produção de madeira, em sua formação celular é armazenado o CO₂ durante a realização da fotossíntese. Em termos quantitativos, um crédito de carbono equivale a uma tonelada de CO₂ que deixou de ser produzido seja pela indústria ou pela emissão de veículos, ou que foi armazenado pela biomassa durante o crescimento vegetal. Empresas que conseguem diminuir sua emissão de gases poluentes ou que aumentam sua produção de biomassa obtêm créditos que podem ser vendidos em mercados nacionais ou internacionais, aumentando o valor de suas ações.

O processo para obtenção desse crédito é esclarecido por Silva (2009) que, em termos resumidos, explica que esse processo equivale à empresa possuir um projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), especificando suas atividades, seus participantes e seus métodos de cálculos. Necessitam ter ainda critérios e esclarecimentos sobre o projeto, que satisfaçam os objetivos definidos por autoridade internacional referente à mudança do clima, que após aprovados são levados à apreciação da ONU para posterior registro. Esse plano ou

projeto passa a ser monitorado por uma “Entidade Operacional”, sendo que o êxito na execução do projeto obriga esta “Entidade” a emitir um Certificado de Redução das Emissões (CRE’s), os “créditos de carbono”, a quem de direito, cujo título é negociável no mercado interno ou externo. Essa entidade no Brasil é representada pela “Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima” (CIMGC), presidida pelo Ministério da Ciência e Tecnologia.

O Brasil conta também com um incentivo a mais para o reflorestamento, plantio e manejo de bambu; publicada a Lei Federal 12.484, de 08/09/2011, instituindo a “Política Nacional de Incentivo ao Manejo Sustentado e ao Cultivo do Bambu” (PNMCB), em seus artigos rege (grifos do autor desta tese):

Art. 2º Os incentivos a que se refere o art. 1º desta Lei destinam-se ao manejo sustentado das formações nativas e ao cultivo de bambu voltado para a produção de colmos, para a extração de brotos e obtenção de serviços ambientais, bem como à valorização desse ativo ambiental como instrumento de promoção de desenvolvimento socioeconômico regional.

Art. 3º São diretrizes da PNMCB:

I - a valorização do bambu como produto agro-silvo-cultural capaz de suprir necessidades ecológicas, econômicas, sociais e culturais;

II - o desenvolvimento tecnológico do manejo sustentado, cultivo e das aplicações do bambu;

III - o desenvolvimento de pólos de manejo sustentado, cultivo e de beneficiamento de bambu, em especial nas regiões de maior ocorrência de estoques naturais do vegetal, em regiões cuja produção agrícola baseia-se em unidades familiares de produção e no entorno de centros geradores de tecnologias aplicáveis ao produto.

(...)

Art. 5º Na implementação da política de que trata esta Lei, compete aos órgãos competentes:

I - incentivar a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico voltados para o manejo sustentado, o cultivo, os serviços ambientais e as aplicações dos produtos e subprodutos do bambu;

Silva (2009) comenta que em 2006, o número de MDL brasileiro registrado na ONU era de 45 projetos, e em 2009 passou dos 270 projetos, com previsão naquele ano de captação de 276 milhões de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) ou seu equivalente em outros gases de efeito estufa até o final de 2012. O autor apresenta ainda que no mercado de 2009, cada tonelada correspondida a um crédito de carbono estava cotada em torno de 16 Euros (cerca de R\$ 42,00). Ele mostra que a atividade que mais investe na produção limpa é a de geração de energia, com 169 projetos registrados, e que no ano de 2006, o Brasil fechou um dos maiores contratos de créditos de carbono já gerado pela Organização das Nações Unidas: numa operação entre a Biogás, sócia da Prefeitura de São Paulo no Aterro Bandeirantes, e o banco alemão KfW. O Aterro Bandeirantes, um dos maiores projetos em geração de energia elétrica

a partir do lixo do mundo, vendeu para o KFW o equivalente a 1 milhão de toneladas de crédito de carbono. No total, o projeto previa gerar 8 milhões de toneladas de crédito de carbono até 2012, para posteriormente serem negociadas. Este aterro recebe metade do lixo de São Paulo, ou 80 mil toneladas diárias, e utiliza o metano liberado para gerar energia elétrica (22 megawatts).

Silva (2009) faz também um resumo desse mercado milionário que está em plena expansão: as transações em 2004 foram de 377 milhões de Euros; já em 2005, houve um salto para 9,4 bilhões de Euros e conforme dados do Banco Mundial, em 2011 as transações foram da ordem de 176 bilhões de Dólares (cerca de 143 bilhões de Euros). Quanto ao Brasil, em 2008 já possuíamos 61 empresas com créditos emitidos, totalizando 11,3 milhões de toneladas de CO₂ que deixaram de ir para a atmosfera. Esses créditos produziram uma receita equivalente a 90,4 milhões de Euros.

Para gerar os carboidratos presente nas células, os vegetais utilizam o carbono através da sua fotossíntese, retirado da atmosfera, liberando O₂ para a atmosfera. Trigo (2012) avalia que, como o bambu tem um ciclo de crescimento muito rápido, sendo uma planta que contém uma das maiores taxa de crescimento da Terra e assim uma das espécies que absorvem mais CO₂ da atmosfera, é então considerado um excelente sequestrador de carbono.

Dentre outras vantagens quanto à sua produção, o bambu apresenta ainda:

- ✓ Não utilizar agrotóxicos em nenhuma fase de sua produção não poluindo o ambiente;
- ✓ Trata-se de uma matéria prima renovável, onde sua produção permite alta renovação do ar por ser um material que possui dez vezes mais biomassa, e produz 20% a mais de oxigênio em sua fotossíntese se comparado com madeiras em geral;
- ✓ Seu manejo não apresenta destruição das matas;
- ✓ Pode ser plantado próximo ao local onde vai ser utilizado.

Como se trata de uma matéria prima de fácil e rentável produção, esta atividade também tem sido observada como atividade ambiental e socialmente sustentável, visto que a própria comunidade local pode administrar a produção da matéria prima, aproveitando recursos e vantagens que a mesma pode oferecer.

2.5 - Interação Design & Engenharia

Inserido no Grupamento B do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Estruturas, a tese aqui apresentada faz uma interação entre as áreas de Design e Engenharia, no que se refere a alguns aspectos a serem pontuados e considerados. Vê-se que o design é hoje uma poderosa ferramenta de desenvolvimento e inovação tecnológica, que trabalha com o reconhecimento de referências locais na inserção do produto brasileiro no cenário internacional. Como suporte desse processo, o Programa Brasileiro de Design (PBD), promovido pelo Governo Federal desde 1995, tem focado na promoção de atividades e eventos de divulgação, educação à sociedade e suporte às empresas para a viabilização desta ferramenta.

Diversos aspectos podem ser listados, dada a importância do design aplicado a toda empresa, como possível agente de transformação social, como por exemplo:

- ✓ Aumento do valor agregado ao produto desenvolvido;
- ✓ Melhorias no processo produtivo empresarial;
- ✓ Identificação de materiais regionais e suas possibilidades de aplicação;
- ✓ Adequação ao padrão de qualidade exigido pelos mercados interno e externo;
- ✓ Identificação de novos mercados e possíveis aplicações do design na concepção formal dos produtos.

Neste âmbito, o papel do designer é de fundamental importância para agregar os aspectos apresentados, trabalhando na premissa do design em parceria efetiva com a engenharia, voltados para o meio ambiente. Essa premissa é conceituada entre outros autores, por Souza (2006) como *Design for Environment* (DfE). Assim, é de se esperar que esse profissional possa:

- ✓ Traduzir por meio dos projetos, os anseios da economia, do meio ambiente e do desenvolvimento social;
- ✓ Prever racionamento de recursos materiais, e uso racional da biodiversidade, conhecendo o ecossistema local;
- ✓ Reduzir riscos e acidentes ambientais;
- ✓ Incentivar e disseminar iniciativas de gestão ambiental, inserindo nas empresas conhecimento e estímulo quanto à preocupação ecológica;

- ✓ Trabalhar com parâmetros e critérios de desenvolvimento que visem à sustentabilidade.

Nessa sua atividade de conceber projetos, o designer investiga, descobre, conceitua e utiliza informações nas várias atividades dentro do processo, de acordo com cada etapa projetiva. Löbach (2001), Manzini e Vezzoli (2002), Strunck (2001), Souza (2006) dentre outros autores da área do design projetivo apontam uma série de itens que a atividade projetiva precisa analisar, entre eles:

- ✓ Identificação do grupo de usuário e suas características e necessidades básicas e secundárias;
- ✓ Circunstância de utilização (quando usa, onde usa, como usa);
- ✓ Ergonomia do produto e do ambiente onde se encontra;
- ✓ Caracterização das funções do produto;
- ✓ Questões econômicas e sociais relacionadas;
- ✓ Estilo de produto, representação simbólica, qualidade subjetiva desejada;
- ✓ Informações sensoriais necessárias à interface produto-usuário;
- ✓ Emoção que o produto transmite ao interagir com o usuário;
- ✓ Orientação de uso (e pós-uso) para novos mercados;
- ✓ Adaptações necessárias dos produtos a situações locais ou globalizadas.

Assim, neste contexto histórico de preocupações ecológicas e normas exigidas por instituições no mundo todo na busca de conservação e não degradação, já é de consenso que, para um empreendimento humano ser considerado sustentável, quatro regras básicas são necessárias: precisa ser ecologicamente correto, economicamente viável, socialmente justo e culturalmente aceito pela sociedade, garantindo sua permanência junto ao mercado. Para tanto, o designer desenvolve algumas estratégias como ferramental de trabalho, como a interdisciplinaridade, associando-se a outras áreas do conhecimento, em especial a Engenharia de Estruturas, que nos fornece resultados de análises de estados limites, de carregamentos críticos e condições de uso em segurança, todo o suporte técnico do que se propõe enquanto produto eficiente.

Outra estratégia compete ao trabalho em rede com empresas e associações de modo a estar atualizado quanto a tecnologias e oportunidades. Deste modo, o designer pode dispor e

incorporar os conhecimentos apreendidos em seu dia-a-dia, administrando o processo enquanto gestor das atividades, com uma visão prospectiva do mercado, analisando a situação do antes e do depois do lançamento de produtos e empreendimentos no mercado. Daí que seu processo mental deve exigir sempre questões abrangentes, como por exemplo: em quê seu projeto contribui para o desenvolvimento sustentável local? Como inserir valor agregado ao projeto, de modo que ele possa ser referência no mercado? Como atingir o mercado, seja ele local ou internacional, com o ferramental e recursos técnicos e de pessoal que se possui? Observa-se aí uma busca por excelência.

Savi, Gonçalves Filho e Savi (2006) mostram que o design é orientado a vários segmentos e necessidades, conforme o caso, denominado *Design for Excellence*, que gerou a sigla DfX, onde o “X” é uma característica “X” que precisa ser maximizada. Assim, pode-se ter um *Design for Assembly*, DfA, voltado às preocupações quanto à montagem do produto; pode-se ter um *Design for Compliance*, DfC, buscando conformidade com as normas de manufatura e de uso; um *Design for Environment*, DfE, como foi visto, preocupações ambientais desde sua fabricação até seu descarte; um *Design for Manufacturability*, DfM, integrando o design com a processabilidade da manufatura; um *Design for Serviceability*, DfS, design voltado à facilidade de instalação, reparo e modificação em campo ou durante o uso do produto, dentre outros.

Nesta tese, da análise estrutural resultará todo um design enquanto arranjo dos elementos constituintes e das barras de bambu, de forma a melhor distribuírem os esforços solicitantes, evitando-se instabilidades dos elementos comprimidos e concentração excessiva de tensões nas conexões dos elementos, exigindo detalhes específicos conforme o efeito localizado, estabelecendo estados limites últimos e estados limites de serviço.

2.6 – Flambagem de Colunas

Como referência para análise dos ensaios apresentados no Capítulo 4, toma-se as obras de Timoshenko e Gere (1963) e Chajes (1974) sobre carga crítica de coluna de Euler, condições de contorno da coluna analisada, tamanho efetivo, comportamento de colunas com imperfeições iniciais e configuração da curva de flambagem e suas equações para cada caso.

O matemático suíço Leonhardt Euler (séc.XVIII) investigou equilíbrio de coluna comprimida na posição deformada com deslocamentos laterais. O resultado obtido para coluna idealmente perfeita é válido para as seguintes condições:

- coluna isenta de imperfeições geométricas e tensões residuais

- material elástico-linear
- carga perfeitamente centrada

Outros autores como Chajes (1974), Timoshenko e Gere (1963), Shames (1983), e Silva Jr (1974) demonstram deduções a partir de Euler e algumas deduções para colunas com alguma imperfeição inicial, e apresentam suas consequências para estruturas treliçadas, vigas, colunas, pórticos, dentre outras aqui sintetizadas.

Quanto às condições de contorno, Timoshenko e Gere (1963) e Chajes (1974) apresentam tipos de apoios, e suas respectivas equações para cálculo da carga crítica, como se pode observar também em Hibbeler (2004) e Shames (1983). A carga crítica não deve permitir que a tensão na coluna exceda o limite de proporcionalidade (comportamento elástico do material). Na Figura 2.6.1 observa-se o esquema de uma coluna birrotulada sob efeito de carregamento da força P :

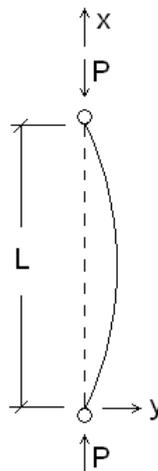


Figura 2.6.1: Coluna de Euler, com apoios birrotulados.

Para esta coluna, a equação para cálculo da carga crítica, após as deduções, é dada por:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (2.1)$$

onde:

P_{cr} = carga crítica ou carga axial máxima na coluna imediatamente antes da flambagem.

E = módulo de elasticidade do material

I = o menor momento de inércia da área da seção transversal.

L = comprimento da coluna sem apoio, cujas extremidades são apoiadas neste caso por pinos.

Quanto à compressão pela carga aplicada, surgem os deslocamentos laterais em relação ao eixo principal da coluna. Esses deslocamentos compõem o processo conhecido por *flambagem por flexão* que, em geral, reduz a capacidade de carga da peça originalmente construída. Em casos de colunas engastadas numa extremidade, Timoshenko e Gere (1963) apresentam:

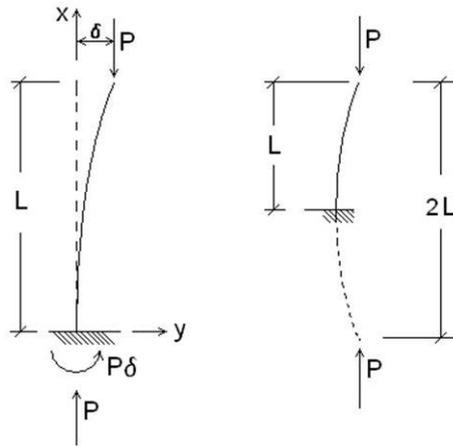


Figura 2.6.2: Flexão em coluna apoiada em apenas uma extremidade.

cuja equação para cálculo da carga crítica é dada por:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4L^2} \quad (2.2)$$

Para casos de colunas com extremidades engastadas ou fixas, Timoshenko e Gere (1963) indicam dois pontos de inflexão (pontos 1 e 2) e apresentam que existe a dimensão $l/2$ (parte central) que é equivalente à Coluna de Euler (Figura 2.6.3):

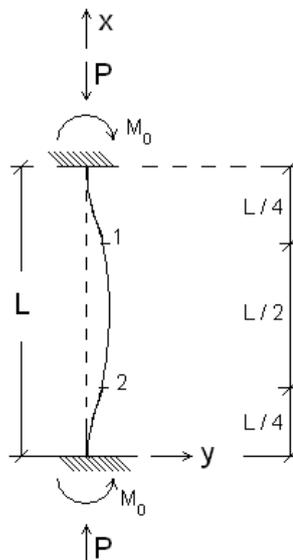
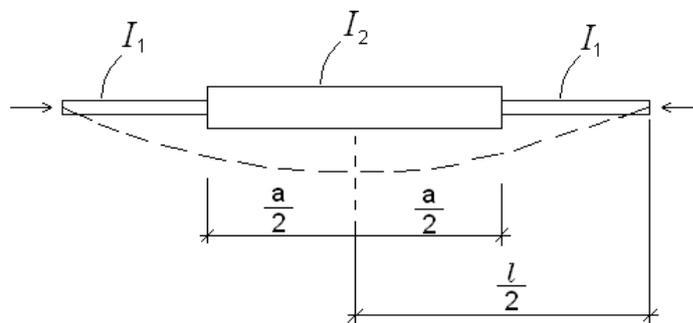


Figura 2.6.3: Flexão em coluna com apoio fixo nas duas extremidades.

Neste caso, a equação para cálculo da carga crítica é dada por:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{\left(\frac{l}{2}\right)^2} \quad (2.3)$$

Para colunas com seções diferentes, Timoshenko e Gere (1963) tratam da questão em que I_1 seja o momento de inércia da seção transversal da parte superior e inferior da coluna (as extremidades da coluna), e I_2 seja o momento de inércia da parte central, conforme Figura 2.6.4:



Figuras 2.6.4: Flexão em colunas de seções diferenciadas, e localização dos momentos de inércia I_1 e I_2 .

Timoshenko e Gere (1963) resolvem também o sistema de equações diferenciais para uma coluna de seções distintas com apoio fixo em uma extremidade e livre na outra, como se observa na Figura 2.6.5:

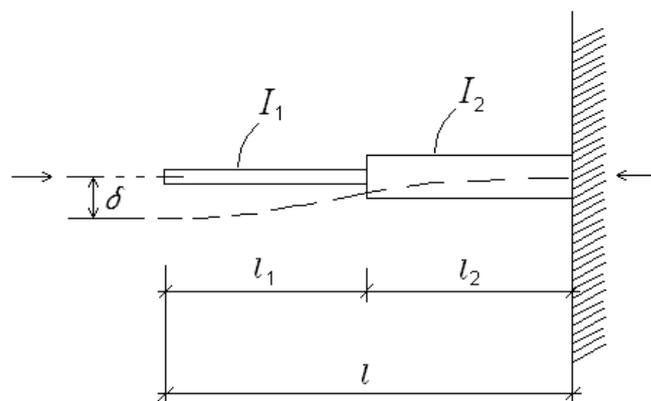


Figura 2.6.5: Esquema de coluna engastada apenas numa extremidade.

Para este caso, a equação é dada por:

$$tgk_1(l-l_2)tgk_2l_2 = \frac{k_1}{k_2} \quad (2.4)$$

$$\text{Onde: } k_1 = \sqrt{\frac{P}{EI_1}} \text{ e } k_2 = \sqrt{\frac{P}{EI_2}} \quad (2.5)$$

Estes autores apontam que conhecendo os valores de I_1 / I_2 e l_1 / l_2 , a solução pode ser encontrada pelo método de tentativa e erro.

Fazendo-se $l_2 = \frac{a}{2}$ e $l = \frac{l}{2}$, os resultados obtidos pela equação 2.4 podem ser aplicados à coluna da Figura 2.6.4.

O valor crítico da equação 2.4 pode ser representado por:

$$P_{cr} = \frac{mEI_2}{l^2} \quad (2.6)$$

Onde m é um fator numérico dependente de $\frac{a}{l}$ e $\frac{I_1}{I_2}$

Alguns valores do fator m são mostrados por Timoshenko e Gere (1963, p.115), como vemos na Tabela 2.6.1:

Tabela 2.6.1: Valores para o Fator m . utilizado na equação 2.6:

$\frac{a/l}{I_1/I_2}$	0,2	0,4	0,6	0,8
0,01	0,15	0,27	0,60	2,26
0,1	1,47	2,40	4,50	8,59
0,2	2,80	4,22	6,69	9,33
0,4	5,09	6,68	8,51	9,67
0,6	6,98	8,19	9,24	9,78
0,8	8,55	9,18	9,63	9,84

Chajes (1974, p.35) apresenta algumas considerações quanto à carga aplicada em colunas inicialmente imperfeitas, que começa a fletir assim que a carga é aplicada, onde a curvatura permanece relativamente insignificante até que a carga se aproxima da carga de Euler, e que a flexão, em seguida, aumenta muito rapidamente. A partir desta observação, ele comenta que:

- a) a teoria de Euler, que é baseada no conceito fictício de uma peça perfeita, fornece um critério de projeto satisfatório para colunas imperfeitas reais, desde que as imperfeições sejam relativamente pequenas. A carga de Euler é, portanto, uma boa aproximação da carga máxima que uma coluna imperfeita real pode suportar sem fletir excessivamente;
- b) os resultados apresentados formam a base de um método útil de análise de estabilidade. A carga crítica foi determinada exclusivamente por encontrar a carga para a qual um sistema perfeito pode estar em equilíbrio em uma configuração ligeiramente fletida, ou seja, a carga para a qual o equilíbrio neutro é possível.
- c) o comportamento de um sistema imperfeito pode ser simulado. A diferença essencial entre um elemento perfeito e um imperfeito em compressão é que o primeiro deve ser perturbado para produzir flexão, enquanto que a flexão está presente no elemento imperfeito como uma consequência direta da carga aplicada.

COLUNAS CURVAS

Supondo-se que o material obedece a lei de Hooke a pequenas deformações. Considerando uma coluna birrotulada, como se observa na Figura 2.6.6, cujo eixo centroidal é inicialmente curvo, seja a deformada inicial da barra dada por y_0 e a deformação adicional devida à flexão dada por y .

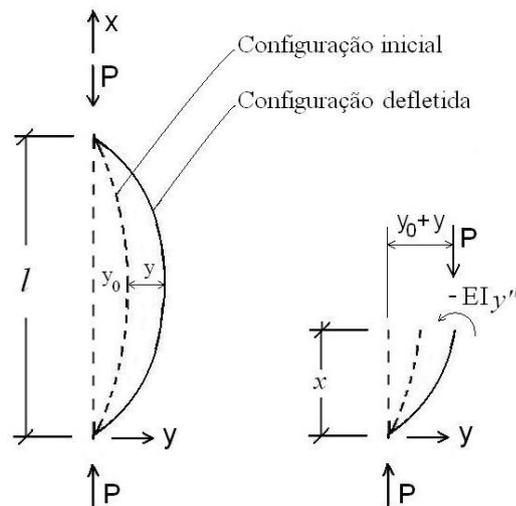


Figura 2.6.6: Coluna birrotulada inicialmente deformada.

A solução do problema pode ser simplificada, sem prejuízos à generalidade dos resultados, se a deformada inicial é suposta ser da forma

$$y_0 = \delta_0 \operatorname{sen} \frac{\pi x}{l} \quad (2.7)$$

Desde que as deformações de flexão são causadas pelas mudanças de curvatura, y'' , e não pela curvatura total, $y_0'' + y''$, o momento interno resistente em qualquer seção é

$$M_x = -EIy'' \quad (2.8)$$

Igualando-se este momento ao momento fletor externo, $P(y + y_0)$, tem-se

$$EIy'' + P(y_0 + y) = 0 \quad (2.9)$$

E substituindo-se a equação 2.7 na equação 2.9, e fazendo-se $k^2 = P/EI$, obtém-se

$$y'' + k^2 y = -k^2 \delta_0 \operatorname{sen} \frac{\pi x}{l} \quad (2.10)$$

A solução da equação 2.10 consiste de uma função complementar e uma função particular. Assim

$$y = y_c + y_p$$

A função complementar é em geral uma solução de uma equação homogênea obtida fazendo-se o lado esquerdo da equação 2.10 igual a zero. Ou seja

$$y_c = A \operatorname{sen} kx + B \operatorname{cos} kx \quad (2.11)$$

A função particular é qualquer função da equação não homogênea completa. Quando o lado direito da equação consiste de uma função seno ou cosseno, a função particular tem a forma

$$y_p = C \operatorname{sen} \frac{\pi x}{l} + D \operatorname{cos} \frac{\pi x}{l} \quad (2.12)$$

Substituindo-se a equação 2.12 na equação 2.10, e combinando os termos, tem-se

$$\left[C \left(k^2 - \frac{\pi^2}{l^2} \right) + k^2 a \right] \operatorname{sen} \frac{\pi x}{l} + \left[D \left(k^2 - \frac{\pi^2}{l^2} \right) \right] \operatorname{cos} \frac{\pi x}{l} = 0 \quad (2.13)$$

Essa equação somente se anula para qualquer valor de x se ambos os coeficientes dos termos seno e cosseno são feitos iguais e então

$$C = \frac{a}{\left(\frac{\pi^2}{k^2 l^2} \right) - 1} \quad (2.14)$$

E tendo $D = 0$ ou $k^2 = \pi^2 / l^2$

Se se faz $k^2 = \pi^2 / l^2$, a solução para y torna-se limitada a $P = \pi^2 EI / l^2$

Este não é o caso a ser investigado e portanto D deve se anular. Então $D = 0$.

Introduzindo a notação

$$\delta_0 = \frac{P}{P_E}$$

Onde $F_E = \pi^2 EI / l^2$, a expressão para C pode ser reescrita na forma

$$C = \frac{\delta_0}{\left(\frac{1}{a} \right) - 1} = \frac{\delta_0 a}{1 - a} \quad (2.15)$$

Consequentemente

$$y_p = \frac{\delta_0 a}{1-a} \operatorname{sen} \frac{\pi x}{l} \quad (2.16)$$

e

$$y = A \operatorname{sen} kx + B \cos kx + \frac{a}{1-a} \delta_0 \operatorname{sen} \frac{\pi x}{l} \quad (2.17)$$

As constantes arbitrárias na equação 2.17 são avaliadas das condições de contorno.

A condição $y = 0$ e $x = 0$ conduz a $B = 0$

e da condição $y = 0$ e $x = l$ se obtém $0 = A \operatorname{sen} kl$

Assim, A ou $\operatorname{sen} kl$ devem se anular. Fazendo-se $\operatorname{sen} kl = 0$ novamente limita a solução de y para $P = F_E$. Como antes, isto é, indesejável e consequentemente $A = 0$

Substituindo $A = 0$ e $B = 0$ na equação 2.17, conduz a deflexão

$$y = \frac{\alpha}{1-\alpha} \delta_0 \operatorname{sen} \frac{\pi x}{l} \quad (2.18)$$

A deflexão total da vertical é obtida somando esta expressão à deflexão inicial. Assim

$$y_T = y_0 + y = \left(1 + \frac{a}{1-a}\right) \delta_0 \operatorname{sen} \frac{\pi x}{l}$$

$$y_T = \frac{\delta_0}{1-a} \operatorname{sen} \frac{\pi x}{l} \quad (2.19)$$

A deflexão total no meio é

$$\delta = \frac{\delta_0}{1-a} = \frac{\delta_0}{1 - \frac{P}{F_E}} \quad (2.20)$$

DIAGRAMA DE SOUTHWELL

Partindo-se da Equação 2.19 para $x = l/2$ e substituindo-se $\alpha = P/F_E$, pode-se escrever

$$\delta_m = \frac{\delta_0}{\left(\frac{F_E}{P} - 1\right)} \quad (2.21)$$

onde δ_m é o deslocamento medido no centro da barra, em função da força de compressão P . Multiplicando-se os dois lados pelo denominador do lado direito, tem-se

$$\delta_m \frac{F_E}{P} - \delta_m = \delta_0 \quad (2.22)$$

Dividindo-se a equação 2.22 por F_E e rearranjando-se os termos, tem-se

$$\frac{\delta_m}{P} = \frac{\delta_m}{F_E} + \frac{\delta_0}{F_E} \quad (2.23)$$

Fazendo-se $\delta_m/P = y$ e $\delta_m = x$ e substituindo-se na equação 2.23, tem-se a reta

$$y = \frac{x}{F_E} + \frac{\delta_0}{F_E} \quad (2.24)$$

Ou seja, da equação 2.24, o inverso da inclinação da reta é a carga de Euler da coluna (limite de carga do sistema), e a reta cruza o eixo x para $y = 0$, obtendo-se $x = -\delta_0$. Tem-se neste ponto, portanto, que a imperfeição inicial do sistema $\delta_0 = |x|$

Essa transformação da equação 2.21, conhecida como Diagrama de Southwell, é uma poderosa técnica para o estudo experimental da flambagem de elementos inicialmente curvos e será a chave para a análise mecânica de todos os experimentos de flambagem realizados nesta tese. Este diagrama foi a técnica que permitiu o acompanhamento de todos os experimentos e o ajuste exato da modelagem numérica a cada um deles, e com as quais se pode propor a generalização dos resultados, seja através de tabelas – mastro de parafusos –, seja através da utilização das equações diferenciais – mastro de feixe. Por este diagrama, gerado pelo eixo x sendo o deslocamento medido durante o ensaio de compressão, e pelo eixo y , sendo o coeficiente entre o deslocamento medido e a carga aplicada naquele instante, tem-se uma reta.

3

MATERIAL E MÉTODOS

3.1 – Introdução

Nesse capítulo são apresentadas as técnicas e procedimentos necessários para a construção dos protótipos dos mastros e posteriormente a realização dos ensaios à compressão, bem como o sistema de aplicação de cargas e elementos auxiliares aos ensaios. É apresentado também o projeto dos experimentos. O capítulo está organizado em três partes: Processos construtivos, Projeto do experimento, e Aquisição de dados.

3.2 – Processos construtivos

Nessa sessão, apresentam-se as etapas e elementos que fizeram parte dos processos de fabricação dos mastros híbridos, do mastro composto e dos mastros de feixe, sendo: gabaritos, perfuração das barras, desenvolvimento dos aparelhos de apoio, cabos de aço, barras roscadas, cinta metálica e finalmente, acessórios.

3.2.1 – Gabaritos

Para um correto manuseio das barras de bambu, quanto ao processo de corte, furos e montagem, foram organizados gabaritos necessários para tal procedimento. Esses gabaritos foram planejados e executados no Laboratório de Análise Experimental de Estruturas da Escola de Engenharia da UFMG (LAEES / EE–UFMG), utilizando-se de ripas de madeiras, sargentos, cantoneiras, cordas, travas e parafusos, objetivando imobilizar as barras de bambu, para serem processadas (cortadas ou perfuradas), conforme o tipo de mastro.

Para os mastros híbridos, durante a confecção das cruzetas, pode-se observar na Figura 3.2.1.1 o esquema de fixação de duas barras, facilitando o processo de furos e de inserção dos parafusos.



Figura 3.2.1.1: Gabarito para furo de barras de bambu.

Sabe-se que as barras de bambu apresentam imperfeições iniciais em sua extensão, e que quando perfuradas individualmente, ao se tentar colocar parafusos para fixação de duas ou mais barras, dificilmente se obtém coincidência de furos em lados opostos da mesma barra ou entre barras diferentes; apenas alguns milímetros desse desvio impossibilitam a inserção dos parafusos. Assim, na construção dos mastros híbridos e do mastro composto, optou-se por utilizar esses gabaritos imobilizando as barras. Os furos aconteceram simultaneamente em duas ou três barras de bambu, e no instante de retirada da broca já foram inseridos os parafusos, travando as barras de bambu no local desejado e assegurando um trabalho eficaz de construção.

No caso do mastro composto, os gabaritos utilizados foram cantoneiras metálicas empregadas normalmente em fixação de prateleiras em paredes, de modo que as barras de bambu ficassem imobilizadas, também com o auxílio de algumas cordas nessa fixação. Assim, os furos puderam ser realizados na direção vertical, perfurando três barras simultaneamente, e com o mesmo esquema anteriormente realizado na construção dos mastros híbridos: à medida que os furos foram acontecendo, imediatamente após a retirada da broca, os parafusos foram inseridos, fixando-se as barras de bambu no local conforme previsto no pré-dimensionamento.

Na Figura 3.2.1.2 pode-se observar o esquema descrito, com cantoneiras metálicas e corda para fixação das barras a serem perfuradas.



Figura 3.2.1.2: Gabarito para construção do mastro de parafusos.

Para o caso dos mastros de feixe, o esquema de gabarito foi mais simples, pois apenas a amarração das seis barras de coroamento em torno da barra central foi o suficiente para organizar as barras, de modo que as cintas metálicas foram sendo aplicadas nos pontos previamente definidos.

Na figura 3.2.1.3 observa-se o conjunto do mastro de feixe amarrado com cordas e o processo de colocação das cintas metálicas com a máquina de cintamento.



Figura 3.2.1.3: Amarração para construção do mastro de feixe.

3.2.2 – Perfuração das barras

O processo de perfuração das barras ocorreu com uma furadeira simples, Marca Makita, Modelo HP1500 550w. Para facilitar o trabalho, inicialmente os furos foram realizados com brocas mais finas, de 8 mm e 12,7 mm de diâmetro e posteriormente foram utilizadas as brocas de 16 mm que é o diâmetro das barras roscadas utilizadas. Na Figura 3.2.2.1, observa-se o esquema de furação das barras de bambu.



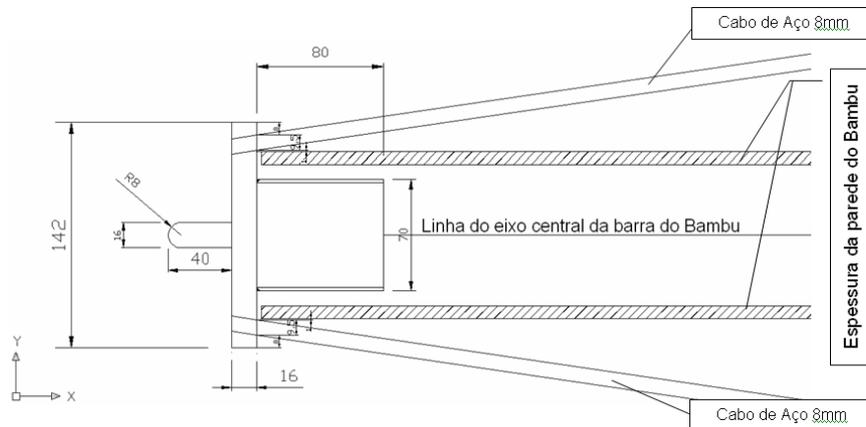
Figura 3.2.2.1: Esquema de furação das barras de bambu.

3.2.3 – Desenvolvimento dos aparelhos de apoio

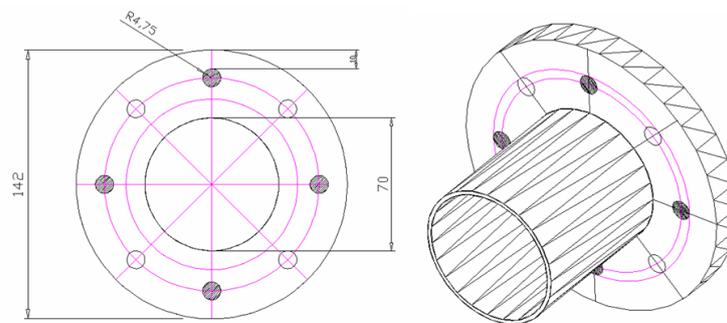
Para o mastro híbrido, foi necessário um projeto de um aparelho de apoio (na forma de uma “ponteira”). Essa peça foi utilizada para fixação dos cabos de aço nas extremidades da barra central do mastro. Tratou-se de um elemento com um pino de ponta arredondada que funcionou como uma rótula. O aparelho de apoio foi desenvolvido observando-se o design para tal funcionamento e trabalhando-se as dimensões necessárias para o correto encaixe nas extremidades do bambu. Ele possui os furos a 8° em relação ao eixo longitudinal do mastro, onde foram fixos os cabos de aço.

O aparelho de apoio foi usinado por empresa terceirizada em aço galvanizado SAE 1045. No pino dessa ponteira foi aplicada a carga de compressão no protótipo do mastro, instalado no pórtico de reação. A Figura 3.2.3.1 apresenta o projeto do aparelho de apoio, mostrando seu esquema de encaixe na barra de bambu, os cabos de aço em ângulo lateral na

montagem, e o desenho com vistas lateral, frontal e em perspectiva, para melhor entendimento.



Vista lateral



Vista frontal e perspectiva

Figura 3.2.3.1: Projeto do aparelho de apoio.

As Figuras 3.2.3.2 e 3.2.3.3 mostram a simulação de encaixe e fixação com uso de software para a peça em uso. A Figura 3.2.3.4 mostra a foto do aparelho de apoio usinado pronto para o uso.

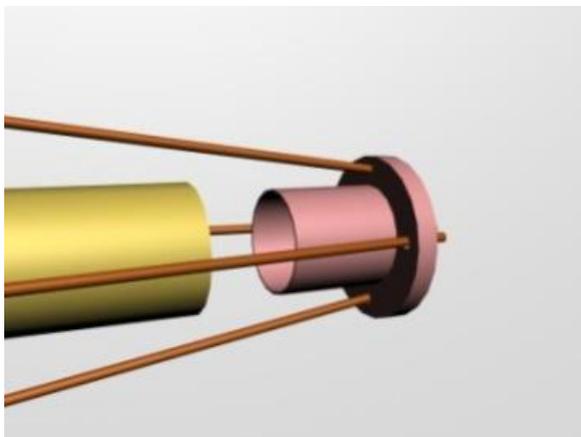


Figura 3.2.3.2: Simulação de encaixe da ponteira com software AUTOCAD.

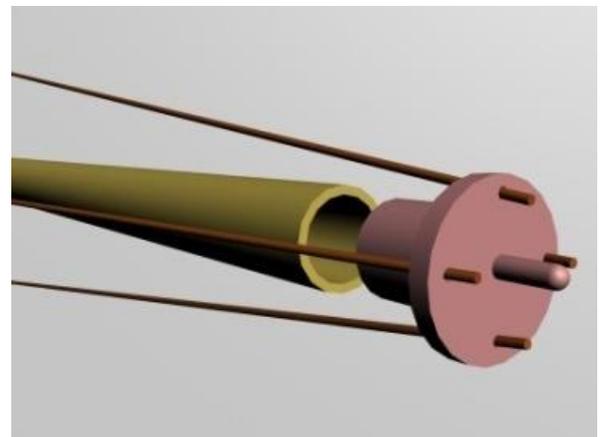


Figura 3.2.3.3: Simulação de fixação da ponteira com software AUTOCAD.



Figura 3.2.3.4: Aparelho de apoio usinado, com acessórios de fixação dos cabos de aço.

Para a instalação dos cabos de aço, foi necessária a instalação de sapatilhas para a perfeita curva dos cabos, e assim, o ponto de fixação dos cabos, nas duas extremidades do bambu é de 36 mm a partir da superfície de apoio das peças da extremidade. A Figura 3.2.3.5 mostra o paquímetro para realização desta medida.



Figura 3.2.3.5: Distância entre pontos de fixação dos cabos e a extremidade da barra de bambu.

3.2.4 – Cabos de aço

Os cabos de aço utilizados na confecção do protótipo do mastro (Figura 3.2.4.1) foi o cabo de aço 6 x 19. Seus dados técnicos conforme fabricante (CIMAF, 2009, p.25 e 60) são:

Diâmetro = 8,0 mm (5/16")

Massa unitária aproximada = 0,244 kgf/m

Força de ruptura mínima efetiva = 3,9 tf

Módulo de Elasticidade = de 85 a 95 GPa

Densidade do Aço = 7850 kgf/m³

Quanto à quantidade de cabos utilizados na construção do protótipo do mastro, tem-se: para o primeiro mastro híbrido foram utilizados quatro cabos de aço de 674 cm cada um, totalizando 27,0 metros de cabo. Com uma massa de 0,25 kgf/m, a massa total dos cabos utilizados é de 6,75 kgf. Para o segundo mastro híbrido, também foram utilizados quatro cabos de aço de 690 cm cada um, totalizando 27,6 metros de cabo e massa total de 6,90 kgf.



Figura 3.2.4.1: Cabo de aço utilizado nos protótipos dos mastros híbridos.

3.2.5 – Barras roscadas

As barras roscadas (Figura 3.2.5.1) possuem diâmetro de 15,60 mm. Elas foram cortadas nas dimensões necessárias para a fixação das barras de bambu, com auxílio de serra de arco comum. Cada metro de barra rosqueada pesa 1,2 kgf. Para cada cruzeta do mastro híbrido foram utilizados 248 cm de barra rosqueada, o que equivale a 2,9 kgf.

Para o mastro de parafusos, foram utilizadas 16 barras roscadas com média de 32 cm cada, sendo 4 barras em cada espaçador interno. No total para este mastro, calculou-se 6,0 kgf de aço.

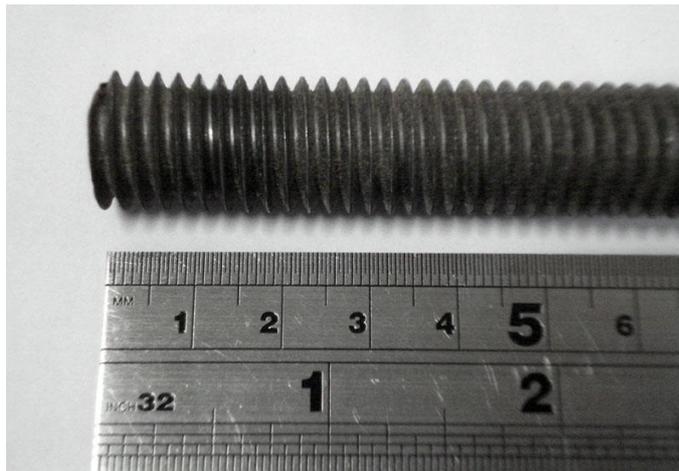


Figura 3.2.5.1: Barra roscada utilizada na construção dos protótipos dos mastros.

3.2.6 – Cinta metálica

Para o mastro de feixe, foram utilizadas cintas de aço inoxidável com seção de 19 mm de largura por 0,75 mm de espessura, (Figura 3.2.6.1) e peso aproximado de 98 gf/m. As barras de coroamento do mastro foram contornadas pela cinta metálica, a qual foi apertada e cortada pela máquina de cintar (Figura 3.2.6.2). O processo foi finalizado com a aplicação do clip (Figura 3.2.6.3) que trava a cinta metálica, impedindo-a de retornar (folgar), deixando-se então as barras fixas.



Figura 3.2.6.1: Cinta metálica.



Figura 3.2.6.2: Máquina de cintamento.



Figura 3.2.6.3: Clip de travamento da cinta metálica.

3.2.7 – Acessórios: porcas, arruelas, sapatilhas, presilhas, braçadeiras e tensionadores

Conhecendo-se os diversos acessórios utilizados na confecção dos protótipos dos mastros, observou-se a massa em kgf de cada elemento com uma balança de precisão para uso na modelagem numérica do mastro. Na sequência, observam-se os acessórios e suas características.

A Figura 3.2.7.1 mostra imagem das porcas utilizadas. Cada uma delas tem 32,2 gf. Foram utilizadas 72 porcas nas duas cruzetas do mastro híbrido, totalizando = 2,32 kgf. Para o mastro composto, foram utilizadas 32 porcas, totalizando 1,03 kgf.



Figura 3.2.7.1: Porcas utilizadas na montagem dos protótipos dos mastros.

A Figura 3.2.7.2 apresenta imagem das arruelas utilizadas. Cada uma delas tem 19,9 gf. Foram utilizadas 56 arruelas nas duas cruzetas do mastro híbrido, totalizando = 1,1 kgf. Para o mastro composto, foram utilizadas 32 arruelas, totalizando 0,64 kgf.

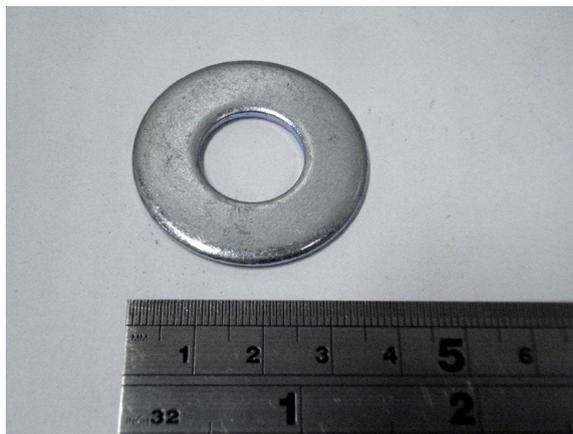


Figura 3.2.7.2: Arruelas utilizadas na montagem dos protótipos dos mastros.

A Figura 3.2.7.3 mostra imagem das sapatilhas utilizadas. Cada uma delas tem 27,1 gf. Foram utilizadas 20 sapatilhas nas duas cruzetas do mastro híbrido, totalizando = 0,54 kgf.



Figura 3.2.7.3: Sapatilhas utilizadas na montagem dos protótipos dos mastros.

A Figura 3.2.7.4 apresenta imagem das presilhas utilizadas para fixação dos cabos de aço. Cada uma delas tem 36,2 gf. Foram utilizadas 60 sapatilhas nos quatro cabos de aço do mastro híbrido, totalizando = 2,2 kgf.



Figura 3.2.7.4: Presilhas utilizadas na fixação dos cabos de aço.

Com o objetivo de evitar problemas localizados prévios à força global aplicada, foram instaladas algumas braçadeiras metálicas como reforços, principalmente nas extremidades das barras de bambu. As Figuras 3.2.7.5 a 3.2.7.7 mostram essas braçadeiras utilizadas próximas às cruzetas no mastro híbrido, nas extremidades das cruzetas, e também nas extremidades da barra central deste mastro, onde foram instaladas as ponteiros metálicas, locais de altas concentrações de tensões. Foram utilizadas braçadeiras também nos pontos próximos às extremidades, no protótipo do mastro composto e nos mastros de feixe.



Figura 3.2.7.5: Uso de braçadeiras junto às cruzetas.



Figura 3.2.7.6: Uso das braçadeiras nas extremidades das cruzetas.

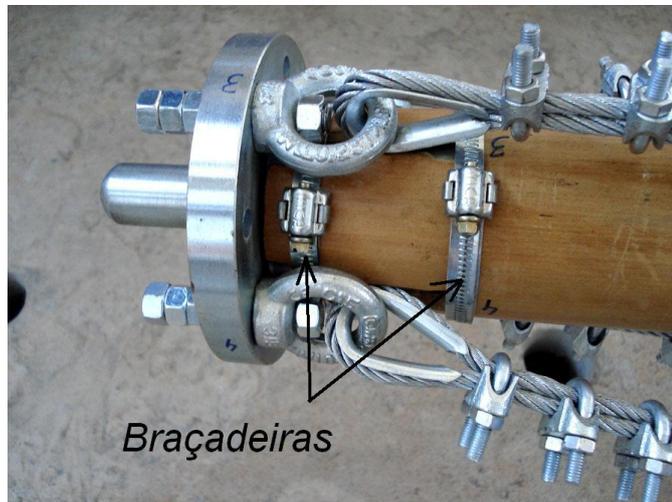


Figura 3.2.7.7: Braçadeiras de reforço local.

Cada braçadeira utilizada possui 35,95 gf. Foram utilizadas 14 braçadeiras no protótipo do mastro híbrido, totalizando 0,50 kgf.

Para o pré-tensionamento dos cabos de aço, foram utilizados 4 esticadores, totalizando 2,4 kgf. A Figura 3.2.7.8 apresenta um desses esticadores utilizados.



Figura 3.2.7.8: Esticadores com os cabos de aço do mastro híbrido.

3.3 – Projeto do experimento

Nessa sessão, apresentam-se informações quanto à organização espacial e detalhes do sistema de aplicação de carga que garantiram o sucesso dos experimentos mecânicos realizados no Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEES) da Escola de Engenharia da UFMG. A sessão está apresentada em: Pórtico de reação, Sistema de aplicação de cargas, Apoio para rótula universal e Células de carga.

3.3.1 – Pórtico de reação

O pórtico de reação instalado no LAEES foi constituído por dois pilares de aço com 6500 mm de distância um do outro, com bases enrijecidas parafusadas na laje de reação (solo). Para ancoragem do pórtico à laje de reação, foram utilizados parafusos por porcas e arruelas. A laje de reação tem 700 mm de espessura e armação adequada para suportar os esforços solicitantes provenientes do pórtico (RODRIGUES, 2009). A Figura 3.3.1.1 mostra o pórtico de reação com a instalação do primeiro mastro híbrido.



Figura 3.3.1.1: Pórtico de reação com a instalação do protótipo do mastro híbrido.

3.3.2 – Sistema de aplicação de cargas

Rodrigues (2009) aponta que o sistema de aplicação de cargas possui capacidade máxima de 100 tf. Esse sistema 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 que pode ser observada na Figura 3.3.2.1. Esta aplicação da força no cilindro faz com que um de seus componentes, o êmbolo, se desloque por reação, para assim transmitir a força ao elemento receptor. A carga foi aplicada perpendicularmente à seção transversal da barra principal do protótipo do mastro (compressão axial).



Figura 3.3.2.1: Bomba a óleo sob pressão e o cilindro hidráulico.

3.3.3 – Apoio para rótula universal

Para permitir deslocamentos angulares, o apoio por meio de rótula é um dispositivo de ensaio instalado na extremidade do êmbolo com a função de permitir deslocamentos lineares e rotações. Nos ensaios, os apoios foram posicionados para receber o contato com os pinos das peças ponteiros dos mastros.

Foram dois apoios de rótula distintos, sendo o primeiro, apenas soldado numa placa metálica e fixado por parafusos no pórtico. E o outro, instalado entre a ponteira do mastro e a célula de carga. Na Figura 3.3.3.1 pode ser observada a presença deste apoio fixo de rótula. Na Figura 3.3.3.2, pode-se ver o outro apoio de rótula entre as peças citadas.



Figura 3.3.3.1: Rótula de apoio fixada em placa no pórtico.

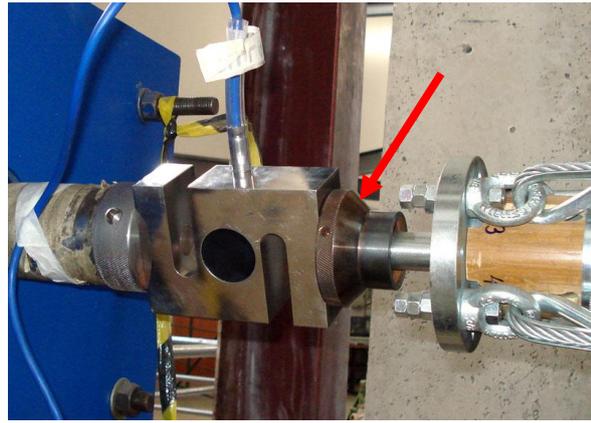


Figura 3.3.3.2: Rótula de apoio posicionada entre a ponteira do mastro e a célula de carga.

3.3.4 – Células de carga

Para o acompanhamento e controle da força aplicada durante o ensaio de compressão, foi instalada a célula de carga com capacidade de 100 kN, entre o êmbolo e o apoio de rótula que fez o contato direto com a ponteira instalada no protótipo do mastro (Figura 3.3.4.1). E para acompanhamento da tensão ocorrida nos cabos de aço, foram instaladas as células de carga em dois deles, com capacidade de 20 kN cada (Figura 3.3.4.2). Todas as células de carga foram ligadas ao Sistema de Aquisição de Dados.



Figura 3.3.4.1: Célula de carga no sistema de aplicação de carga.

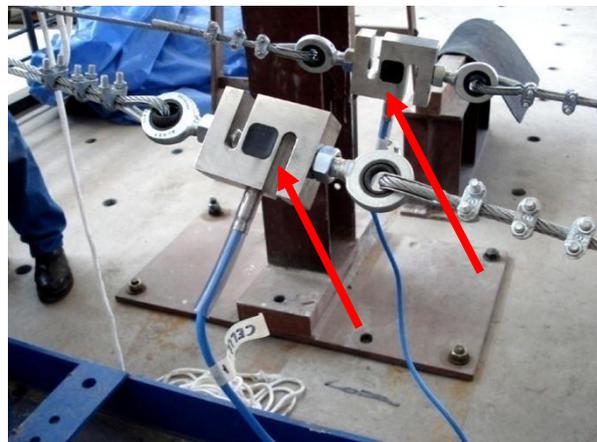


Figura 3.3.4.2: Células de carga instaladas nos cabos de aço.

3.4 – Aquisição de dados

Apresenta-se aqui o sistema utilizado para aquisição de dados no ensaio de compressão dos protótipos dos mastros. Assim, esta sessão está organizada em: Fase de montagem do ensaio, Instrumentação e Procedimentos de ensaio.

3.4.1 – Fase de montagem dos ensaios

Para a aquisição dos dados, foi utilizado o Sistema de Aquisição de Dados (SAD) ADS 2000, da marca Lynx, com 16 canais independentes, ligado a um computador portátil, aparato padrão já utilizado no LAEES e conhecido pelos técnicos presentes. Nos ensaios foram utilizados os softwares AqDados 7.0.2 e AqAnalysis 7.0.2 para aquisição e tratamento das informações.

Neste sistema, conectado ao computador portátil, os sinais das células de carga são captados como variação de voltagem pelo SAD, que, por sua vez, converte o sinal em valores de carga, de deslocamentos e de deformações e depois as informações são gravadas por um microcomputador. As Figuras 3.4.1.1 e 3.4.1.2 apresentam um panorama do ensaio com o mastro posicionado no pórtico de reação, os cabos ligados às células de carga e ligados no SAD utilizado no ensaio. Nas Figuras 3.4.1.3 e 3.4.1.4, observam-se as ligações dos cabos das células de carga e do computador portátil e ao SAD.



Figura 3.4.1.1: Panorama do ensaio com ligação das células de carga ao SAD.

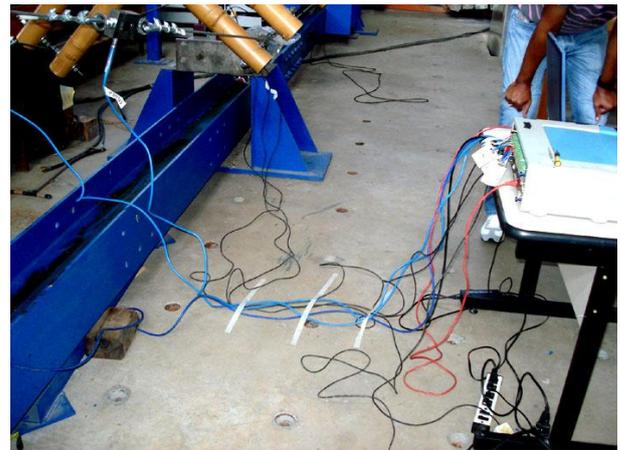


Figura 3.4.1.2: Ligação dos cabos das células de carga ao SAD.



Figura 3.4.1.3: Ligação dos cabos das células de carga ao SAD.



Figura 3.4.1.4: Computador portátil conectado ao SAD para registro dos dados.

3.4.2 – Instrumentação

Para a medição e acompanhamento dos deslocamentos transversais da seção central da barra central de bambu do protótipo do mastro, foi necessária a instalação de placas equalizadoras de alumínio junto ao corpo dessa barra central, de modo que as hastes dos transdutores de deslocamentos pudessem tocar a face das placas e acompanhar os deslocamentos, fazendo as medições necessárias. Essas placas podem ser observadas na Figura 3.4.2.1.

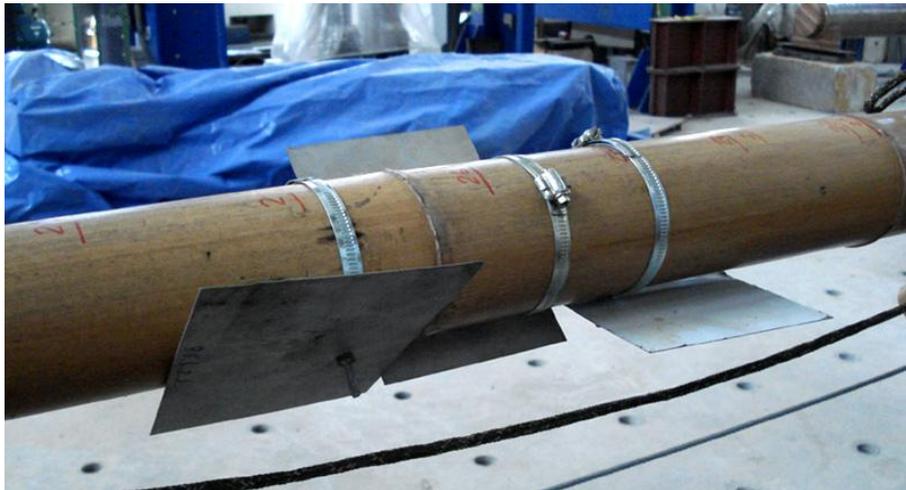


Figura 3.4.2.1: Placas equalizadoras de alumínio instaladas junto à barra central do mastro.

Para o ensaio, foram utilizados três transdutores de deslocamentos (DTs), fixados com bases magnéticas em chapas de aço que possibilitou o posicionamento correto para o contato com as placas equalizadoras. Todos os DTs utilizados foram do tipo DT100-A, da marca Kyowa, Modelo DT100-A, com campo de deslocamento de 0 a 100 mm.

A configuração física da instalação dos DTs ocorreu da seguinte maneira: um transdutor de deslocamento instalado na posição vertical e outros dois DTs instalados a 45° em relação ao primeiro, para registro dos deslocamentos nessa direção. A Figura 3.4.2.2 mostra a instalação dos DTs com base imantada de aço. Na Figura 3.4.2.3 observa-se o esquema dos DTs um em relação ao outro, no esquema citado.



Figura 3.4.2.2: Instalação dos DTs com base imantada em placas metálica.



Figura 3.4.2.3: Instalação dos três DTs: um na vertical e outros dois a 45 graus.

3.4.3 – Procedimentos de ensaio

Os protótipos dos mastros foram ensaiados na posição horizontal, aproveitando-se a instalação do pórtico de reação existente. Para a execução do ensaio, várias pessoas tomaram posições específicas, como aplicação da carga com o atuador hidráulico, observador dos ponteiros de deslocamento dos DTs, observador e controlador do software junto ao SAD, anotador dos registros das informações e dos registros fotográficos (Figura 3.4.3.1).



Figura 3.4.3.1: Esquema do ensaio com várias pessoas durante os trabalhos.

Os estágios de aplicação de carga ocorreram conforme planejamento das cargas previstas para cada etapa.

Para o primeiro protótipo do mastro híbrido, optou-se por deixar um mínimo de tração nos cabos de aço (cerca de 0,36 kN). Considerou-se este valor como o valor inicial de referência da tensão das células de carga dos cabos de aço para se administrar os valores de tensão a partir de então. As cargas foram aplicadas em intervalos de 1 kN, até o máximo de 10,5 kN, observando e anotando os registros das células de carga e dos três aparelhos de DTs instalados. O descarregamento ocorreu em três etapas, registrando também os resultados das células e dos DTs.

Para o segundo protótipo do mastro híbrido, foi dada uma tensão maior nos cabos de aço, conforme modelamento numérico. A tensão dada foi de 1,72 kN para o primeiro ensaio e de 2,0 kN para o segundo ensaio com este protótipo. Neste protótipo, optou-se por intervalos de carregamento de 3 kN. E no processo de descarregamento, optou-se por seis intervalos, no intuito de se registrar o comportamento e dados nesta fase.

Para o mastro composto, optou-se por fazer três ciclos iniciais de carga e descarga com valor máximo de 15 kN cada, com intervalos de 3 kN. E finalmente, foi aplicado o ciclo que se aproximou da carga limite última, de 45 kN.

O mesmo procedimento de ciclos iniciais de carga e descarga foi feito para os dois protótipos do mastro de feixe, com barras laterais de bambu de 3600 mm e de 5400 mm. Após esses ciclos, de carga de 15 kN, foi aplicada carga (também com intervalos de 3 kN), até a carga última do mastro ensaiado.

Para os ensaios de compressão nas doze barras isoladas, optou-se por fazer incrementos de carga de 1 kN, de modo a ter melhor registro da curva PDelta do ensaio. Para as barras isoladas, foram aplicados dois ciclos de carga e descarga, sendo o primeiro ciclo até 5 kN, e o segundo ciclo até a carga última da barra.

Todos os dados e interpretações dos resultados dos ensaios de compressão são observados no capítulo 4 desta tese.

As imperfeições geométricas locais dos bambus, como seções transversais ora circulares, ora elípticas e diferentes espessuras de parede em uma mesma seção, bem como as imperfeições geométricas dos eixos, já nos primeiros experimentos mecânicos do bambu, demonstraram que a medição das deformações por meio de extensômetros elétricos era de muito pouca utilidade, exceto no caso de um único elemento, para medição de deformações nos pontos visivelmente mais solicitados. Nestes casos específicos, em que se utilizaram extensômetros, foi possível mostrar que as deformações medidas em elementos estruturais semi-esbeltos submetidos à compressão axial, têm valores muito próximos das deformações medidas para corpos de prova isolados sob o mesmo nível de tensões; ou seja, num elemento

arqueado por forças axiais de compressão, na zona côncava dos elementos comprimidos, obtém-se curvas tensão-deformação praticamente coincidentes com as curvas tensão deformação de um segmento curto sob compressão, de altura igual a 2 vezes o diâmetro, obtido na vizinhança do ponto (MOREIRA, 1998). Por outro lado, os modos de ruptura de barras comprimidas de bambu de diferentes índices de esbeltez estão dispostos na literatura, como se pode observar em Arce-Villalobos (1986) e Moreira (1998).

Em uma estrutura de várias barras ou para elementos sujeitos a diferentes modos de flambagem, os extensômetros, embora informem um valor de deformação, pouco informam, pois a interferência local das diversas imperfeições dificultam a formulação do problema de forma que se consiga justificar aquele valor. Isso não acontece com um perfil metálico, por exemplo, devido ao alto grau de precisão geométrica.

Por essa razão, foram dispensadas as medições de deformações nas investigações desta tese, pois acabam sendo realmente de pouca utilidade.

O que mais caracteriza a investigação das estruturas de bambu é a dificuldade de se desacoplarem os diferentes parâmetros mecânicos, porque os bambus, exatamente por serem naturais, trazem todos esses parâmetros acoplados, como uma obra de arte, em que não se tem como separar forma de conteúdo.

Assim, de sua própria natureza, o bambu ensina que se ele puder ser investigado de uma maneira global, tanto melhor. Da determinação de diferentes módulos de elasticidade de compressão ao longo do colmo, por exemplo, não se pode dizer que se tem o módulo de elasticidade do colmo, pois há também os nós, que sofrem anastomose das fibras e há também o fato de que os módulos de elasticidade à tração, além de variarem ao longo do colmo, assim como o módulo de elasticidade em compressão, são diferentes deste.

E analogamente, no trato dos experimentos com bambu, ele ensina que os diferentes jogos que ele permite formar, como as combinações aqui propostas, ensinam mais sobre seus estados-limites do que os resultados de testes em corpos de prova pensados a priori. O bambu não está assim tão disponível às nossas projeções, exigindo que seja colocado à prova, diretamente, naquele objeto que se quer constituir. Deste modo, ele se permite conquistar em sentido contrário, como mostram pesquisas de Moreira e Ripper no livro “Jogo das formas: lógica do objeto natural”, e não de uma maneira linearizada, como se faz com os elementos estruturais industriais. A conclusão destes pesquisadores em relação aos materiais naturais é que eles devem ser investigados em bloco, com todos os recursos de análises disponíveis na atualidade.

Neste sentido, análise experimental e numérica se entrelaçam na produção do conhecimento relativo ao comportamento mecânico das estruturas de bambu, com o objetivo de devolver uma técnica tão simples de fabricação e dimensionamento das estruturas, quanto a sua trabalhabilidade e acessibilidade, pois o contrário contradiria a proposta de investigação destas estruturas para espaços que não disponham de tecnologia industrial. A análise numérica neste caso não é apenas uma simulação, ela é tão importante quanto à análise experimental para que se entenda e formule corretamente o funcionamento dessas estruturas. Ou seja, para não se perderem esses materiais naturais diretamente para as indústrias que querem desde já transformá-los, toda a tecnologia disponível na atualidade deve ser utilizada intensamente.

Assim, de experimento em experimento de flambagem dos protótipos que surgiram a partir da investigação do primeiro, denominado mastro híbrido, foram se descortinando diferentes composições (mastro composto e mastro de feixe) e delas singularidades de comportamento que facilitaram o entendimento de cada um dos tipos propostos, ao se intercambiarem os achados de um experimento a outro.

4

PRODUÇÃO DOS PROTÓTIPOS, ENSAIOS MECÂNICOS E ANÁLISE NUMÉRICA

INTRODUÇÃO

Neste capítulo tem-se o programa experimental da tese, que se inicia com a apresentação das características dos bambus utilizados nos experimentos e seu respectivo teste de compressão paralela às fibras em corpo de prova de altura igual a duas vezes o diâmetro e em barras isoladas de bambu de 6 metros de comprimento. Em seguida, apresentam-se os projetos dos mastros construídos, os ensaios e seus respectivos resultados, a validação dos modelos numéricos e os estudos paramétricos para aplicações estruturais com base em bambus tipo, sendo organizados em quatro partes: bambu: tipologia e suas características estruturais, mastro híbrido, mastro composto e mastro de feixe.

Capítulo 4

Parte 1

Bambu ensaiado: Tipologia e suas características

No universo denominado “bambu”, planta da família das *Graminaes* e subfamília *Bambusoideae*, existem hoje catalogadas aproximadamente 50 gêneros e 1300 espécies (PEREIRA e BERALDO, 2008, p.43). Das espécies existentes no Brasil, Filgueiras e Gonçalves (in PEREIRA e BERALDO, 2008, p.43) apontam 34 gêneros e 232 espécies de bambus nativos, com características físicas e visuais diversas. Entre as plantas da espécie *Phyllostachys*, tem-se: *Phyllostachys aurea*, *Tetragonoclamus angulatus*, *Phyllostachys nigra f. punctuata*, *Phyllostachys bamb. violascens*, *Phyllostachys nigra f. 'Boryana'*, *Phyllostachys viridis 'Sulphurea'*, *Phyllostachys bambusoides*, com aspectos visuais bastante distintos, como se pode observar na figura 4.1.1. Há também o gênero *Guadua*, originário da América, muito utilizado como material de construção para casas de baixo custo na Colômbia e Equador e possuindo várias espécies nativas no Brasil.



Figura 4.1.1: Aspecto visual de bambus da Espécie *Phyllostachys*.

Segundo Berndsen *et al* (2010), *Phyllostachys pubescens* é a espécie mais recomendada para reflorestamento no Brasil, devido a fatores climáticos. Os colmos utilizados para o trabalho desta tese foram escolhidos de uma remessa proveniente de plantação em Osasco SP, adquiridas com recursos de apoio financeiro do CNPq e CT Agro.



Figura 4.1.2: Aspecto visual do bambu *Phyllostachys pubescens*.

Os bambus não possuem um eixo longitudinal perfeitamente retilíneo. Ao contrário, como se vê em Moreira e Ghavami (2001), o eixo longitudinal descreve curvas diferentes ao longo do comprimento do corpo. De acordo com estas investigações, os bambus flambam num plano que contém a imperfeição máxima inicial. Mas, na prática, é difícil prever qual será este plano de flambagem.

4.1.1 – Teste de Compressão Paralela às Fibras em Corpo de Prova

Para se conhecer as características e algumas propriedades mecânicas do Bambu da espécie *Phyllostachys pubescens*, como o Coeficiente de Poisson, foram realizados testes de compressão axial em corpos de prova curtos, com altura igual a dois diâmetros. Tomou-se para este experimento um corpo de prova de 20 cm de altura, diâmetro médio de 104,7 mm e espessura média de 9,4 mm e área efetiva de $28,14 \text{ cm}^2$, correspondente a um maciço de 6 cm de diâmetro.

Para a utilização da barra de bambu enquanto elemento estrutural se faz necessário conhecer algumas propriedades físicas e mecânicas, como a resistência à compressão, resistência à tração e resistência ao cisalhamento. Enquanto elemento estrutural, o bambu pode ser utilizado com ligações parafusadas, coladas ou encaixadas. O registro das deformações foi realizado com extensômetros elétricos de resistência, EER, Marca Kyowa, de Resistência $119,8 \pm 0,2 \Omega$ e Fator Gage $2,11 \pm 1,0 \%$.

Para a realização do ensaio, utilizou-se sistema de ligação dos extensômetros, na Ponte de Wheatstone (do tipo “ponte completa”), apresentado por Window (1992), como se vê na figura 4.1.3:

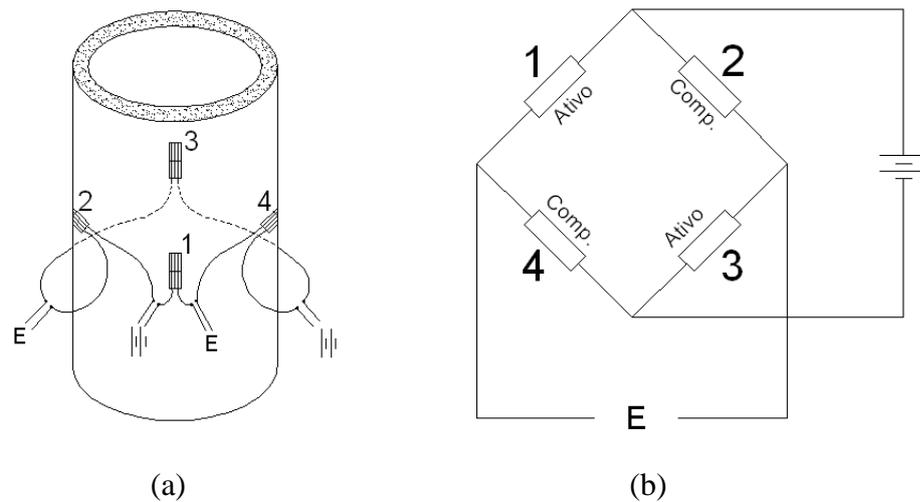


Figura 4.1.3: (a) Esquema de montagem dos extensômetros no corpo de prova; (b) Esquema de ligação entre os extensômetros, para Ponte de Wheatstone (ponte completa).

onde:



é a entrada de excitação elétrica calibrada para medição do diferencial elétrico apresentado pelos extensômetros.

E

é a saída de sinal elétrico a partir dos extensômetros, para leitura no sistema de aquisição de dados.

1 e 3

são os extensômetros elétricos Ativos, colados na parede externa do bambu, diametralmente opostos e alinhados ao eixo da célula de carga.

2 e 4

são os extensômetros elétricos Compensadores, colados na parede externa do bambu, diametralmente, alinhados a 90° do eixo da célula de carga.

As Figuras 4.1.4, 4.1.5 e 4.1.6 mostram o corpo de prova posicionado no local de ensaio, as ligações dos cabos junto ao Sistema de Aquisição de Dados, e a aplicação de carga no corpo de prova, respectivamente. Foram utilizados também *Clip Gages*, para obtenção da deformação no eixo vertical do corpo de prova (Figura 4.1.7). Os experimentos foram realizados no CEPAM3 (Centro de Pesquisa Avançada em Móveis, Madeira e Novos Materiais) da EE-UFGM.



Figura 4.1.4: Posicionamento do corpo de prova no local de ensaio.

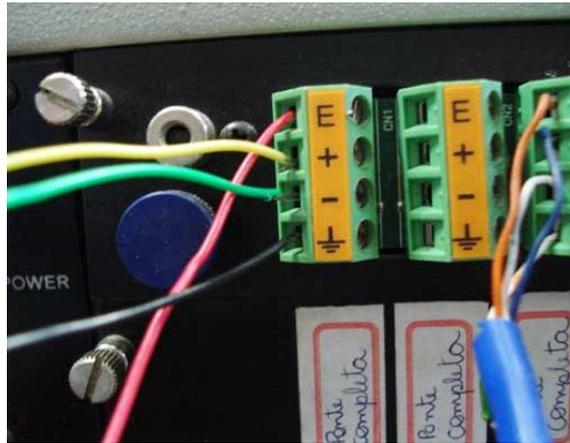


Figura 4.1.5: Ligação dos terminais no Sistema de aquisição de dados.



Figura 4.1.6: Início do ensaio, com aplicação de carga no corpo de prova.



Figura 4.1.7: Instalação do "clip gage" no corpo de prova.

Os dados de entrada foram:

- ✓ Área efetiva do corpo de prova CP1 (28,14 cm² correspondendo a um cilindro maciço de diâmetro efetivo de 59,8 mm)
- ✓ Tensão de compressão máxima prevista no ensaio = 60 MPa.

Os resultados foram:

- ✓ Módulo de Elasticidade obtido = 10 GPa.
- ✓ Tensão de compressão máxima aplicada no momento da interrupção do ensaio = 42 MPa
- ✓ Coeficiente de Poisson (ν_{LT})= 0,3

4.1.2 – Análises de Compressão Axial em Barras Isoladas de 6 metros

4.1.2.1 – Análise Experimental

Todas as barras utilizadas para construção dos mastros foram ensaiadas isoladamente. Para as extremidades das barras serem posicionadas no pórtico de reação, foram utilizados os aparelhos de apoio na forma de ponteiros de aço projetadas e fabricadas para os experimentos (observados no subcapítulo 3.2.3). A Figura 4.1.8 mostra o posicionamento da barra com a ponteira, junto ao atuador hidráulico no pórtico. Os três transdutores de deslocamento foram instalados com o mesmo procedimento já descrito anteriormente (item 3.4.2), sendo os DTs 1 e 3 posicionados a 45° em relação à horizontal e o DT 2 posicionado verticalmente, como se observa na Figura 4.1.9; as hastes dos três DTs tocam a superfície da placa equalizadora e foram ligados ao Sistema de Aquisição de Dados, para registro dos deslocamentos transversais do protótipo. Na Figura 4.1.10 observa-se a flambagem ocorrida na barra.



Figura 4.1.8: Barra isolada com o aparelho de apoio, no pórtico.



Figura 4.1.9: Instalação dos DTs em contato com as placas equalizadoras.



Figura 4.1.10: Flambagem da barra durante o ensaio.

Todas as doze barras ensaiadas tiveram os mesmos procedimentos de experimentação e de registro dos dados.

Como o bambu tem módulo de elasticidade e inércia da seção transversal com valores variáveis ao longo do seu comprimento, o objetivo desses ensaios foi permitir a obtenção da rigidez à flexão EI global de cada elemento, que pode ser dada a partir do Diagrama de Southwell, que fornece a carga de Euler F_E do elemento. Desse modo, a rigidez à flexão EI do elemento pode ser determinada pela Equação 4.1.1.

$$EI = \frac{F_E l^2}{\pi^2} \quad (4.1.1)$$

Considerando-se que o elemento responda mecanicamente como outro equivalente de inércia constante, calculada a partir da média das espessuras e diâmetros das duas extremidades, pode-se estimar o módulo de elasticidade global do elemento, independentemente se na base, no meio ou no topo, bem como da presença dos nós, que têm módulo de elasticidade inferior às regiões internodais, embora a espessura de parede aumente em todos os nós, compensando em área a perda de módulo de elasticidade.

Os diâmetros e espessuras médios medidos das seções das extremidades dos elementos são dados nas Tabelas 4.1.1, bem como as áreas e inércias das duas extremidades. As tabelas mostram também os diâmetros e espessuras correspondentes ao centro do elemento, D_c e t_c , bem como a área e inércia correspondentes.

Apresenta-se também nessa tabela o índice de esbeltez $\lambda = \frac{l}{i}$, onde i = raio de giração
 $= \sqrt{\frac{I}{A}}$, sendo I e A propriedades geométricas da seção central da barra.

Tabela 4.1.1: Propriedades geométricas dos bambus isolados.

		D (mm)	t (mm)	A (cm ²)	I (cm ⁴)	D_c (mm)	t_c (mm)	A_c (cm ²)	I_c (cm ⁴)	λ
Barra 1	BASE	108,7	13,7	40,4	467	94,8	10,6	28	252	200
	TOPO	80,8	7,5	17,3	117					
Barra 2	BASE	106,6	10,1	30,6	360	91,0	8,1	21	183	204
	TOPO	75,4	6,1	13,3	80					
Barra 3	BASE	114,6	9,6	31,7	440	108,7	9,3	29	362	142
	TOPO	102,8	9,1	26,8	297					
Barra 4	BASE	109,4	11,0	34,0	417	94,2	9,3	25	226	166
	TOPO	79,1	7,7	17,3	111					
Barra 5	BASE	106,0	10,5	31,5	363	95,2	9,5	26	238	164
	TOPO	84,3	8,5	20,2	147					
Barra 6	BASE	114,4	12,9	41,1	538	99,8	10,2	29	292	157
	TOPO	85,3	7,4	18,1	139					
Barra 7	BASE	96,0	9,6	26,1	246	86,1	8,2	20	154	181
	TOPO	76,2	6,8	14,8	90					
Barra 8	BASE	94,5	9,9	26,3	239	85,5	8,5	21	154	183
	TOPO	76,5	7,0	15,3	93					
Barra 9	BASE	96,4	10,1	27,4	258	87,6	8,4	21	166	178
	TOPO	78,8	6,7	15,2	99					
Barra 10	BASE	96,2	9,6	26,1	248	85,8	8,3	20	153	181
	TOPO	75,4	7,1	15,2	90					
Barra 11	BASE	112,0	11,3	35,8	459	99,1	9,3	26	267	157
	TOPO	86,1	7,3	18,1	141					
Barra 12	BASE	102,1	10,0	29,0	310	91,5	8,5	22	193	169
	TOPO	80,9	6,9	16,0	111					

4.1.2.2 – Modelagem Numérica com Inércia Variável

Para a primeira modelagem numérica considerou-se as seguintes hipóteses:

- ✓ Os bambus têm seção circular, com diminuição linear do diâmetro e espessura de parede da base para o topo.
- ✓ A imperfeição inicial foi considerada no centro da barra e a configuração do seu eixo foi descrita pela senóide $z = \delta_0 \text{sen} \frac{\pi x}{l}$. Essa descrição é válida (MOREIRA, 1998), pois o eixo dos bambus descreve curvas diversificadas e em muitos casos é difícil prever a direção de maior imperfeição, que é a direção naturalmente escolhida para o plano de deflexão, sendo bem acompanhada pela senóide.
- ✓ As barras de 6 m de comprimento foram discretizadas em nós distantes de 200 em 200 mm, com elementos de barra reta. Cada elemento de 200 mm tem inércia constante calculada a partir da média do diâmetro e da espessura de parede de cada trecho (Figura 4.1.11);
- ✓ A modelagem utilizou elementos de barra;
- ✓ A análise foi do tipo não-linear elástica, com consideração da não linearidade geométrica do eixo e efeitos de 2ª ordem.

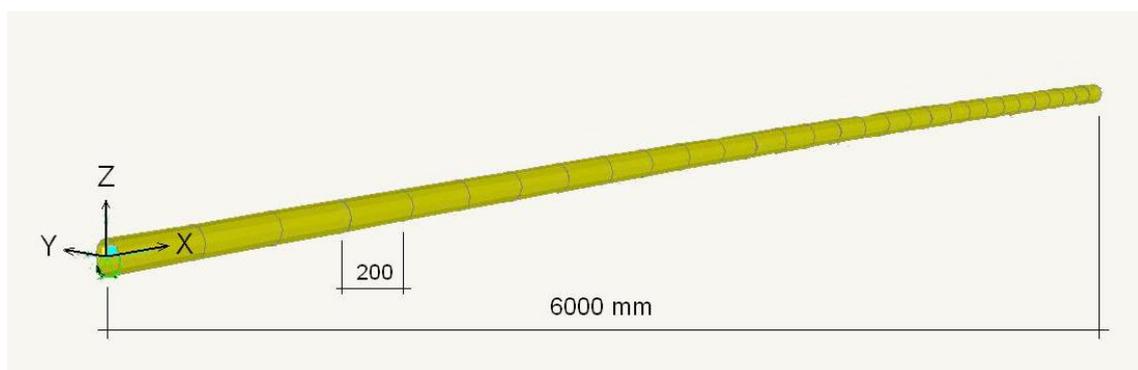


Figura 4.1.11: Segmentação da barra isolada, modelada numericamente.

Objetivando a correspondência do modelo numérico com o experimento, observou-se a razão de 3,06 (média das razões, Tabela 4.1.1) que validam a modelagem.

4.1.2.3 – Modelagem Numérica com Inércia Constante

Ainda que a modelagem com inércia variável tenha se ajustado com boa precisão ao experimento, se os bambus pudessem ser modelados com inércia constante, simplificaria muito a modelagem dos mastros, qualquer que fosse a composição estudada. Desse modo, os bambus foram modelados para uma inércia constante igual a I_c , Tabela 4.1.1, que corresponde à seção central do elemento.

Não se pode deixar de mencionar a impressionante coincidência dos resultados experimentais e numéricos, após tantas simplificações adotadas. Porém, àqueles habituados a modelar os bambus, essas coincidências sempre acontecem, o que revela, na realidade, a regularidade do comportamento desses tubos naturais em mutações ocorridas em cerca de 160 milhões de anos, que faz com que sejam considerados tubos *high tech*, ou tubos inteligentes.

Esses resultados confirmam as hipóteses de Moreira (1998), que ensaiou em flambagem barras de dois metros de comprimento, constatando que poderiam ser modeladas a partir do centro do elemento, diferentemente do que é proposto para madeiras roliças, para as quais se propõe que sejam trabalhadas com inércia constante igual à inércia tomada a 1/3 do comprimento da extremidade de menor diâmetro.

Na realidade, para a barra de bambu B1, especificamente, os maiores deslocamentos numéricos ocorreram a 20 cm do centro da barra, com diferenças de décimos de mm, ou seja, desprezáveis em relação aos deslocamentos tomados no centro da barra.

Na Figura 4.1.12 tem-se os trechos iniciais das curvas PDelta para todas as situações, experimentais e numéricas combinadas, para a barra B1. Carga, descarga e recarga referem-se às curvas experimentais, as quais se acrescentam as curvas numéricas (numérico com inércia variável e numérico com inércia constante).

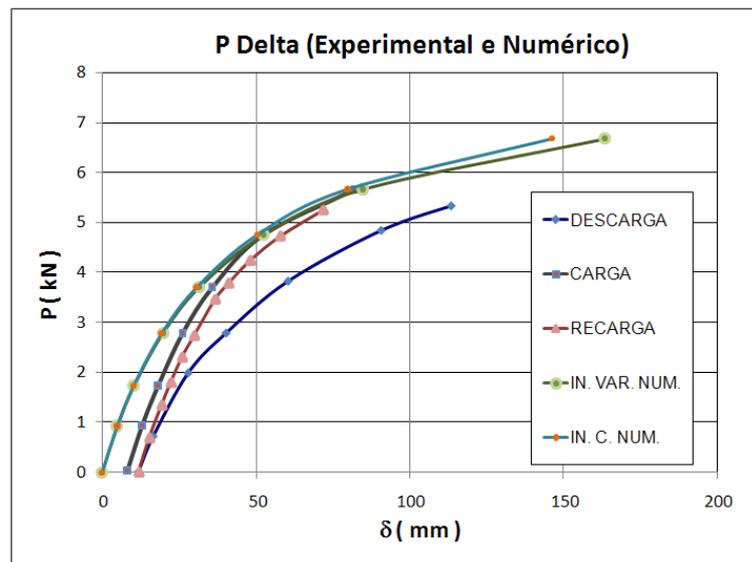


Figura 4.1.12: Comparação dos resultados carga descarga experimental e numérico.

Na Figura 4.1.13 tem-se os Diagramas de Southwell correspondentes às curvas PDelta da Figura 4.1.12. Nesta Figura 4.1.13 tem-se 3 retas praticamente coincidentes, que são as retas de carga, obtida experimentalmente e as retas obtidas numericamente com inércia

variável (IN. VAR. NUM.) e inércia constante (IN. C. NUM.), de onde se obtém respectivamente, $F_E = 8,52$ kN, $F_E = 8,28$ kN e $F_E = 8,51$ kN.

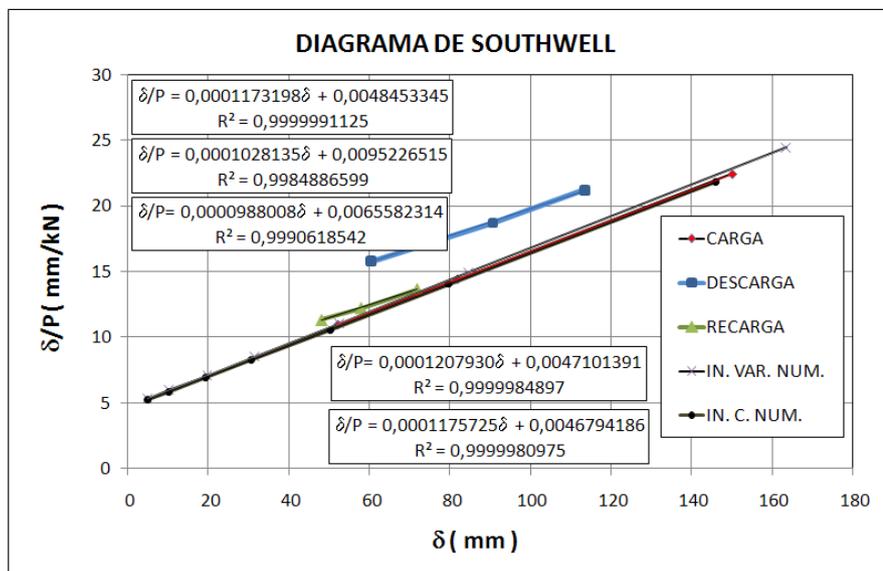


Figura 4.1.13: Comparação do Diagrama de Southwell experimental e numérico.

A reta de descarga apresentou para a carga de Euler o valor de 9,72 kN. Ou seja, a descarga acusou um aumento de rigidez de 14,1 % e entre a reta de descarga e a reta de recarga houve um aumento de rigidez de 4,1 %, resultando num aumento de rigidez da curva de recarga para a curva de carga igual a 18,7 %.

A pergunta que surge é: - o que teria acontecido com a estrutura do material?

Da figura 4.1.12, a curva PDelta experimental constatou que entre a carga e a descarga há uma energia consumida. Percebe-se no princípio da curva de carga, em que se realizou uma pequena descarga, uma acomodação do sistema, de cerca de 8 mm. Após a descarga, a curva apresenta um resíduo de cerca de 3,72 mm. Este deslocamento residual final pode ser até maior do que esse valor registrado, pois os primeiros pontos da curva PDelta podem sofrer mascaramentos, principalmente após a descarga, pelas seguintes razões:

- À medida que o bambu se desloca, pequenos giros de eixo podem comprometer as leituras finas, de deslocamentos muito pequenos, já que a haste do DT não é fixa em um único ponto.
- Em alguns casos foi preciso inverter a pressão hidráulica no atuador, para se conseguir cargas mais baixas de aplicação, o que pode também ter comprometido a leitura final na descarga. De qualquer forma, os deslocamentos residuais registrados para a barra B1, que inclusive aumentam a imperfeição inicial em relação à imperfeição inicial registrada na carga, explicariam parte da perda de energia registrada entre a carga e a descarga. Contudo,

a perda de energia registrada é muito elevada, e as demais barras não apresentaram nenhum resíduo, o que obriga uma investigação mais aprofundada.

Para os demais experimentos, apresenta-se os resultados das curvas PDelta (Figuras 4.1.14 a 4.1.25) e Diagramas de Southwell (Figuras 4.1.20 a 4.1.31) de cada ensaio das doze barras isoladas de 6 metros de comprimento:

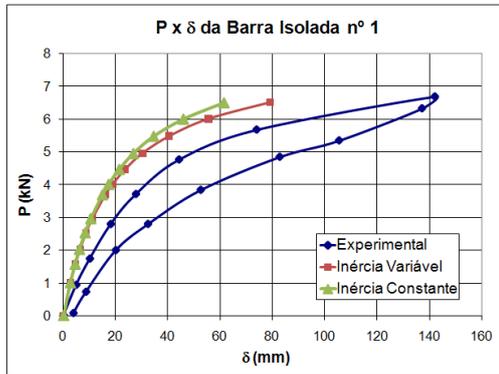


Figura 4.1.14: Curva PDelta Bambu nº1.

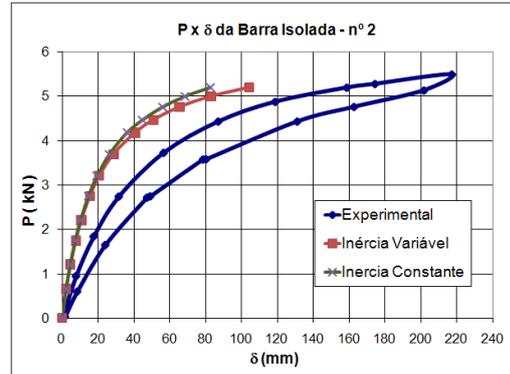


Figura 4.1.15: Curva PDelta Bambu nº2.

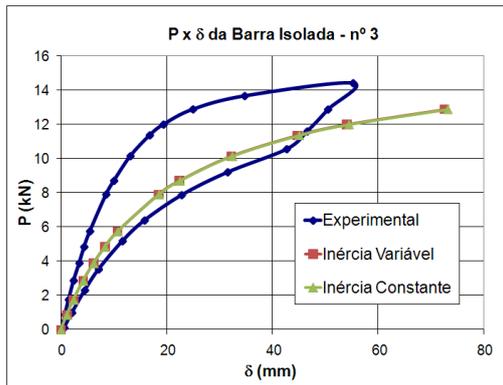


Figura 4.1.16: Curva PDelta Bambu nº3.

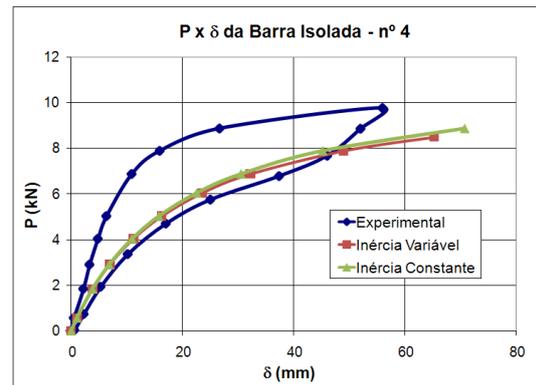


Figura 4.1.17: Curva PDelta Bambu nº4.

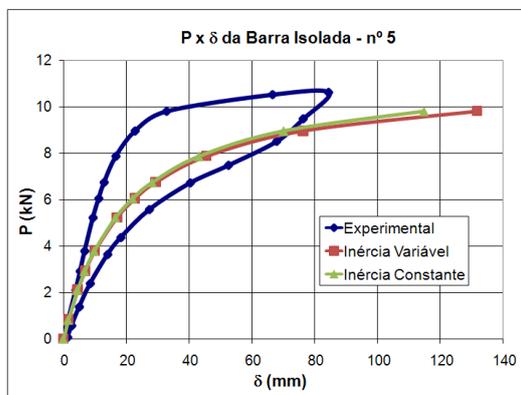


Figura 4.1.18: Curva PDelta Bambu nº5.

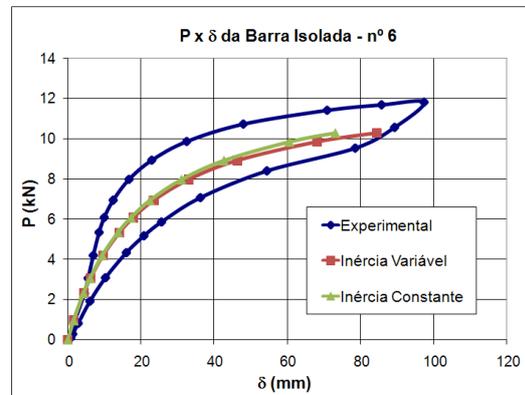


Figura 4.1.19: Curva PDelta Bambu nº6.

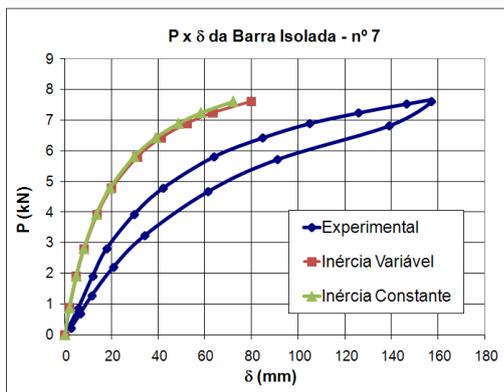


Figura 4.1.20: Curva PDelta Bambu nº7.

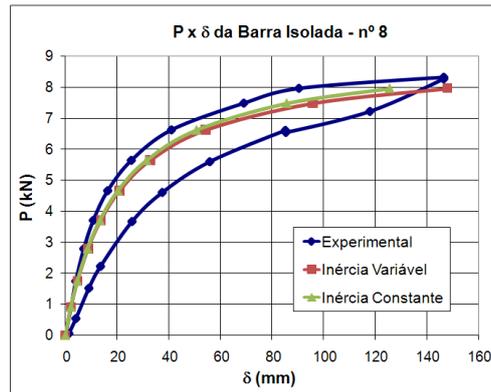


Figura 4.1.21: Curva PDelta Bambu nº8.

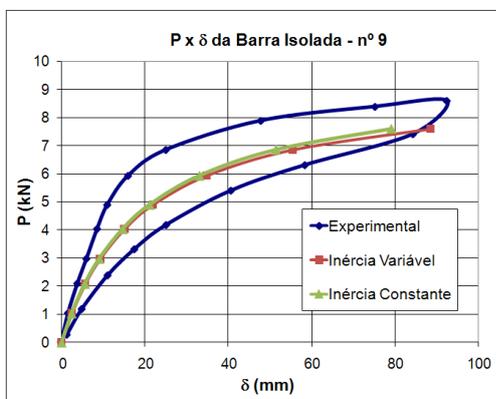


Figura 4.1.22: Curva PDelta Bambu nº9.

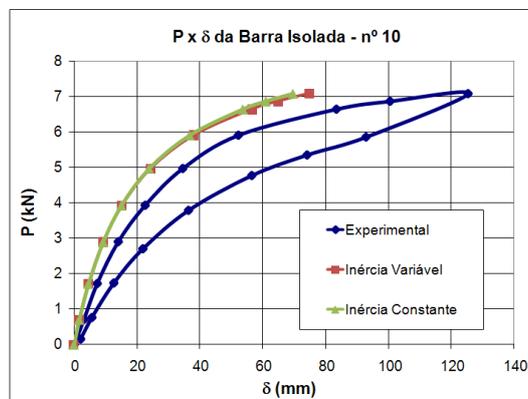


Figura 4.1.23: Curva PDelta Bambu nº10.

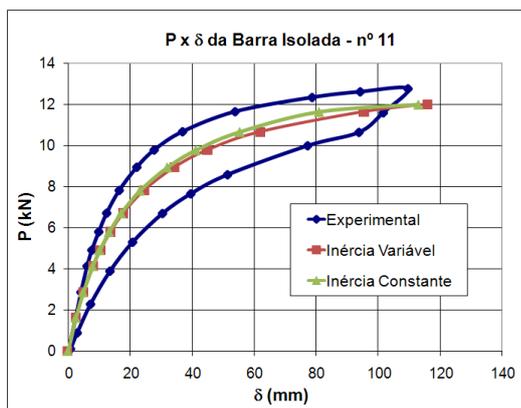


Figura 4.1.24: Curva PDelta Bambu nº11.

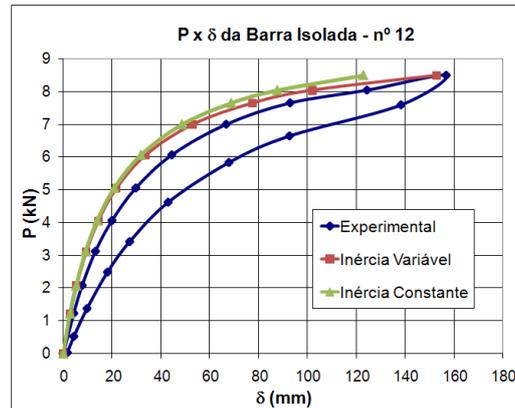


Figura 4.1.25: Curva PDelta Bambu nº12.

Observa-se que as curvas numéricas não coincidiram com as curvas experimentais devido ao fato de os experimentos terem apresentados diferentes imperfeições iniciais para cada barra, enquanto que o modelo numérico foi gerado com uma imperfeição inicial de 20 mm para todas as barras. Isso faz a curva Pdelta declinar diferentemente, ainda que a Carga de Euler seja a mesma, pois ela não varia com a imperfeição inicial. A imperfeição inicial apenas

gera tensões mais elevadas nos materiais, não interferindo, contudo na determinação da carga de Euler. E a carga de Euler, sendo a mesma para cada barra, apresenta retas paralelas nos Diagramas de Southwell, visto que a diferença se localiza nas imperfeições iniciais entre o elemento experimental e o modelo numérico (Figuras 4.1.26 a 4.1.37).

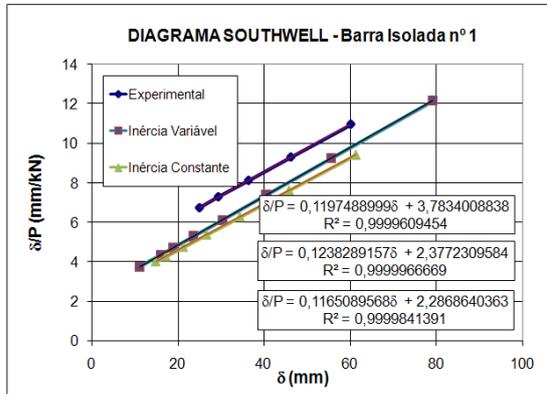


Figura 4.1.26: Diagrama de Southwell do Bambu nº1.

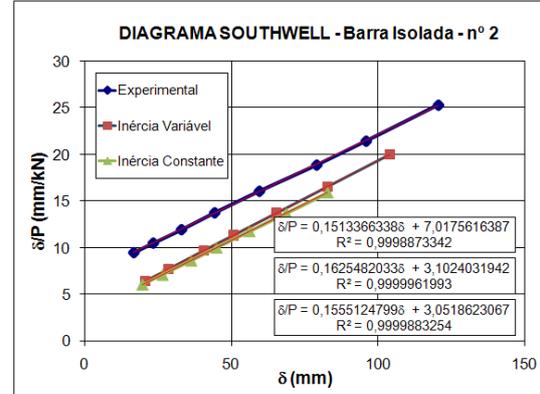


Figura 4.1.27: Diagrama de Southwell do Bambu nº2.

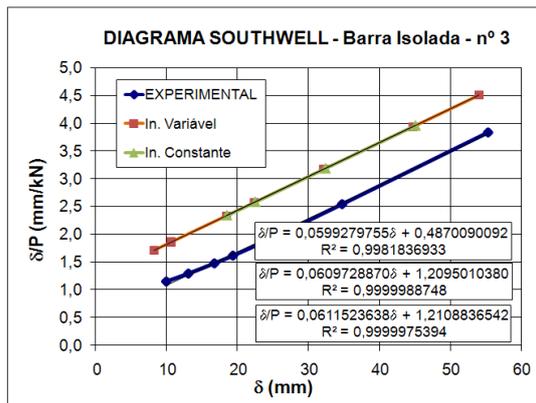


Figura 4.1.28: Diagrama de Southwell do Bambu nº3.

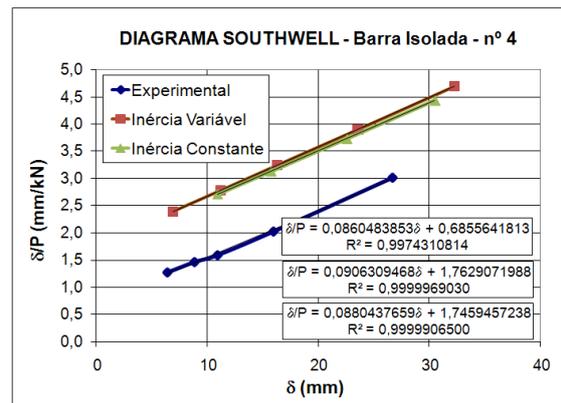


Figura 4.1.29: Diagrama de Southwell do Bambu nº4.

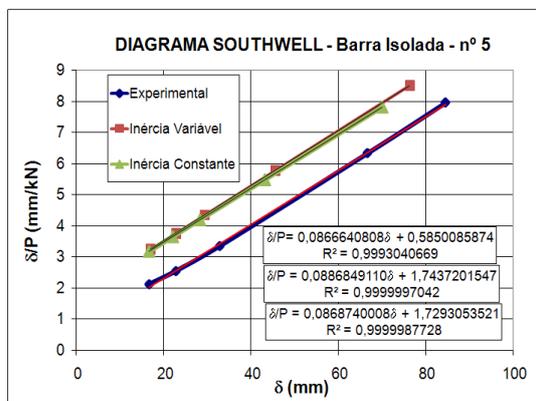


Figura 4.1.30: Diagrama de Southwell do Bambu nº5.

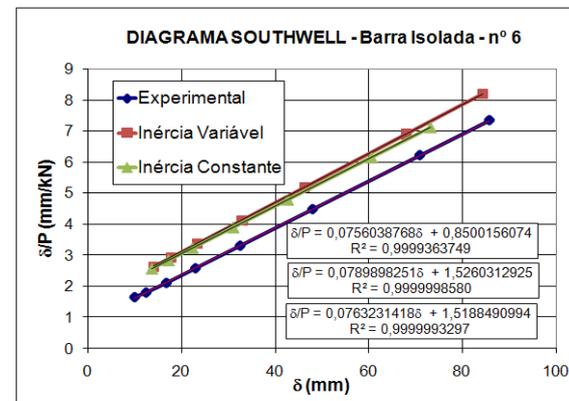


Figura 4.1.31: Diagrama de Southwell do Bambu nº6.

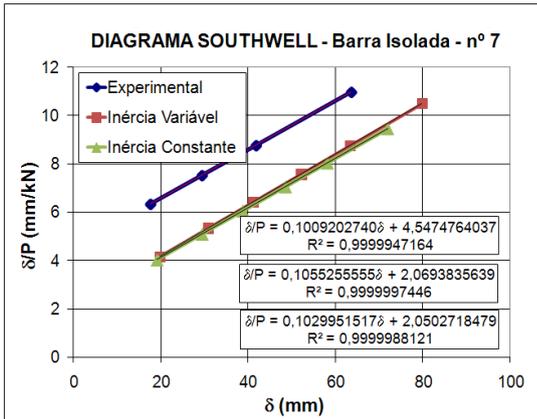


Figura 4.1.32: Diagrama de Southwell do Bambu nº7.

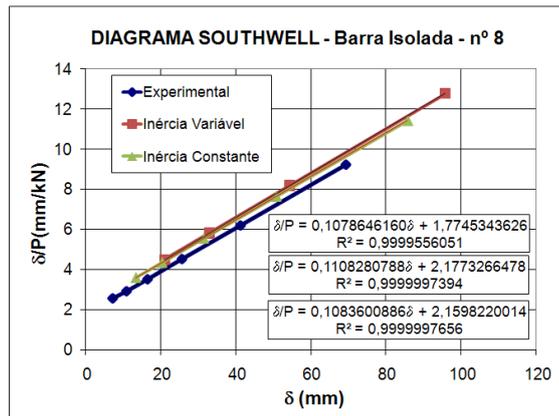


Figura 4.1.33: Diagrama de Southwell do Bambu nº8.

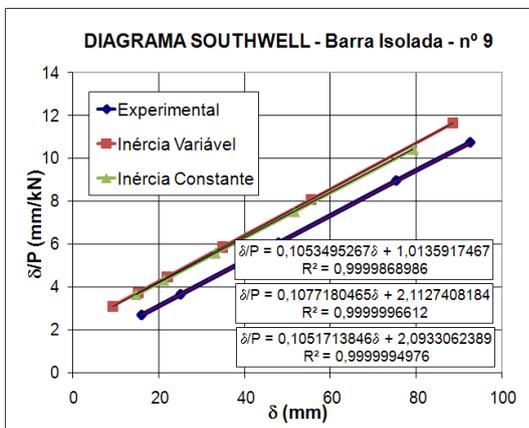


Figura 4.1.34: Diagrama de Southwell do Bambu nº9.

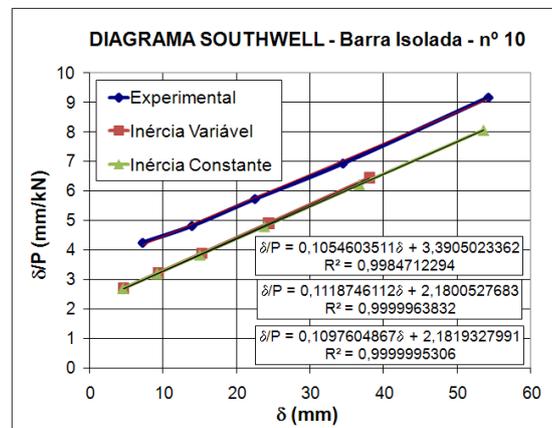


Figura 4.1.35: Diagrama de Southwell do Bambu nº10.

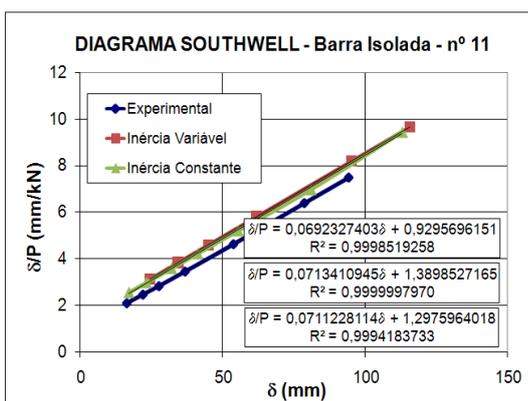


Figura 4.1.36: Diagrama de Southwell do Bambu nº11.

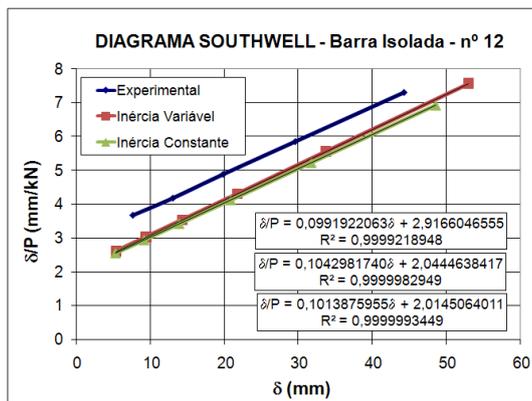


Figura 4.1.37: Diagrama de Southwell do Bambu nº12.

Dos diagramas de Southwell, considerando-se que a seção do bambu seja circular, com diâmetros e espessuras variando linearmente ao longo do comprimento e considerando-se barras prismáticas com a inércia da seção central de cada um dos elementos, obtiveram-se os

módulos de elasticidade globais dados na Tabela 4.1.2, calculados pela Equação 1. Na tabela, observam-se também os dados obtidos nos ensaios das barras: Carga de Euler (F_E), Produto EI , a imperfeição inicial (δ_0) experimental e numérica, o Momento de Inércia médio (\bar{I}), e o Módulo de Elasticidade E .

Tabela 4.1.2: Dados das barras ensaiadas, obtidos pelos experimentos e numericamente.

Barras →	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
F_E (kN)	8,35	6,61	16,69	11,62	11,54	13,23	9,91	9,27	9,49	9,48	14,44	10,08
EI (GPa cm ⁴)	3046	2411	4228	2943	2923	3351	2510	2348	2404	2401	3658	2553
δ_0 (experimental) (mm)	31,59	46,37	8,13	7,97	6,75	11,24	45,06	16,45	9,62	32,15	13,43	29,40
δ_0 (numérico) (mm)	19,63	19,62	19,80	19,83	19,91	19,90	19,91	19,93	19,90	19,88	18,24	19,87
\bar{I} (cm ⁴)	252,4	182,9	361,8	227,0	237,7	291,8	153,9	154,2	165,7	153,5	267,3	192,9
E (GPa)	12,47	13,24	11,51	12,33	12,30	11,41	16,02	15,24	14,57	14,44	13,78	13,00

4.1.3 – Fluência dos Bambus Isolados

A energia consumida no processo, verificada nas curvas experimentais de descarga (Figuras 4.1.14 a 4.1.25), por ser relativamente alta, suscitou investigação mais aprofundada. Como não há praticamente nenhum resíduo na descarga, que poderia ser atribuída a deformações plásticas localizadas e a perda por calor, essa energia consumida não poderia ser tão elevada.

Não se teve como não atribuir a grande diferença entre as curvas PDelta de carga e descarga senão à relaxação do bambu por tensões de cisalhamento, que estariam declinando a curva PDelta na descarga. Esta hipótese foi verificada, pois traçando-se o diagrama de Southwell da descarga (Figuras 4.1.38 a 4.1.49), percebe-se um pequeno aumento de rigidez à flexão EI e um aumento da imperfeição inicial da barra. Ou seja, inversamente, se o carregamento fosse feito por pesos e não por deslocamentos controlados, seria registrada a fluência do bambu, com aumento progressivo dos deslocamentos laterais sob o mesmo peso, tendendo a um limite.

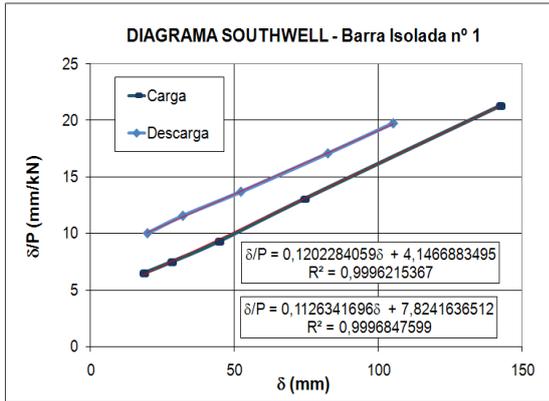


Figura 4.1.38: Southwell da Carga e Descarga da Barra B1.

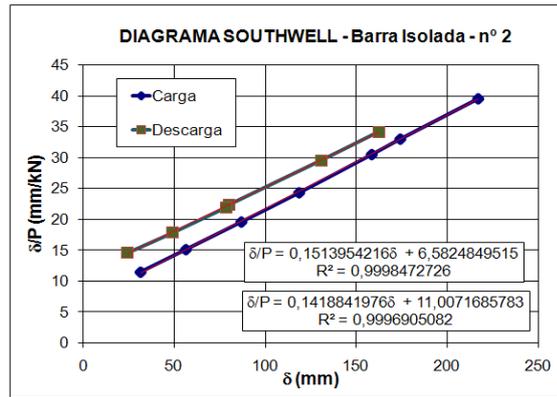


Figura 4.1.39: Southwell da Carga e Descarga da Barra B2.

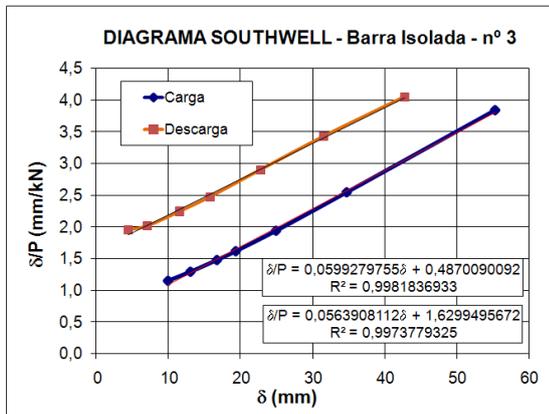


Figura 4.1.40: Southwell da Carga e Descarga da Barra B3.

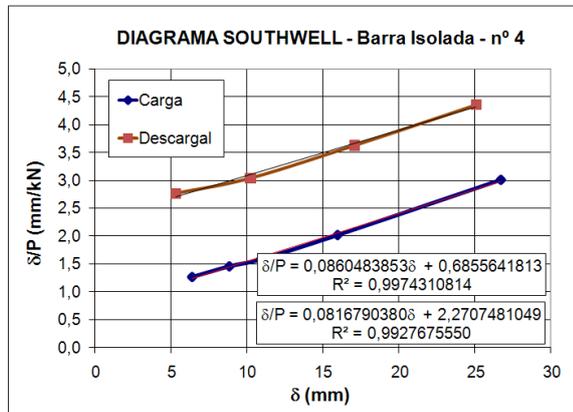


Figura 4.1.41: Southwell da Carga e Descarga da Barra B4.

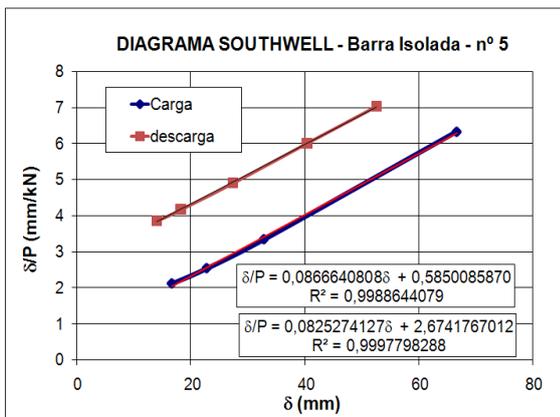


Figura 4.1.42: Southwell da Carga e Descarga da Barra B5.

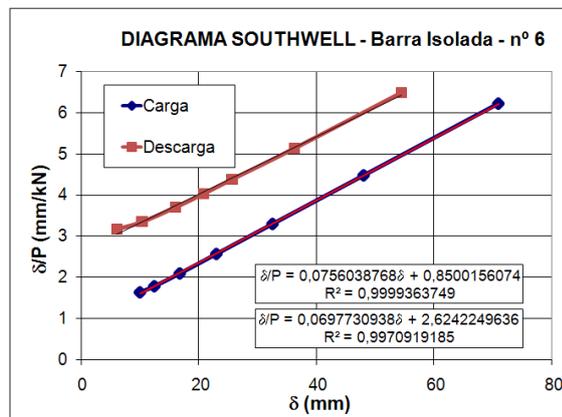


Figura 4.1.43: Southwell da Carga e Descarga da Barra B6.

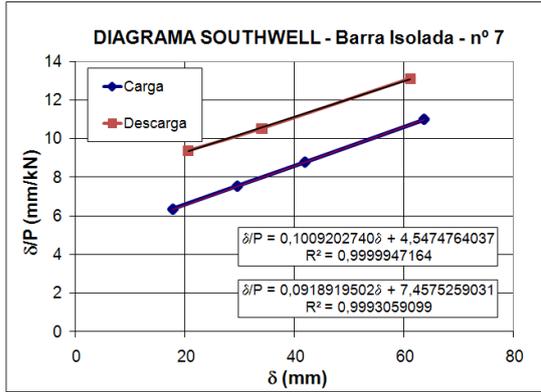


Figura 4.1.44: Southwell da Carga e Descarga da Barra B7.

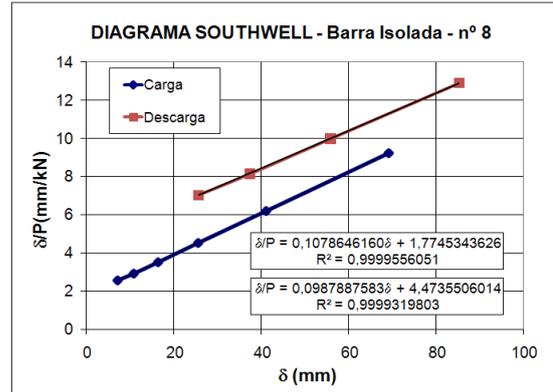


Figura 4.1.45: Southwell da Carga e Descarga da Barra B8.

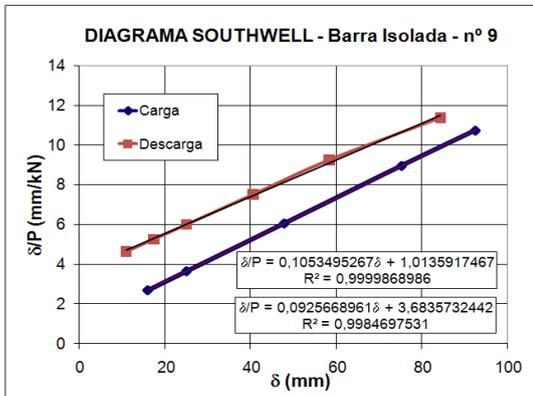


Figura 4.1.46: Southwell da Carga e Descarga da Barra B9.

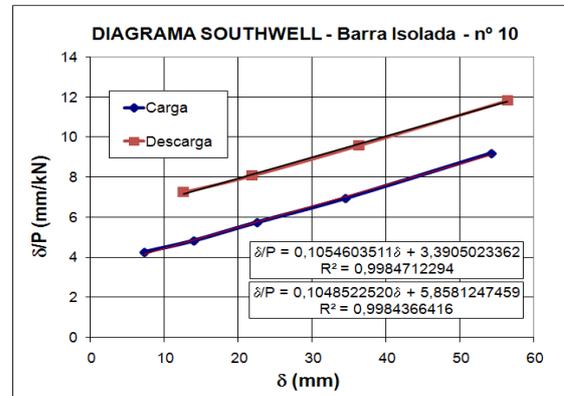


Figura 4.1.47: Southwell da Carga e Descarga da Barra B10.

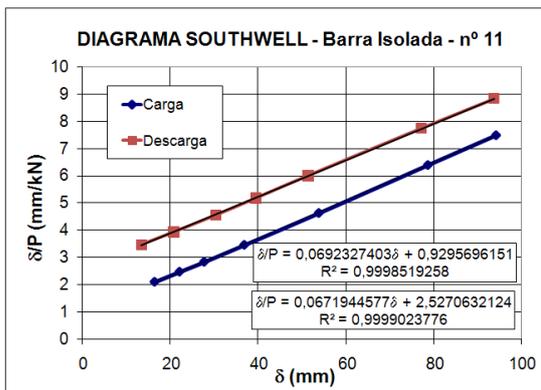


Figura 4.1.48: Southwell da Carga e Descarga da Barra B11.

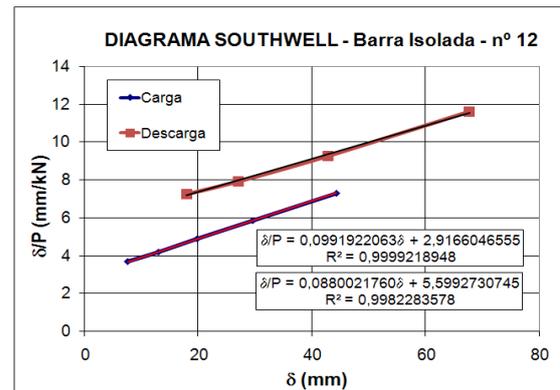


Figura 4.1.49: Southwell da Carga e Descarga da Barra B12.

Partindo-se dos estudos microscópicos de Liese (1998), pode-se propor um esquema para explicar a relaxação por efeito do cisalhamento, na estrutura celular do bambu visto lateralmente, Figura 4.1.50.

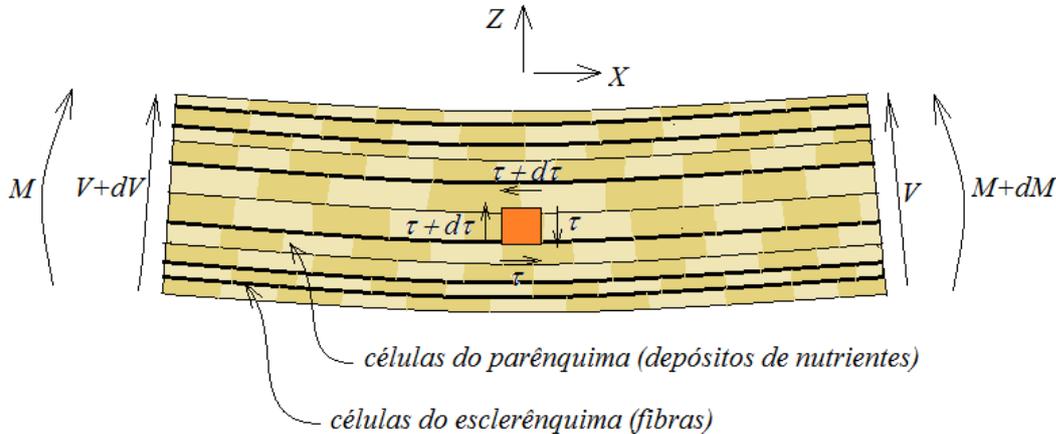


Figura 4.1.50: Relaxação da estrutura do bambu por cisalhamento.

Das curvas de carga e descarga, Figuras 4.1.14 a 4.1.25, obtêm-se as cargas de Euler e imperfeições iniciais registrados na Tabela 4.1.3, F_{E1} e δ_{01} – carga; F_{E2} e δ_{02} – descarga. Do mesmo modo, na coluna 5 da tabela têm-se as razões das cargas de Euler para cada caso, mostrando que o tombamento das paredes das células do parênquima transversais ao eixo, em todos os casos de descarga, tornou o elemento um pouco mais rígido, pelo menos temporariamente, enquanto as paredes distorcidas ainda recuperam visco-elasticamente sua configuração original.

O escorregamento das fibras por cisalhamento, explica a queda da curva PDelta de descarga. Essa relaxação pode ser percebida durante o carregamento, de forma que as leituras de carregamento foram feitas 10 segundos após a aplicação da carga, e em cada passo de aplicação, detectando-se uma pequena queda em relação à carga máxima registrada.

A relaxação por flexão é apresentada também pelas madeiras moles e duras, e ela varia com o conteúdo de umidade, com a duração e a grandeza do carregamento. No caso do bambu percebe-se que, pela pequena quantidade de material, essa relaxação é relativamente rápida, a ponto de recuperar-se durante o tempo do experimento. Estudos de Moreira e Ribeiro (2013) mostram que apenas 50% da seção dos bambus dessa espécie são fibras, sendo os demais, vazios dos vasos condutores e parênquimas.

As células do parênquima, que são caixas ocas para depósitos de nutrientes, envolvem as fibras de forma que se colam longitudinalmente a elas pelas faces longitudinais, enquanto as faces radiais da célula ficam perpendiculares às fibras. Então, as tensões de cisalhamento

que atuam durante a flexo-compressão da barra vão deformando as células do parênquima, tombando as paredes perpendiculares, antes que ocorra a ruptura por cisalhamento. Essas deformações tornam-se permanentes e acabam por enrijecer o material, o que foi registrado na comparação das cargas de Euler na descarga e recarga com a carga. Registra-se desse modo um enrijecimento do material a frio, pelo deslizamento permanente das fibras durante a flexão.

Segue a Tabela 4.1.3, com os valores para as cargas, descargas, e razões entre as mesmas:

Tabela 4.1.3: Carga, descarga e razões entre ambas:

Bambu	CARGA		DESCARGA		RAZÕES		
	F_{E1} (kN)	δ_{01} (mm)	F_{E2} (kN)	δ_{02} (mm)	F_{E2}/F_{E1}	δ_{02}/δ_{01}	P_{max}/F_{E1}
1	8,32	34,49	8,88	69,47	1,07	2,01	0,80
2	6,61	43,48	7,05	77,58	1,07	1,78	0,83
3	16,69	8,13	17,73	28,90	1,06	3,55	0,86
4	11,62	7,97	12,24	27,80	1,05	3,49	0,84
5	11,54	6,75	12,12	32,40	1,05	4,80	0,92
6	13,23	11,24	14,33	37,61	1,08	3,35	0,89
7	9,91	45,06	10,88	81,16	1,10	1,80	0,77
8	9,27	16,45	10,12	45,28	1,09	2,75	0,90
9	9,49	9,62	10,80	39,79	1,14	4,14	0,91
10	9,48	32,15	9,54	55,87	1,01	1,74	0,75
11	14,44	13,43	14,88	37,61	1,03	2,80	0,88
12	10,08	29,40	11,36	63,63	1,13	2,16	0,84
				Médias \pm desvio padrão:	1,07	2,86	0,85

Para se documentar o experimento em filmagens e fotografias, os bambus ficaram sob a carga máxima do ensaio, P_{max} , por cerca de 10 minutos, donde resulta o salto no início da descarga, que passa então a descrever uma curva PDelta com perfil uniforme, já que o tempo das leituras entre os passos de descarregamento passam a ser menores, ou seja, de dois em dois minutos. Contudo, curiosamente, na descarga, uma vez que o material ficou menos sujeito à relaxação e mais rígido, vários pontos da curva de descarga ficam perfeitamente alinhados no Diagrama de Southwell, diferentemente do carregamento. No caso do carregamento, somente os 3 a 5 pontos finais permitem o traçado de uma reta. Ou seja, à medida que a as paredes das células do parênquima tombam-se com o aumento do carregamento, o material torna-se mais estável e controlável pelo Diagrama de Southwell.

Registrou-se também que entre uma aplicação de carga e outra se despendiam cerca de 2 minutos, pois embora a leitura fosse automática, foram também anotadas as leituras manualmente. Desse modo, cada experimento completo de carga e descarga durou cerca de 1,5 horas. Com isso havia tempo do parênquima, embora totalmente deformado viscosamente sob cargas médias de compressão de 85% da carga de Euler, recuperasse sua configuração inicial, e essa seria a razão porque na descarga não se registrou praticamente nenhum resíduo de deslocamento, caracterizando um comportamento visco-elástico.

A ABNT NBR 7190 trata o problema da fluência das vigas de madeira, que tende a se estabilizar com cerca de 9 semanas, Figura 4.1.51. Em termos de cálculo, o problema é resolvido antecipando-se na verificação das tensões máximas de flexo-compressão, uma imperfeição inicial adicional devida à fluência.

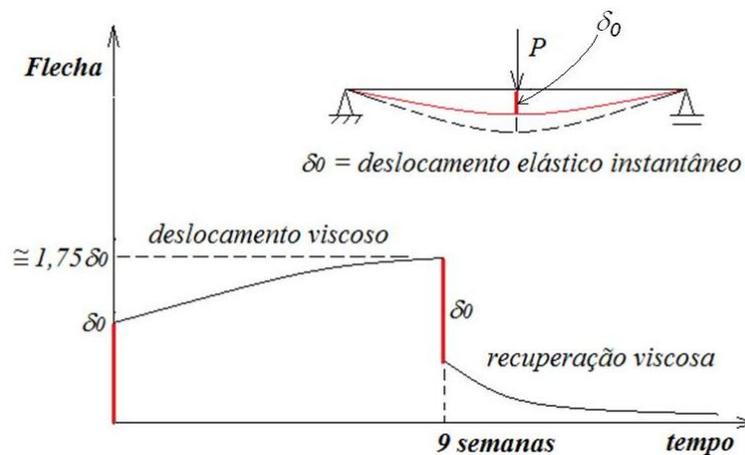


Figura 4.1.51: Comportamento visco-elástico das madeiras em flexão.

Seguindo-se o mesmo procedimento para o caso dos bambus, (Tabela 4.1.3) verifica-se que as imperfeições iniciais aumentaram em média $2,86\delta_0$, para uma carga máxima média de $0,85F_E$. Plotando-se esse ponto limite, juntamente com a origem, tem-se a Figura 4.1.52. Considerando-se, por falta de outros pontos, uma variação linear da fluência com a razão $\frac{P_{max}}{F_E}$, pode-se obter o coeficiente ϕ que multiplicado pela imperfeição inicial δ_0 , fornece a imperfeição inicial devida à fluência, $\delta_f = \phi \delta_0$. Na realidade, um estudo de fluência detalhado, exigiria uma metodologia específica, com controle de umidade do material, duração e grandeza dos carregamentos, bem como o controle do número de nós por barra, de forma a se obter os diferentes pontos que interligam os pontos extremos até o nível da carga limite, uma curva para cada conteúdo de umidade, ao que se proporia ao final, conseguir uma equação única para controle da fluência. Por outro lado, o controle rigoroso da idade dos colmos é

fundamental para a confiabilidade dos resultados. Porém estes estudos ultrapassam o escopo desta tese. De qualquer forma, o problema poderia ser tratado da maneira proposta e muito provavelmente os coeficientes dados por uma linha reta não comprometeriam a segurança da estrutura, pois para cargas P_{max} menores, a relaxação é também menor.

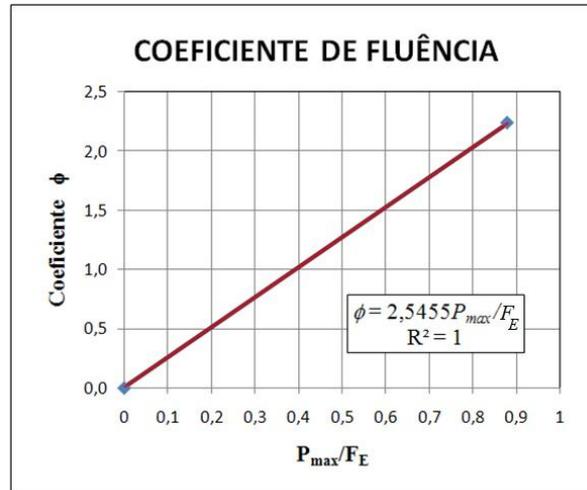


Figura 4.1.52: Coeficientes de fluência para os bambus *Phyllostachys pubescens*.

Utilizando-se dos resultados desta figura, se a carga limite é, por exemplo, 40 % da carga de Euler, deve-se somar à imperfeição geométrica estimada para o elemento, uma imperfeição de igual valor devida à fluência. Como o módulo de elasticidade dos bambus em geral é relativamente baixo, assim como o momento de inércia da seção transversal, tem-se uma rigidez à flexão também baixa, de forma que o problema pode se iniciar pelo controle das deflexões máximas, ou seja, por estado limite de utilização, resultado também constatado por Moreira (1998). Então, a deflexão lateral máxima pode ser dada pela Equação 4.1.2:

$$\delta = \frac{\delta_0 + \delta_f}{1 - \frac{P_{max}}{F_E}} \quad (4.1.2)$$

Neste caso, considerando-se $P_{max} = 0,4F_E$, e $\delta_f = \delta_0$, e substituindo-se na Equação 4.1.2, obtém-se uma configuração final estável com deflexão lateral máxima de $3,33\delta_0$. Então, se a imperfeição geométrica inicial do elemento é igual a 2 cm, a deflexão final será de 6,7 cm. Se o elemento tem $l = 6$ m de comprimento, então a deflexão final será igual a $\frac{l}{90}$. A questão seria investigar em cada caso se essa deflexão lateral comprometeria ou não a estética ou o mesmo o bom funcionamento da estrutura onde o elemento for aplicado, e paralelamente, verificar as tensões máximas de compressão para a carga P_{max} , para controle dos estados limites últimos.

Considerando-se os resultados satisfatórios apresentados no item 4.1.2.3, tem-se nas Figuras 4.1.14 a 4.1.25 e 4.1.26 a 4.1.37, todas as curvas PDelta e Diagramas de Southwell experimentais e numéricos, para os 12 bambus ensaiados, sendo que as curvas numéricas foram obtidas considerando-se a inércia constante igual à seção tomada no centro do elemento, considerando-se que diâmetro e espessura variem linearmente de uma extremidade à outra.

Desse modo comprova-se a validade do modelo numérico de modo a poder generalizar os resultados para diferentes bambus com diferentes relações de diâmetro e espessura de uma extremidade à outra.

Capítulo 4

Parte 2

MASTRO HÍBRIDO

INTRODUÇÃO

Este subcapítulo está organizado quanto ao projeto, modelagem e análise numérica, construção e ensaio mecânico de dois protótipos de seis metros de comprimento. Apresentam-se também a variação quanto à estrutura e com sistema de clipagem nos cabos de aço, de forma detalhada para o melhor entendimento ao longo da descrição da configuração dos mastros apresentados.

4.2.1- Projeto do Mastro

As primeiras investigações sobre mastro e outras estruturas tensionadas foram iniciadas em 2005, por Moreira *et al* (2009). Estes autores utilizaram modelos reduzidos para conduzir a uma melhor solução de projeto (Figura 4.2.1). Depois disso, estes autores testaram um mastro com 2 metros de comprimento, Figura 4.2.2, com um sistema de cruzetas (braços) no centro do bambu, dando suporte à estrutura tensionada com cabos de aço. A força resistente do mastro, obtida através do teste destrutivo mecânico foi três vezes maior do que a força resistente do bambu isolado (sem os cabos de aço).



Figura 4.2.1: Modelo em escala reduzida.



Figura 4.2.2: Protótipo de dois metros de comprimento durante o ensaio.

A partir dessa pesquisa, outras análises foram realizadas quanto à forma, dimensionamento e confecção, até a realização desta tese.

O mastro desenvolvido nesta tese tem 6 metros de comprimento, e foi projetado com uma barra central, duas cruzetas localizadas ao longo da barra central e cabos de aço conectados às extremidades da barra central, Figura 4.2.3.

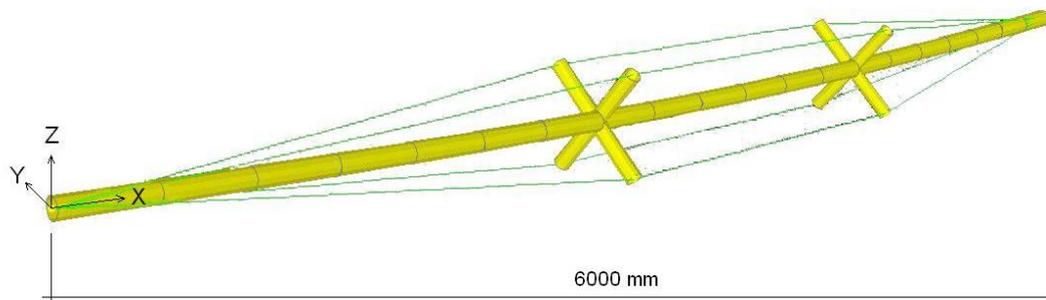


Figura 4.2.3: Configuração tridimensional do mastro.

4.2.2- Design do Primeiro Protótipo

A partir da realização de desenhos esquemáticos, análises numéricas preliminares e pré-dimensionamento, chegou-se às dimensões inicialmente avaliadas como eficientes ao projeto e bom funcionamento do mastro. Assim, deu-se início ao projeto e a fabricação do primeiro protótipo do mastro, no Laboratório de Análise Experimental de Estruturas, LAEES. As dimensões básicas foram:

- ✓ Comprimento total do mastro: 6000 mm.
- ✓ Comprimento das barras espaçadoras (braços ou cruzetas): 820 mm

- ✓ Localização das cruzetas espaçadoras ao longo do eixo principal do mastro: 2100 mm, e 3900 mm a partir da base do mastro.

A Figura 4.2.4 apresenta o esquema geométrico dessas dimensões.

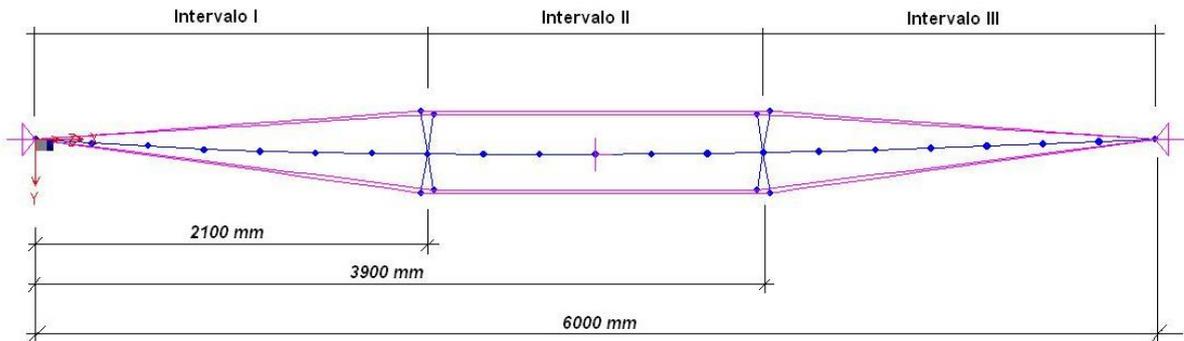


Figura 4.2.4: Esquema geométrico.

O bambu utilizado como barra central (denominado de eixo) tem suas características geométricas apresentadas na Tabela 4.2.1. As taxas entre as seções transversais das extremidades são $D1/D21=0,75$; $t1/t21=0,55$; $I1/I21=0,25$; $A1/A21=0,43$, onde os números das seções de 1 e 21 denotam as posições das seções nas extremidades da barra longitudinal. Para obtenção das geometrias das seções internas, considerou-se uma variação linear do diâmetro e da espessura de parede da base até o topo.

Tabela 4.2.1: Características geométricas e físicas do bambu.

Número da Seção	Coordenadas (mm)	Diâmetro D (mm)	Espessura da parede t (mm)	Momento de Inércia I (cm ⁴)	Área A (cm ²)
1	0	78,0	6,2	91	14,1
2	300	79,3	6,5	99	14,9
3	600	80,6	6,7	107	15,5
4	900	81,9	7,0	116	16,5
5	1200	83,2	7,3	126	17,3
6	1500	84,5	7,5	136	18,1
7	1800	85,8	7,8	147	19,1
8	2100	87,1	8,1	158	20,1
9	2400	88,4	8,3	169	20,9
10	2700	89,7	8,6	182	21,9
11	3000	91,0	8,8	194	22,7
12	3300	92,3	9,1	208	23,8
13	3600	93,6	9,3	221	24,6
14	3900	94,9	9,6	237	25,7
15	4200	96,2	9,9	253	26,8
16	4500	97,5	10,1	268	27,7
17	4800	98,8	10,4	286	28,9
18	5100	100,1	10,6	302	29,8
19	5400	101,4	10,9	322	31,0
20	5700	102,7	11,1	340	31,9
21	6000	104,0	11,4	361	33,1

Estes foram os dados inseridos no modelo numérico e utilizados nos cálculos apresentados no subitem 4.2.3.

Vê-se na Figura 4.2.5 o mastro pronto, com os braços parafusados e os cabos de aço instalados. A Figura 4.2.6 mostra um detalhe da ponteira já instalada, na qual os cabos de aço são fixos e tracionados pelos esticadores.



Figura 4.2.5: Mastro concluído.



Figura 4.2.6: Design da ponteira e detalhes de fixação.

Os cabos de aço foram pré-tensionados com auxílio de tensionador normalmente utilizado em cabos, neles instalados (Figura 4.2.7).

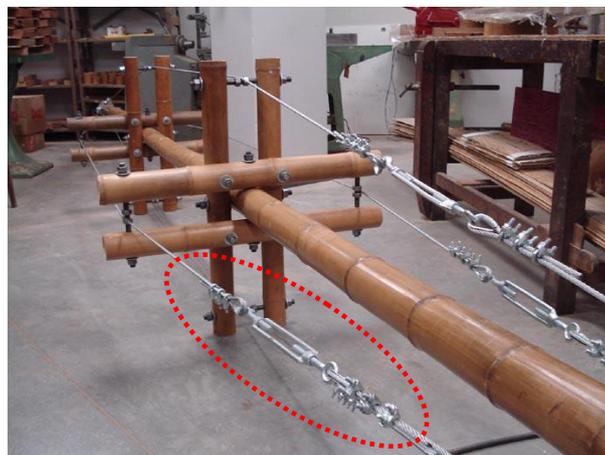


Figura 4.2.7: Detalhe dos esticadores instalados nos cabos de aço.

Após a construção do mastro, foi feita a sua instalação no pórtico de reação para o ensaio de compressão. No subitem 4.2.4 são apresentados os detalhes e os resultados do ensaio no LAEES.

4.2.3 – Análise Numérica da barra central isolada

O protótipo foi projetado com base nos resultados da análise numérica estrutural realizada via programa SAP 2000 (Computers and Structures, Inc, Berkeley, CA, 1995, versão 5.1).

Considerou-se para a análise uma imperfeição inicial $e_1 = L/150$, onde L é o comprimento da barra de bambu. Como aponta Moreira (1998), a excentricidade accidental deve ser considerada pelo menos igual ao dobro da excentricidade mínima das peças de madeira serrada, caso não haja condições de medição, que é de $L/300$. Neste caso particular, o valor resultou em $e_1 = 40$ mm. A montagem dos cabos foi feita com a barra de bambu na posição horizontal.

Assim, para o primeiro mastro analisado, as forças de gravidade deformaram o bambu em flexão com um deslocamento inicial determinado via análise numérica igual a $e_2 = 35,6$ mm, Figura 4.2.8, sendo arredondado para $e_2 = 40$ mm.

Desta forma, antes da aplicação das forças de compressão axial, considerou-se uma imperfeição inicial $\delta_0 = e_1 + e_2 = 80$ mm. As forças de 0,156 kN e 0,179 kN se referem ao peso dos cabos, escoras, parafusos, porcas, arruelas, braçadeiras e do reforço de argamassa dos diafragmas locais nas posições das cruzetas.

Considerando-se $E_b = 11,8$ GPa (MOREIRA, 1998) para o bambu e $E_a = 200$ GPa para o aço e discretização segundo a Tabela 4.2.1, a geometria inicial, Figura 4.2.8, foi determinado o diagrama de momento fletor e seu valor na seção mais solicitada (Figura 4.2.9), para o eixo do mastro considerado isoladamente.

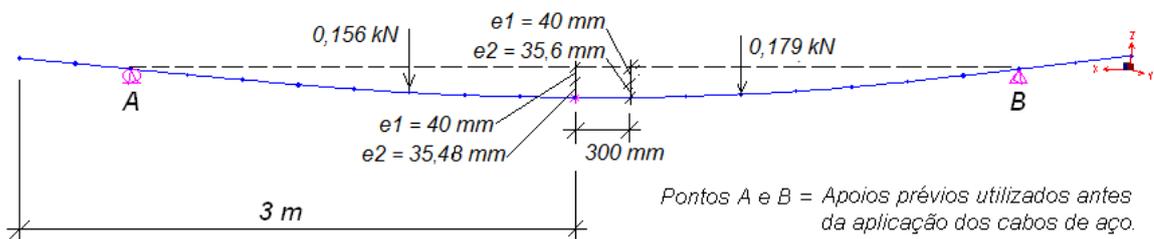


Figura 4.2.8: Configuração inicial do bambu isolado.

O momento fletor solicitante inicial é causado por cargas de gravidade antes da aplicação de forças de compressão horizontais nas extremidades do mastro. Em seguida foram introduzidos esforços solicitantes adicionais causados por forças de compressão horizontais.

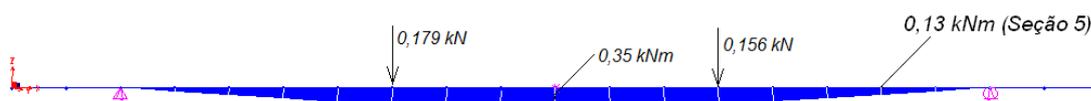


Figura 4.2.9: Momento fletor inicial no eixo do mastro sem cabos.

Outra condição de carregamento considerado é apresentada na Figura 4.2.10. Nesta análise não-linear geométrica, considerou-se a barra de bambu como um componente principal com curva de deslocamento transversal de seção no meio do vão. As Figuras 4.2.10 a 4.2.12 apresentam resultados numéricos para uma força horizontal igual $P = 4,0$ kN.

Na Figura 4.2.10 tem-se a deformada do eixo central da barra para força de 4,0 kN.

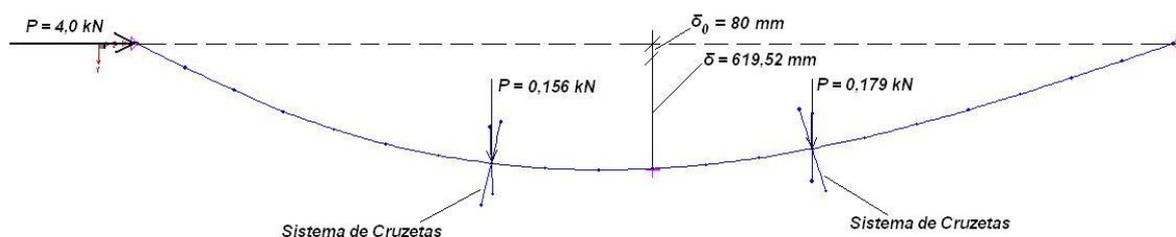


Figura 4.2.10: Deformada da barra de bambu sem os cabos de aço (fator de escala 1).

Para essa barra, tem-se: deflexão inicial, δ_0 igual a 80 mm; deslocamento de 620 mm com a força aplicada de 4,0 kN; carga de Euler F_E obtida do diagrama de Southwell igual a 5,9 kN. Para a barra de bambu, foi calculado valor médio para sua inércia $I_m = 194$ cm⁴ (seção central) Tabela 4.2.1.

Nas Figuras 4.2.11 e 4.2.12, tem-se os resultados para as forças cortantes e momento fletor para a barra isolada.

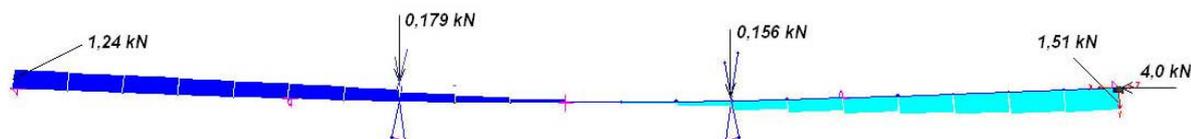


Figura 4.2.11: Força cortante na barra sem os cabos de aço.

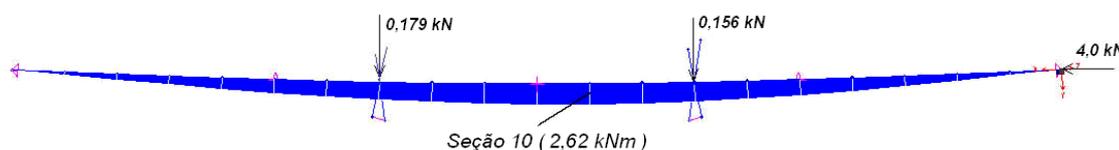


Figura 4.2.12: Momento fletor na barra sem os cabos de aço.

Nesse caso, teríamos as tensões máximas de compressão no centro da barra dada por:

$$\sigma = \frac{4}{21,9} + \frac{4,70}{182} \cdot \frac{8,97}{2} = 7,1 \frac{kN}{cm^2} = 71MPa \quad (4.2.1)$$

O valor de 71 MPa é relativamente alto e levaria o bambu ao esmagamento local. O objetivo dessa primeira modelagem com a barra isolada foi produzir valores de referência para comparação com o experimento do primeiro protótipo.

4.2.4 – Realização do Ensaio

Como observado no Capítulo 3, a instrumentação do mastro consta de duas células de carga, com capacidade de 20 kN cada, para medição das forças de tração em dois cabos de aço e uma célula de carga, com capacidade de 100 kN, para medição da força de compressão axial aplicada na barra central. Três transdutores de deslocamento mediram os deslocamentos transversais no centro da barra central. As Figuras 4.2.13 e 4.2.14 apresentam a configuração deformada sob a força máxima aplicada, que foi de $P = 10,73$ kN. A flambagem localizada apresentada pela Figura 4.2.13, que definiu a carga limite, se refere ao intervalo 1, Figura 4.2.4, entre a extremidade da parte mais esbelta do eixo e a primeira cruzeta de espaçadores.



Figura 4.2.13: Flambagem localizada no intervalo 1.

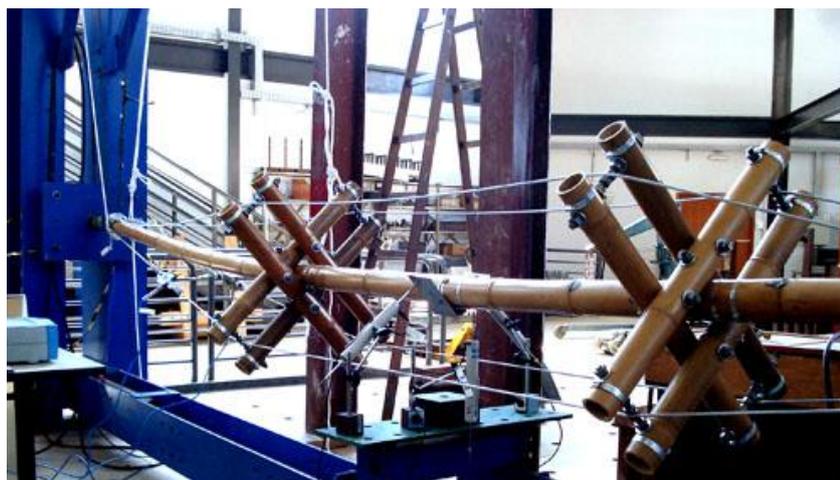


Figura 4.2.14: Flambagem global do protótipo.

Na Tabela 4.2.2 são apresentados os dados registrados durante o ensaio. A célula de carga 3 registrou a carga aplicada na barra central, enquanto que as células de carga 1 e 2 registraram a tração em dois dos quatro cabos de aço.

Tabela 4.2.2: Resultados de ensaio do primeiro protótipo do mastro.

	Tempo		Célula carga 1	Célula carga 2	Célula carga 3	DT 1	DT 2	DT 3
Etapa	Hora:	Carga N	N	N	N	mm	mm	mm
0	10:30	inicial	79	78	0,0	0,00	0,00	0,00
1	10:35	1265	729	733	1244	1,20	1,16	1,28
2	10:38	1976	754	771	1955	3,32	2,13	2,24
3	10:42	3000	800	834	2923	5,43	3,98	4,62
4	10:44	4000	864	923	3889	9,76	6,33	7,24
5	10:46	5000	949	1029	4864	13,03	9,24	10,79
6	10:48	6000	1065	1182	5900	19,36	12,89	15,29
7	10:50	7000	1224	1399	6930	30,53	18,62	23,03
8	10:52	8000	1435	1699	7834	42,64	25,61	33,09
9	10:55	9000	1700	2157	8824	61,09	34,94	46,44
10	11:06	10000	2166	2877	9894	89,67	51,74	66,77
11	11:08	10600	2796	3812	10838	121,72	70,73	89,11
12	11:34	10500	2840	3892	10521	133,41	77,00	96,10
13	11:39		2430	3227	9349	122,70	71,73	89,94
14	11:43	3500	657	580	3590	59,35	34,04	44,28
15	11:46	7000	1390	1681	6982	84,89	49,42	63,95
16	11:48	10730	3078	4228	10727	139,19	81,99	99,99
17	11:56	10500	3324	4574	10739	132,23	67,75	82,10
18	12:03	5400	1095	1244	5435	71,88	27,93	41,05
19	12:12	40	344	267	404	9,17	-1,02	-20,18

Na Figura 4.2.15 pode-se observar a evolução da força aplicada na barra principal e as forças de tração nos cabos de aço onde estavam instaladas as células de carga 1 e 2, que se comportaram de maneira bastante similar. Na Figura 4.2.16, tem-se a curva carga vs deslocamento vertical na seção central do protótipo do mastro, registrado experimentalmente.

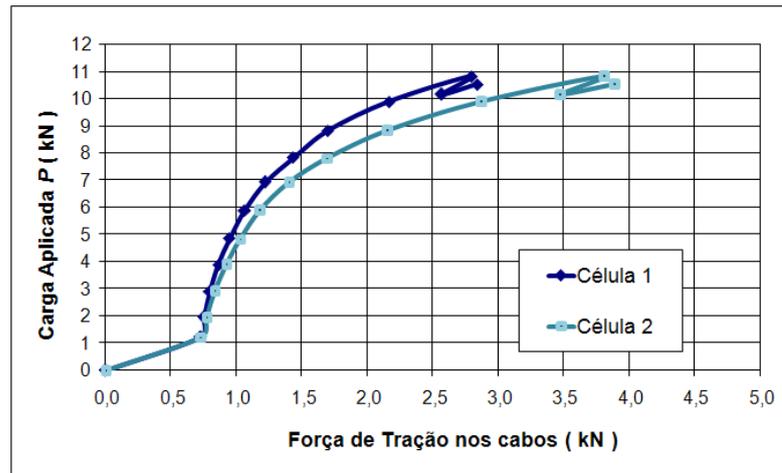


Figura 4.2.15: Carga aplicada vs carga nos cabos.

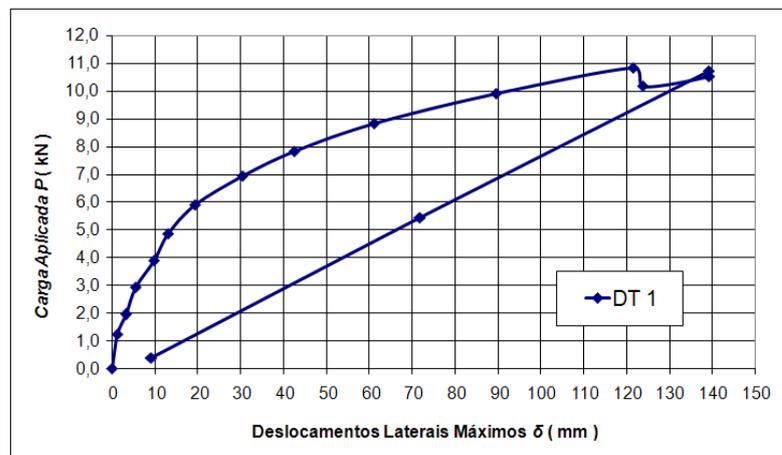


Figura 4.2.16: Curva carga vs deslocamento transversal (experimental).

Na Figura 4.2.17 observa-se uma sobreposição das curvas de carga vs deslocamento vertical na seção central do protótipo do mastro, registrado numérica e experimentalmente.

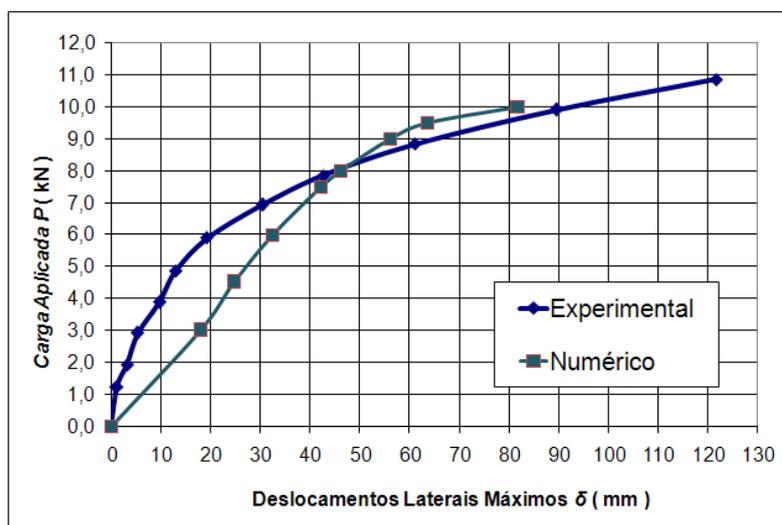


Figura 4.2.17: Sobreposição das curvas PDelta (numérico e experimental).

4.2.5 – Análise numérica do primeiro protótipo do mastro

Os bambus foram modelados como elementos de barra, pipe, com seção transversal constante por segmento de 30 cm, a partir da Tabela 4.2.1. A análise realizada foi não linear geométrica, com consideração dos efeitos PDelta (2ª ordem). Para o bambu, considerou-se $E = 11,8$ GPa, e para os cabos de aço $E = 200$ GPa. Foram considerados os cabos de aço com 6,2 mm de diâmetro efetivo, e pré-tensionados antes do ensaio, com um valor de 0,08 kN. Tem-se então nas Figuras 4.2.18 a 4.2.21, a modelagem numérica do primeiro mastro híbrido ensaiado, e seus respectivos resultados para uma força aplicada próxima à carga máxima do teste experimental ($P = 10,0$ kN).

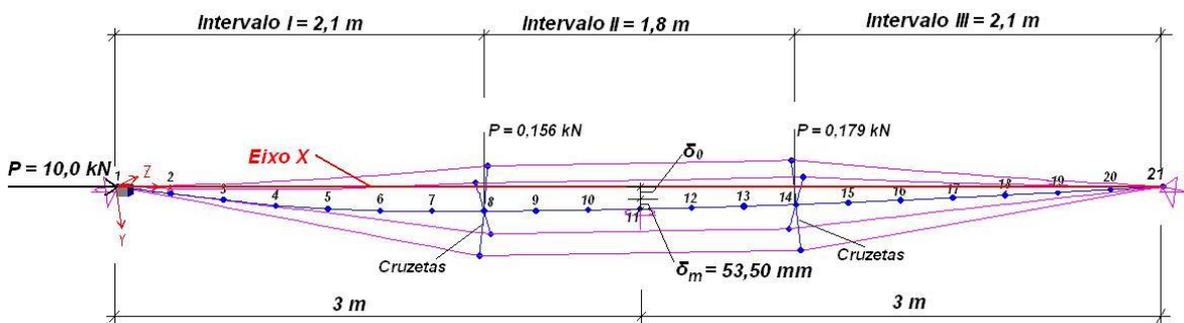


Figura 4.2.18: Configuração deformada teórica no mastro.

A distância total entre o eixo x e o centro de gravidade do bambu foi de:

$$\delta = \delta_0 + \delta_m = 80 + 53,5 = 133,5 \text{ mm.}$$

Observa-se que o valor de 133,5 mm é bem menor que aquele apresentado na análise numérica do bambu isolado, sem cabos de aço, quando mostrou uma deflexão transversal de 619 mm (Figura 4.2.10). Vê-se na Figura 4.2.19, os resultados numéricos para forças axiais correspondentes à carga aplicada $P = 10,0$ kN.

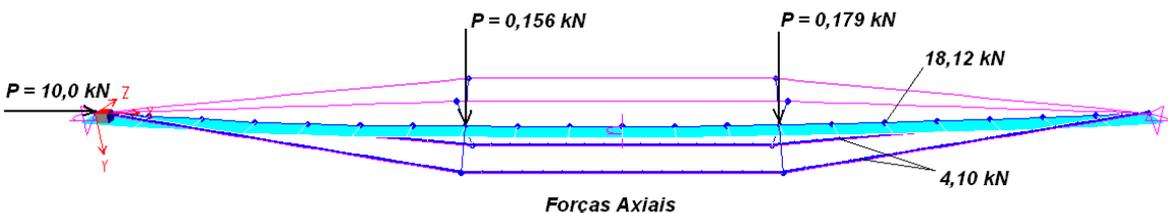


Figura 4.2.19: Forças axiais e forças transversais.

Na Figura 4.2.20 são apresentadas as forças cortantes solicitantes obtidas pela simulação numérica, para a força aplicada $P = 10,0$ kN.

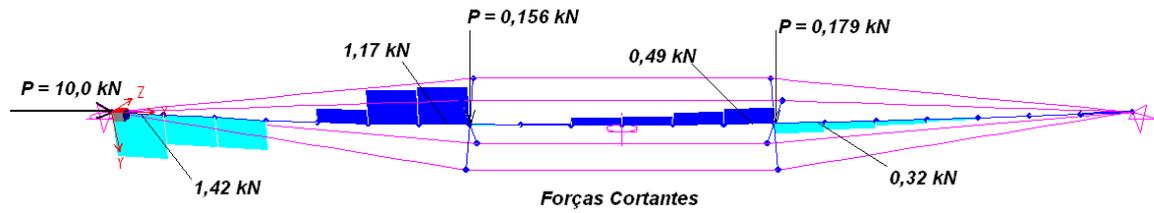


Figura 4.2.20: Forças cortantes.

Na Figura 4.2.21 é possível observar o momento fletor obtido da simulação numérica, para a seção 4 (Intervalo I). A força aplicada na simulação ($P = 10,0$ kN) tem valor bem próximo ao da força máxima aplicada no ensaio experimental, isto é, $P = 10,73$ kN.

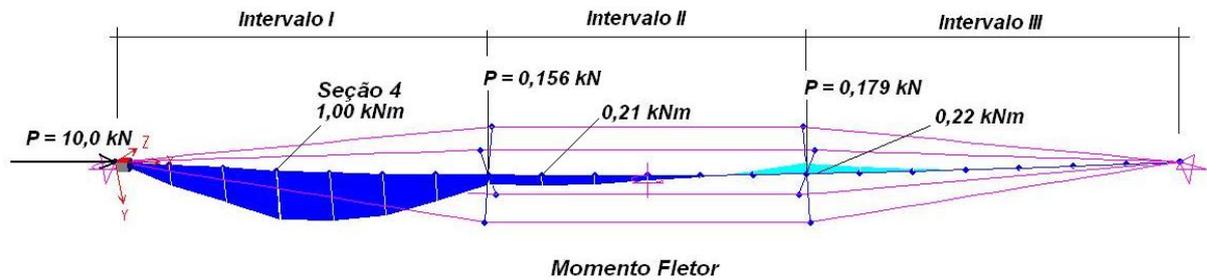


Figura 4.2.21: Momento fletor.

Considerando-se os valores apresentados nas Figuras 4.2.19 e 4.2.21 e as medidas apresentadas na Tabela 4.2.1, podem-se estimar as tensões máximas de compressão paralela às fibras na seção 4:

$$\sigma = \frac{P}{A} + \frac{(M_f)D}{2I} \quad (4.2.2)$$

Tem-se:

$$\sigma_{\max} = \frac{18,12}{16,5} + \frac{(100)8,19}{2 \times 116} = 4,63 \frac{kN}{cm^2} = 46,3 MPa \quad (4.2.3)$$

Para o intervalo I, tem-se a esbeltez média igual a:

$$\lambda_l = \frac{210}{\sqrt{\frac{119}{16,6}}} = 78,5$$

Esse valor para bambus já permite que a barra central seja classificada como barra esbelta (MOREIRA, 1998). O valor relativamente baixo das tensões máximas de compressão, 46MPa, indica que a força de 10 kN está muito próxima da carga de Euler do sistema. O

problema acentuou-se no intervalo I pois as cruzetas foram posicionadas próximas ao centro do mastro. Aqui houve um inconveniente: mastro e modelagem foram feitos simultaneamente, e a má distribuição das cruzetas foi detectada com o mastro já fabricado. Desse modo, o intervalo I ficou mais esbelto do que os demais intervalos:

$$\lambda_I = \frac{210}{\sqrt{\frac{119}{16,6}}} = 78,5 \quad \lambda_{II} = \frac{180}{\sqrt{\frac{176}{21,4}}} = 62 \quad \lambda_{III} = \frac{210}{\sqrt{\frac{247}{28,3}}} = 71$$

atraindo para aquele intervalo a instabilidade global.

O aumento da força atinge o valor crítico, como se observou no gráfico da Figura 4.2.16. Um novo deslocamento, pequeno que fosse, levaria ao colapso do mastro na seção 4, Figura 4.2.21. O ensaio destrutivo não foi objetivo do experimento.

A força limite para o mastro no experimento é de 10,73 kN com um deslocamento lateral $\delta = 139,19$ mm e a força limite estimada numericamente para a barra isolada (sem os cabos de aço) é de 4,0 kN com um deslocamento lateral $\delta = 700$ mm.

Conjugando-se os resultados experimentais com a modelagem numérica deste primeiro mastro, pode-se concluir que:

- ✓ As cruzetas espaçadoras deveriam ser localizadas em distâncias tais que cada um dos três intervalos tivessem a mesma esbeltez média;
- ✓ As cruzetas deveriam ter o comprimento aumentado para se diminuir o risco de flambagem localizada do intervalo de menores diâmetros e aumentar a carga de Euler do sistema.

Traçando-se os Diagramas de Southwell numérico e experimental para o mastro, Figuras 4.2.22 e 4.2.23, respectivamente, obtém-se as cargas de Euler $F_E = 13,0$ kN ($\delta_0 = 24,4$ mm) e $F_E = 12,4$ kN ($\delta_0 = 21,7$ mm).

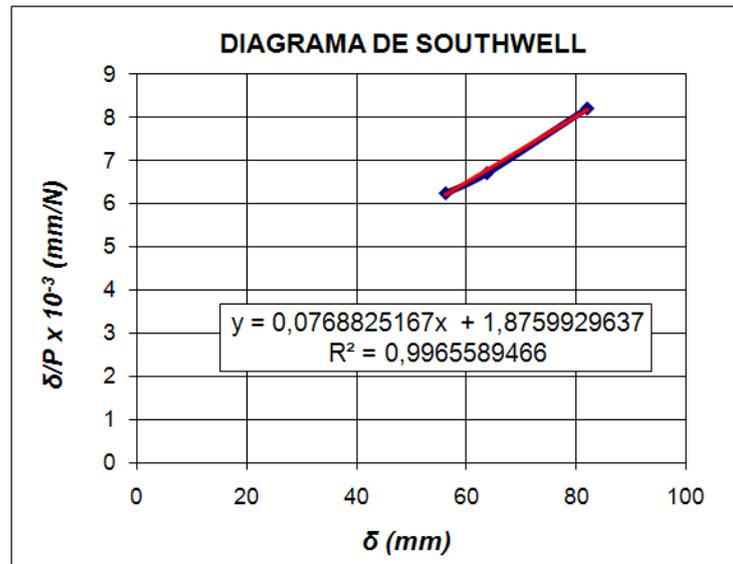


Figura 4.2.22: Diagrama de Southwell (numérico) ($F_E = 13,0 \text{ kN}$).

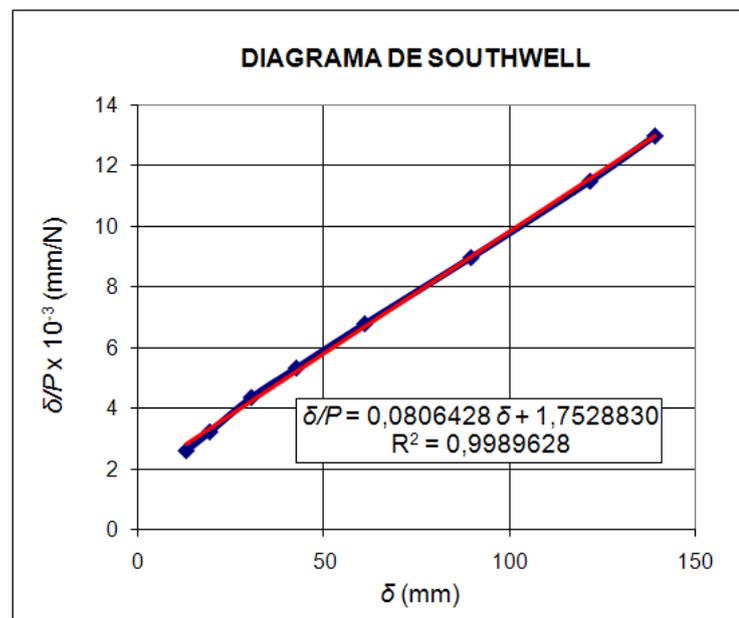


Figura 4.2.23: Diagrama de Southwell (experimental) ($F_E = 12,4 \text{ kN}$).

Este primeiro experimento permitiu constatar que:

- ✓ O design do mastro era eficaz e podia ser otimizado para ganho de design e desempenho estrutural.
- ✓ Esta otimização consistiria na distribuição das cruzetas espaçadoras de modo que os valores de esbeltez dos intervalos fossem aproximadamente os mesmos e no aumento do comprimento das cruzetas.
- ✓ A pré-tensão dos cabos deveria ser aumentada para prevenir a relaxação dos cabos sujeitos à tração em serviço, evitando-se também o afrouxamento dos cabos descarregados.

- ✓ A segurança destes mastros era totalmente dependente do controle dessas variáveis (relaxação dos cabos, fluência dos bambus) e da acomodação dos parafusos e cabos de aço conforme a carga aplicada.

A partir destas considerações, partiu-se para a fabricação do segundo protótipo.

4.2.6 – Fabricação do Segundo Protótipo

A fabricação iniciou-se logo após o ensaio e publicação dos resultados do primeiro mastro, no *XIII NOCMAT - International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies*, (SILVA, MOREIRA e RODRIGUES, 2011) ocorrido em Changsha (China), em Setembro de 2011. As simulações no modelo numérico permitiram chegar a algumas conclusões quanto ao dimensionamento do segundo protótipo, em relação às cruzetas e suas posições na barra principal.

A escolha adequada da barra principal é fundamental, visto que quanto menor a imperfeição geométrica inicial, melhor será o desempenho da estrutura. Assim, com a ajuda de um aparelho de raio laser comum (caneta laser utilizada por palestrantes), pode-se verificar dentre as barras disponíveis, qual delas tinha a menor imperfeição geométrica inicial. Pode-se observar nas Figuras 4.2.24 a 4.2.26 o uso do laser para verificação da imperfeição inicial, inclusive para inserção dos dados nos cálculos posteriores.

O procedimento foi simples: fixou-se a caneta laser numa extremidade da barra de bambu, e “mirou-se” o feixe luminoso na outra extremidade. E ao passar paralelamente ao eixo da barra, pode-se medir, ainda que grosseiramente, a distância entre o feixe luminoso e a parede externa da seção central do bambu, de modo que esta medida aproximada foi considerada como a imperfeição inicial da barra do bambu.



Figura 4.2.24: Feixe luminoso durante a medição da imperfeição inicial do bambu.



Figura 4.2.25: Extremidade do feixe luminoso na medição da imperfeição inicial do bambu.



Figura 4.2.26: Medição da imperfeição inicial do bambu.

As medidas da barra de bambu podem ser observadas na Tabela 4.2.3.

Tabela 4.2.3: Características geométricas da barra do bambu do segundo protótipo:

Número da Seção	Coordenada X (mm)	Diâmetro D (mm)	Espessura da parede t (mm)	Momento de Inércia I (cm ⁴)	Área (cm ²)
1	0 (extremo)	78,1	7,6	106	16,9
2	200	80,0	7,8	116	17,5
3	400	79,8	7,9	125	18,2
4	600	81,3	8,1	135	18,8
5	800	81,7	8,2	144	19,4
6	1000	83,6	8,4	153	20,0
7	1200	83,3	8,5	163	20,6
8	1400	83,5	8,7	172	21,2
9	1600	83,7	8,8	182	21,8
10	1800	86,8	9,0	191	22,4
11	2000	86,2	9,1	200	23,0
12	2200	90,1	9,2	210	23,6
13	2400	87,9	9,4	219	24,3
14	2600	89,4	9,5	229	24,8
15	2800	92,1	9,7	274	25,4
16	3000	90,3	9,8	247	26,1
17	3200	92,8	10,0	257	26,7
18	3400	91,7	10,1	266	27,3
19	3600	92,7	10,3	275	27,9
20	3800	96,3	10,4	385	28,5
21	4000	95,4	10,6	294	29,1
22	4200	96,5	10,7	304	29,7
23	4400	100,3	10,8	313	30,3
24	4600	100,4	11,0	322	30,9
25	4800	98,7	11,1	332	31,5
26	5000	98,8	11,3	341	32,1
27	5200	99,2	11,4	351	32,7
28	5400	100,6	11,6	360	33,3
29	5600	101,6	11,7	369	33,9
30	5800	102,8	11,9	379	34,6
31	6000 (extremo)	105,2	12,0	388	35,2

Realizadas as medições (com a caneta laser para imperfeição inicial e com paquímetro para diâmetro e espessura) e com a menor imperfeição (10 mm) determinada, iniciaram-se os cortes, furos e montagem das peças.

As cruzetas foram posicionadas conforme Figura 4.2.27 e as dimensões básicas foram:

- ✓ Comprimento do eixo principal do mastro: 6000 mm.
- ✓ Comprimento dos espaçadores (braços): 1320 mm (entre extremidades).
- ✓ Localização dos braços no eixo principal: 1700 mm e 3700 mm a partir da extremidade de menor diâmetro do bambu.

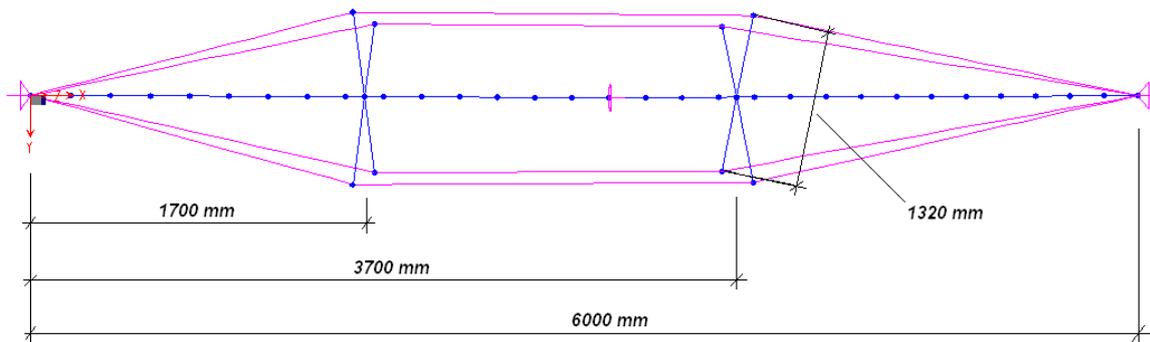


Figura 4.2.27: Dimensões do segundo protótipo.

Os diâmetros médios e espessuras das paredes das extremidades da barra central, registradas com paquímetro, são apresentados na Tabela 4.2.4:

Tabela 4.2.4: Diâmetros e espessuras da barra central:

Item medido:	Extremidade do topo	Extremidade da base
Diâmetro médio	78,12 mm	105,21 mm
Espessura média	7,65 mm	12,01 mm
Diâmetro Interno	62,82 mm	81,19 mm
Área Efetiva	16,94 cm ²	35,17 cm ²

Nesta Tabela 4.2.5, tem-se uma comparação entre as características geométricas dos bambus utilizados como eixo central na construção dos dois protótipos dos mastros híbridos:

Tabela 4.2.5: Comparação entre as características geométricas dos bambus 1 e 2:

Bambu	Bambu 1		Bambu 2	
	Topo	Base	Topo	Base
Extremidade				
Diâmetro médio (mm)	78,0	104,0	78,1	105,2
Espessura média da parede (mm)	6,25	11,4	7,7	12,0
Diâmetro interno (mm)	65,5	81,2	62,8	81,2
Momento de Inércia (cm ⁴)	91,0	361,0	106,4	388,2
Área efetiva (cm ²)	14,1	33,1	16,9	35,2

A Tabela 4.2.6 apresenta uma comparação entre as cargas numéricas limites e a deflexão destes dois bambus:

Tabela 4.2.6: Bambus 1 e 2: comparação das cargas limites numéricas e deflexão total.

Bambu usado como eixo	Deflexão inicial	Posição Horizontal		
	δ_0 (mm)	P_l (kN)	F_E (kN)	δ (mm)
Bambu 1	80	4,0	5,9	620
Bambu 2	10	7,35	8,2	527

Na Figura 4.2.28, tem-se o deslocamento máximo da simulação numérica, para força $P = 7,35$ kN para a barra central, sem os cabos de aço.

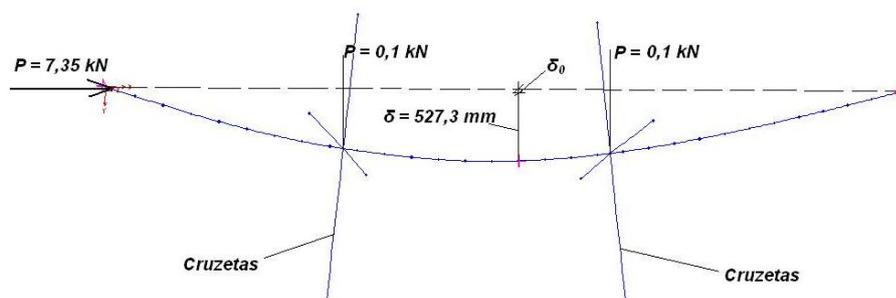


Figura 4.2.28: Configuração deformada da barra central sem os cabos (fator de escala 1).

Foram aplicadas também duas forças de 0,1 kN cada, nos centros das cruzetas, correspondentes aos pesos dos acessórios (porcas, parafusos, arruelas, braçadeira, cabo de aço, esticador). A Figura 4.2.29 apresenta a configuração deformada do mastro obtida com a simulação numérica.

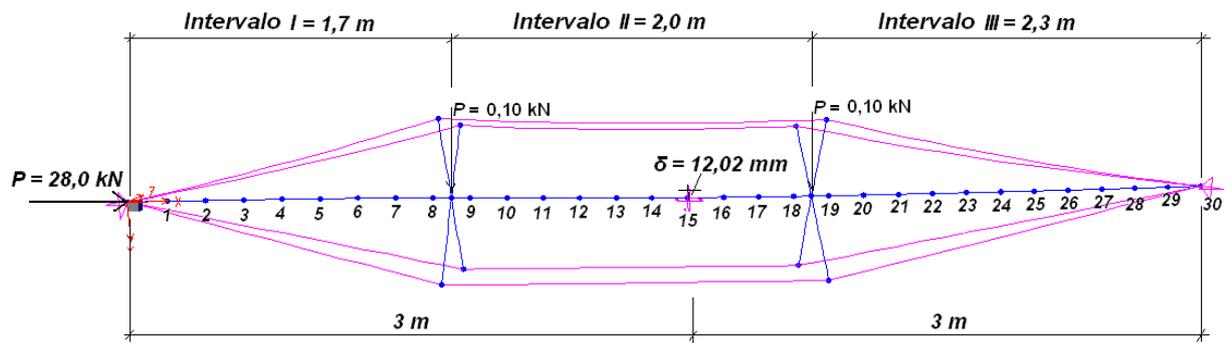
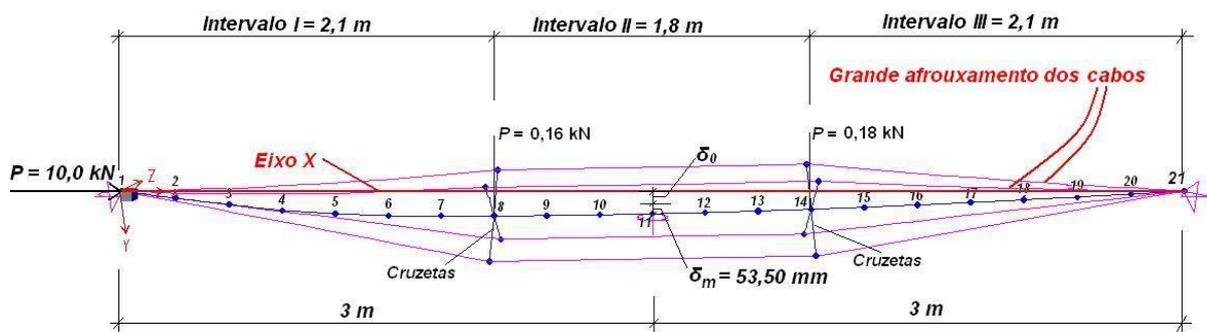
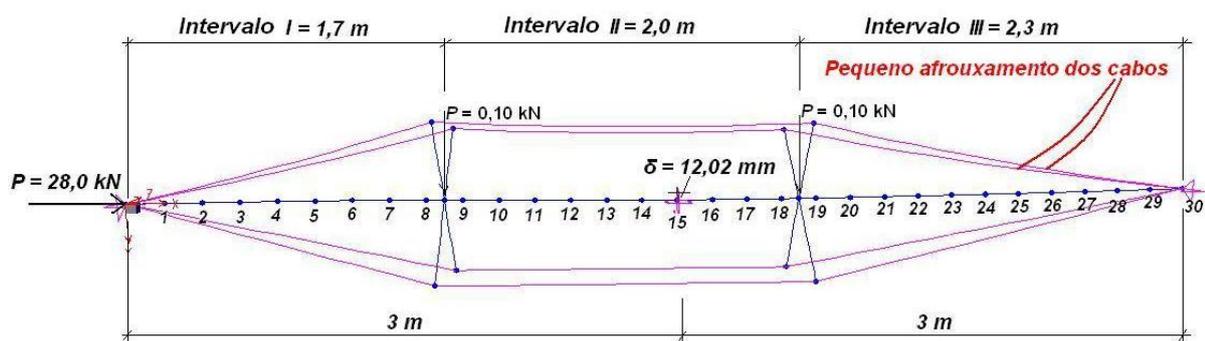


Figura 4.2.29: Configuração deformada do protótipo do mastro (numérico).

A Figura 4.2.30 mostra os dois protótipos dos mastros modelados para uma força aplicada próximo à correspondente da carga máxima experimental. Para o protótipo 1, $P_{lim} = 10,0$ kN, e para o protótipo 2, $P_{lim} = 28,0$ kN.



Protótipo 1 do Mastro



Protótipo 2 do Mastro

Figura 4.2.30: Mastros modelados com força aplicada correspondente à carga máxima experimental.

As Figuras 4.2.31 a 4.2.33 apresentam os esforços solicitantes do modelo numérico do segundo protótipo e seus resultados para $P = 28,0$ kN.

Na Figura 4.2.31 tem-se as forças axiais. Vê-se que nos cabos de aço, a força de tração máxima atinge 1,60 kN, enquanto que no eixo da barra, a força de compressão atinge 31,24 kN. A pré-tensão aplicada aos cabos foi de 1,72 kN.

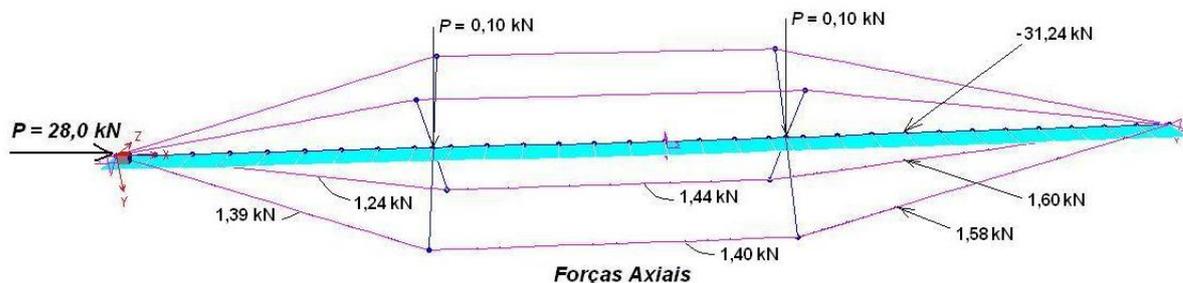


Figura 4.2.31: Diagrama de forças axiais.

A Figura 4.2.32 mostra as forças cortantes. O cortante máximo ocorreu próximo à seção 9, com uma força de 0,31 kN.

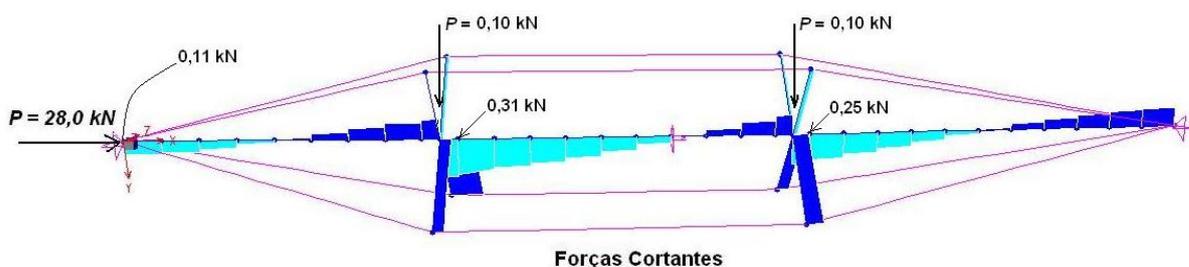


Figura 4.2.32: Diagrama de forças cortantes.

Na Figura 4.2.33 tem-se uma estimativa do momento fletor máximo igual a 0,06 kNm ocorrido próximo à seção nº 5, localizada no centro do intervalo mais esbelto (intervalo I), e assim mais propício ao esmagamento da barra do bambu.

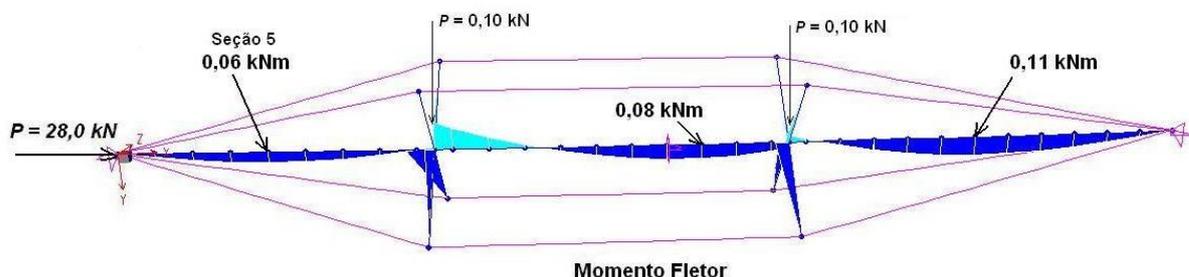


Figura 4.2.33: Diagrama de momentos fletores.

No segundo protótipo foi dispensado o enchimento de alguns internós com argamassa de reforço.



Figura 4.2.34: Detalhe construtivo do segundo protótipo.



Figura 4.2.35: Segundo protótipo com os cabos de aço instalados.

Na Figura 4.2.36 vê-se o protótipo do mastro já posicionado no pórtico de reação. E as Figuras 4.2.37 e 4.2.38 mostram a instrumentação (transdutores de deslocamento = *DTs*) posicionados na seção central para medição das deflexões.



Figura 4.2.36: Segundo protótipo do mastro no pórtico de reação.



Figura 4.2.37: Instalação dos *DTs* (transdutores de deslocamento), vista 1.



Figura 4.2.38: Instalação dos *DTs*, vista 2.

4.2.7- Ensaio do Segundo Protótipo: resultados experimentais e numéricos

O ensaio de compressão (teste de flambagem) realizado no LAEES contou com a instrumentação necessária para registro das cargas aplicadas e deslocamentos. Foram utilizadas como no primeiro protótipo: duas células de carga (com capacidade de 20 kN cada) medindo as forças de tração nos cabos de aço e uma célula de carga (com capacidade de 100 kN) medindo a força de compressão aplicada, e três transdutores registrando deslocamentos transversais na seção do centro da barra central. Os resultados podem ser observados nas Tabelas 4.2.7 e 4.2.8, dos dois ensaios realizados com o segundo protótipo.

Tabela 4.2.7: Dados registrados no primeiro ensaio de compressão do segundo protótipo.

ETAPA	Carga N	cel.carga 1	cel.carga 2	DT-1	DT-2	DT-3
	inicial	N	N	(mm)	(mm)	(mm)
0	-194	1722	1721	0,00	0,00	0,00
1	-3985	1524	1519	0,01	0,27	0,02
2	-6221	1437	1422	0,18	0,49	0,21
3	-9172	1337	1315	0,46	0,88	0,51
4	-12242	1267	1427	1,05	1,57	0,97
5	-15122	1230	1245	1,95	2,65	1,53
6	-18261	1311	1268	3,27	4,29	2,57
7	-21085	1344	1315	4,77	6,06	3,50
8	-24498	1463	1345	6,76	8,44	4,98
9	-27294	1601	1485	8,97	11,02	6,45
10	-27852	1872	1680	12,68	16,46	9,57
11	-29204	1958	1666	14,86	19,56	11,18
DESCARGA						
0	-28335	1921	1689	14,78	19,24	11,03
1	-17106	1796	1918	7,81	10,28	6,16
2	-9954	1917	2083	5,84	7,65	4,71
3	-5781	2035	2200	5,02	6,62	4,19
4	-2633	2125	2282	4,49	5,97	3,90
5	-6	2157	2319	4,03	5,55	3,75

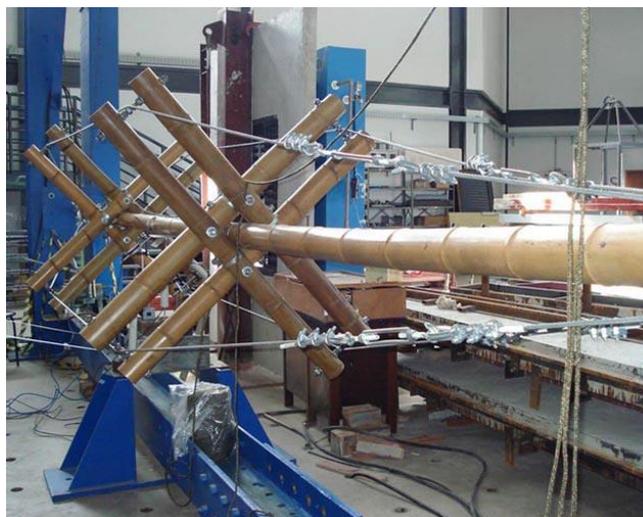
Tabela 4.2.8: Dados registrados no segundo ensaio de compressão do segundo protótipo.

ETAPA	Carga N	cel.carga 1	cel.carga 2	DT-1	DT-2	DT-3
	inicial	N	N	(mm)	(mm)	(mm)
0	-70	2019	2174	0	0,00	0,00
1	-3206	1846	1996	-0,03	0,18	0,00
2	-6240	1700	1857	0,22	0,45	0,08
3	-9236	1579	1726	0,63	0,90	0,29
4	-12215	1480	1619	1,11	1,46	0,62
5	-15212	1411	1530	1,77	2,24	1,06
6	-18193	1387	1476	2,65	3,34	1,71
7	-21264	1421	1459	3,87	4,96	2,69
8	-24193	1527	1525	5,96	7,64	4,34
9	-27239	1739	1608	9,59	12,31	6,82
10	-28643	2052	1778	14,59	19,45	11,15
DESCARGA						
0	-28341	2036	1774	14,78	19,24	11,03
1	-19437	1687	1805	7,81	10,28	6,16
2	-13545	1729	1907	5,84	7,65	4,71
3	-6581	1899	2086	5,02	6,62	4,19
4	-2294	2037	2214	4,49	5,97	3,90
5	-40	2083	2255	4,03	5,55	3,75

Vê-se nas Figuras 4.2.39 e 4.2.40, os modos de flambagem para a carga $P = 29,2$ kN, (1º ensaio do segundo mastro). A Figura 4.2.39, numa vista em ângulo de extremidade, mostra uma deformada na forma de “S” do eixo principal do mastro, durante o ensaio (flambagem global no plano horizontal na forma de duas semi-ondas do tipo senoidal com ponto de inflexão na seção central da barra), enquanto na Figura 4.2.40 vê-se a flambagem no plano vertical.



Figura 4.2.39: Vista em ângulo de extremidade.

Figura 4.2.40: Vistas do modo de flambagem ($P = 29,2$ kN).

A Figura 4.2.41 apresenta as forças nos cabos de aço tracionados em função da força axial aplicada na barra central. No início do ensaio, a tração no cabo nº1 (célula 1) estava em 1,72 kN, e diminuiu até 1,23 kN, aumentando ao final para cerca de 1,95 kN. Durante o descarregamento do mastro, pode-se notar o aumento da força de tração nos cabos de aço (Figura 4.2.42), que retorna a 1,91 kN, e assume o valor final de 2,15 kN.

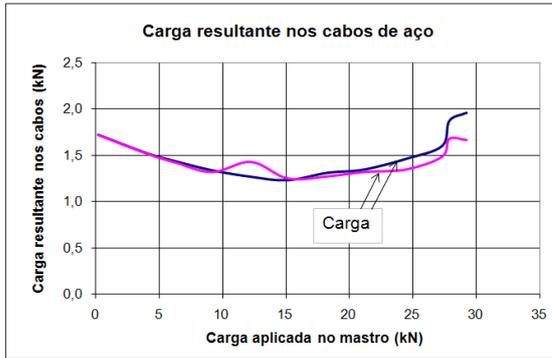


Figura 4.2.41: Forças nos cabos de aço (apenas carregamento).

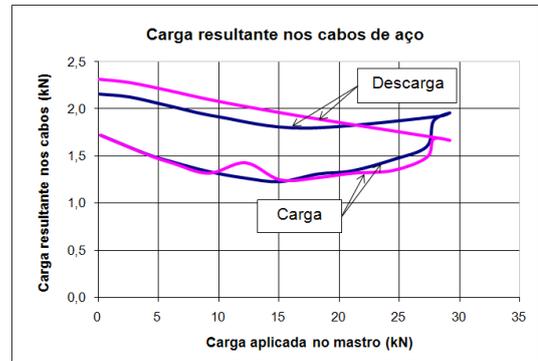


Figura 4.2.42: Forças nos cabos de aço (carga e descarga).

A Figura 4.2.43 mostra a sobreposição das curvas PDelta (resultados numérico e experimental) do segundo protótipo até a carga limite, próxima de 30 kN. E a Figura 4.2.44 mostra a curva PDelta na seção central. Na descarga, registrou-se um deslocamento residual de 1,42 mm. Até então, ainda que cabos de aço relaxem e os bambus pudessem fluir em flexão, associou-se a energia consumida entre a carga e a descarga, aos deslocamentos permanentes registrados.

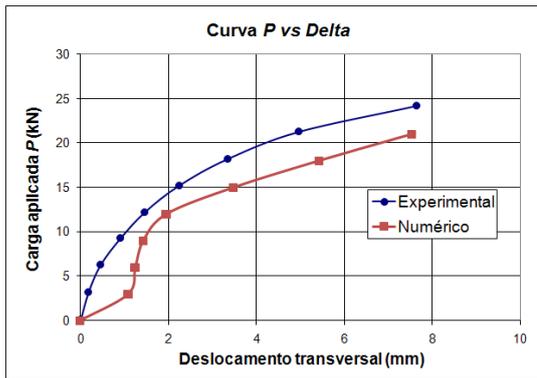


Figura 4.2.43 Sobreposição das curvas PDelta (numérico e experimental).

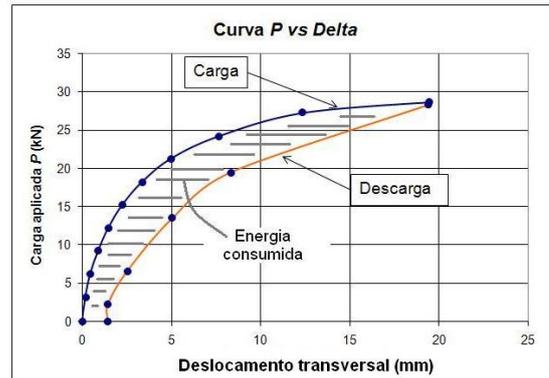


Figura 4.2.44: Curva Carga vs deslocamento transversal (carregamento e descarregamento).

As Figuras 4.2.45 e 4.2.46 apresentam os Diagramas de Southwell para a análise numérica e análise experimental:

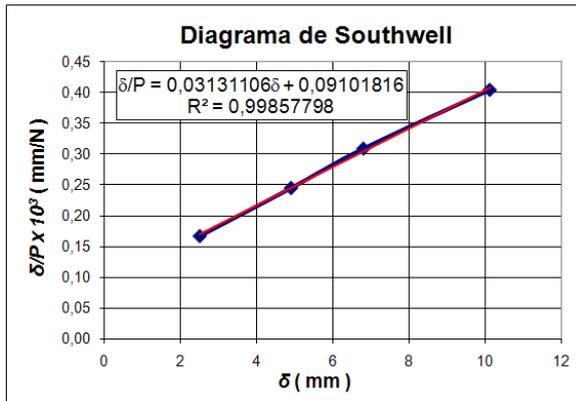


Figura 4.2.45: Diagrama de Southwell (numérico), $F_E = 31,94$ kN

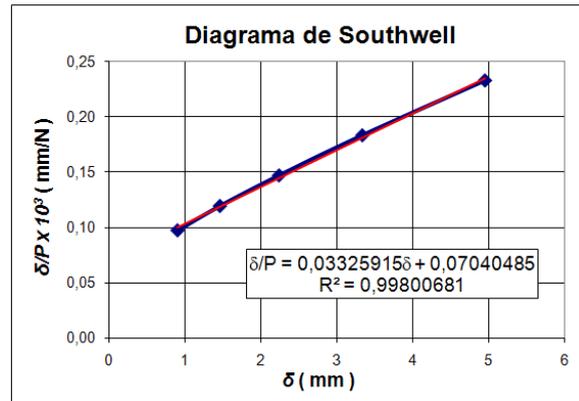


Figura 4.2.46: Diagrama de Southwell (experimental) $F_E = 30,1$ kN

Sabendo que o inverso da inclinação da reta no Diagrama de Southwell é a carga de Euler F_E do sistema, para este novo mastro, tem-se:

Análise numérica:

$$F_E = \frac{1}{0,03131106} = 31,94 \text{ kN} \quad (4.2.4)$$

, com $\delta_0 = 2,88$ mm

Experimental:

$$F_E = \frac{1}{0,03325915} = 30,1 \text{ kN} \quad (4.2.5)$$

, com $\delta_0 = 2,12$ mm

Quanto ao esmagamento das fibras paralelas à força aplicada, considerando-se os resultados obtidos para a seção 5 (a 520 cm da extremidade de menor diâmetro), tem-se:

$$P = 31,24 \text{ kN (numérico), Figura 4.2.31}$$

$$A = 30,9 \text{ cm}^2$$

$$M = 0,06 \text{ kNm} = 6 \text{ kNcm, Figura 4.2.33}$$

$$D = 8,17 \text{ cm}$$

$$I = 144 \text{ cm}^4$$

Assim, pode-se estimar as tensões longitudinais nas fibras paralelas em compressão máxima, pela equação:

$$\sigma = \frac{P}{A} + \frac{(M)D}{2I} \quad (4.2.6)$$

Tem-se:

$$\sigma_{\max} = \frac{31,34}{19,4} + \frac{(6)8,17}{2 \times 144} = 1,785 \frac{kN}{cm^2} = 17,8MPa \quad (4.2.7)$$

Estas tensões relativamente baixas demonstram a eficiência do novo design.

Analisando-se estes resultados, pode-se considerar que:

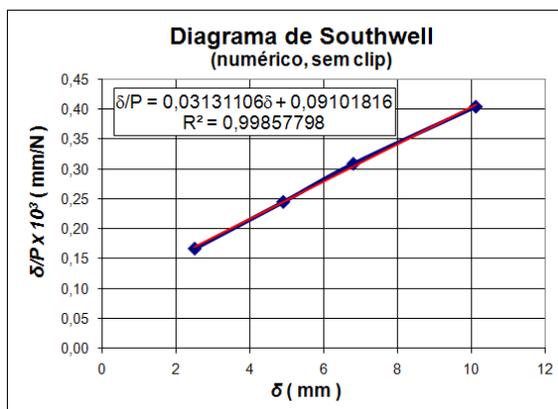
- a) O mastro é uma estrutura híbrida pré-tensionada. Neste sentido, a resposta mecânica na flambagem envolve dois parâmetros difíceis de serem controlados ou medidos: a imperfeição geométrica inicial da barra e a tensão inicial nos cabos de aço.
- b) A comparação entre os diagramas de Southwell experimental e numérico demonstram que o mastro pode ser modelado com precisão, segundo a modelagem proposta.
- c) Nos protótipos testados, os cabos de aço ficaram livres para se moverem longitudinalmente em relação ao ponto de contato com os parafusos nas cruzetas. Qual seria o comportamento do mastro se os cabos fossem fixos às cruzetas?
- d) A modelagem numérica proposta pode ser utilizada para esse tipo de mastro.
- e) O mastro híbrido com cabos de aço, por ser um sistema protendido, deve considerar a fluência do bambu e a relaxação dos cabos. Como a força máxima de tração nos cabos é relativamente baixa, a relaxação tende a ser desprezável! O mesmo não se pode dizer da fluência dos bambus nos trechos arqueados.
- f) Por todas essas características, o mastro híbrido torna-se uma solução complexa que exige conhecer seu comportamento por meio de análises numéricas. Por outro lado, em termos práticos, este mastro torna-se uma opção sofisticada, que escapa, embora não elimine, aos objetivos de acessibilidade, que caracterizam os sistemas construtivos com o bambu em estado natural.
- g) Por outro lado, a detecção da influência da fluência e da relaxação do bambu por cisalhamento paralelo às fibras, abre um campo de investigação específico, que ultrapassa muito o escopo desta tese. Essas conclusões foram suficientes para que os primeiros estudos desviassem a investigação de fluência em flexo-compressão de bambus isolados.
- h) Antes, porém, foi utilizado um terceiro experimento com o mastro híbrido, onde os cabos de aço foram clipados às cruzetas espaçadoras, solução diferente dos dois

experimentos anteriores, onde os cabos somente foram fixos às extremidades dos bambus.

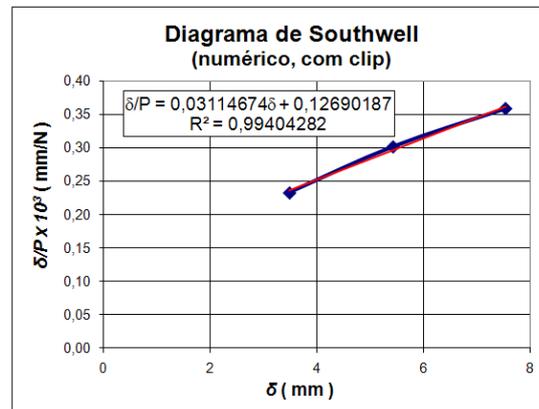
A modelagem numérica nesse caso foi mais fiel ao protótipo – ver cruzetas – . A amplitude da imperfeição geométrica inicial do bambu foi considerada igual a $\delta_0 = 20$ mm.

Na Figura 5.2.47 tem-se a comparação dos Diagramas de Southwell para o segundo mastro híbrido, sem clip (Figura 5.2.47a) e com clip (Figura 5.2.47b), de onde se obtém respectivamente $F_E = 31,9$ kN ($\delta_0 = 2,88$ mm) e $F_E = 32,1$ kN ($\delta_0 = 4,07$ mm).

A Figura 4.2.48 mostra outra modelagem numérica do mastro híbrido com aplicação de clip nas extremidades dos cabos de aço, para uma força $P = 38$ kN. A pré-tensão dada aos cabos de aço foi de 0,24 kN. A nova modelagem proposta, com relação às cruzetas, tornou os modelos numéricos mais rígidos que os anteriores. Os modelos anteriores, em que as cruzetas foram simplificadas em um único “X” em cada posição, acompanharam com boa precisão o comportamento do protótipo, pois a flexibilidade em flexão das cruzetas simulou o deslizamento dos cabos. A pergunta a ser respondida, com o enrijecimento das cruzetas, é: esta modelagem permite simular o mastro clipado? Ou seja, o mastro clipado irá suportar 38 kN de força axial aplicada?



a) Mastro sem clip.



b) Mastro com clip.

Figura 4.2.47: Diagramas de Southwell.

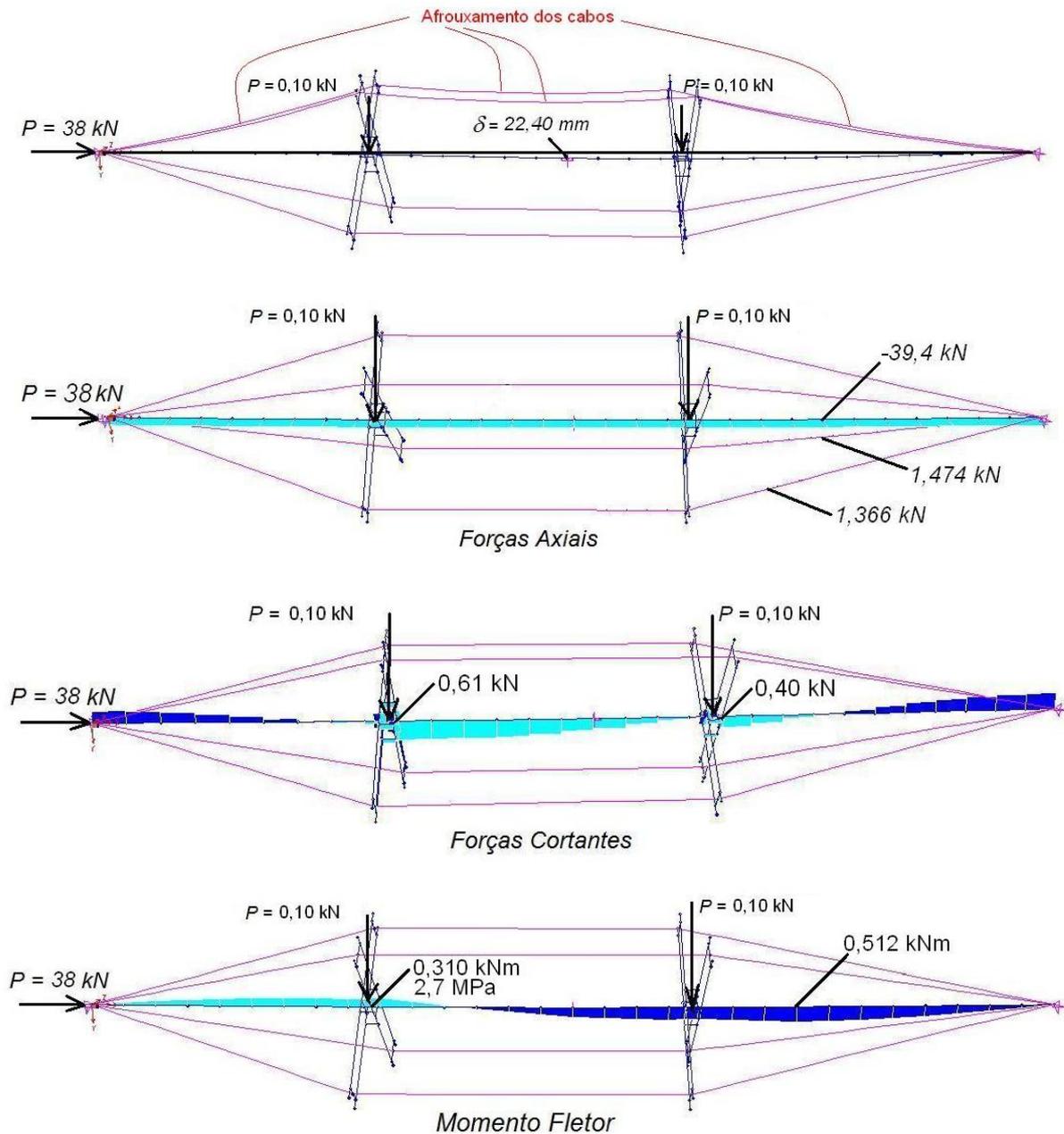


Figura 4.2.48: Modelagem numérica do mastro híbrido e as forças atuantes.

Design dos clips: os clips foram constituídos de duas chapas de aço soldadas a porcas cortadas ao meio, de modo que as duas metades se encaixassem perfeitamente à barra roscada. Outra porca de menor diâmetro, também cortada ao meio, encaixa-se no cabo de aço (Figuras 4.2.49 a 4.2.53). Finalmente, o clip se completa pela união das chapas por meio de quatro parafusos que fornecem a pressão necessária para o impedimento do deslocamento dos cabos em relação às cruzetas.

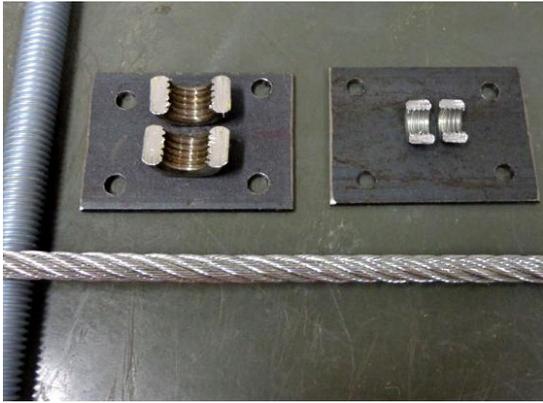


Figura 4.2.49: Design do clip.

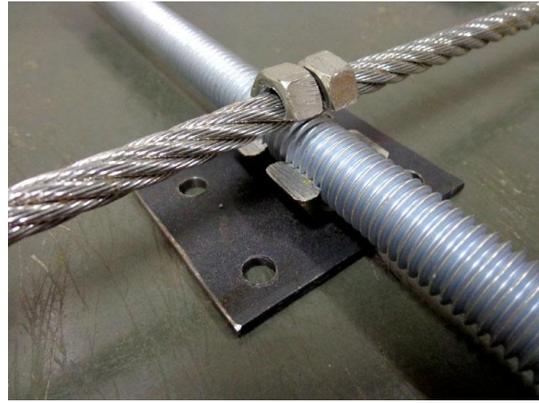


Figura 4.2.50: Instalação do clip.



Figura 4.2.51: Instalação do clip no mastro.



Figura 4.2.52: Clip completo, vista interna.



Figura 4.2.53: Vista do clip fixando o cabo de aço no mastro.

Seguem nas Figuras 4.2.54 e 4.2.55 as curvas de carga e descarga do experimento e comparação das curvas PDelta dos ensaios de compressão, do mastro sem o clip e do mastro com os cliques instalados.

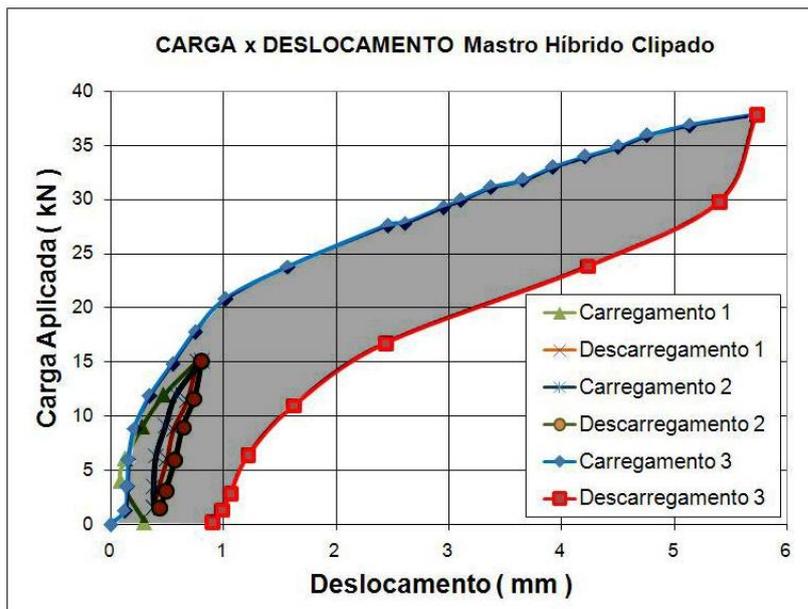


Figura 4.2.54: Curva PDelta experimental do mastros com clip.

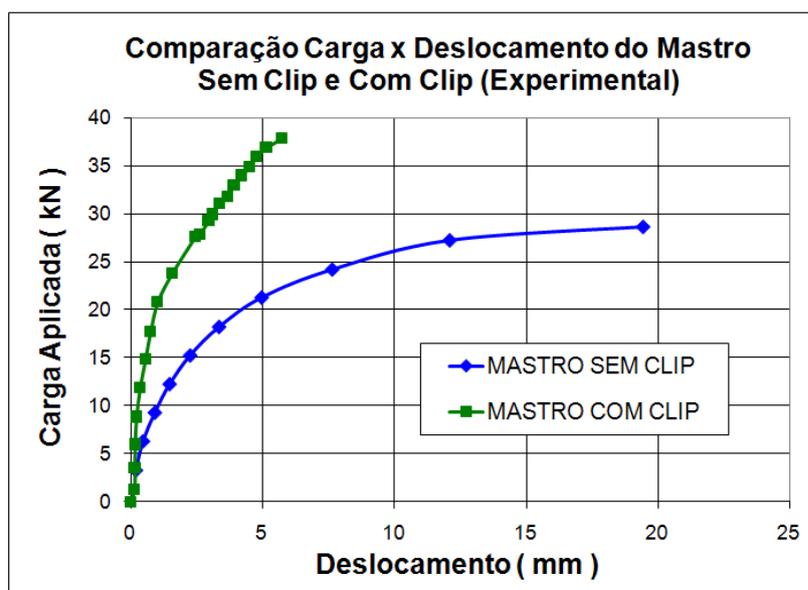


Figura 4.2.55: Curvas PDelta comparativas dos mastros sem clip e com clip.

Nas Figuras 4.2.56 e 4.2.57 têm-se, respectivamente, os Diagramas de Southwell experimentais do mastro com o clip e do mastro sem o clip.

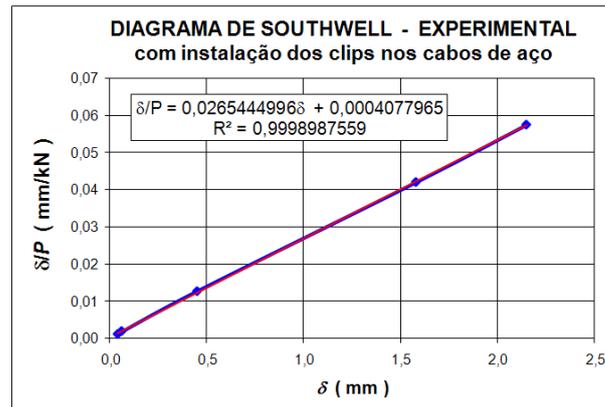


Figura 4.2.56: Diagrama de Southwell com cabos clipados.

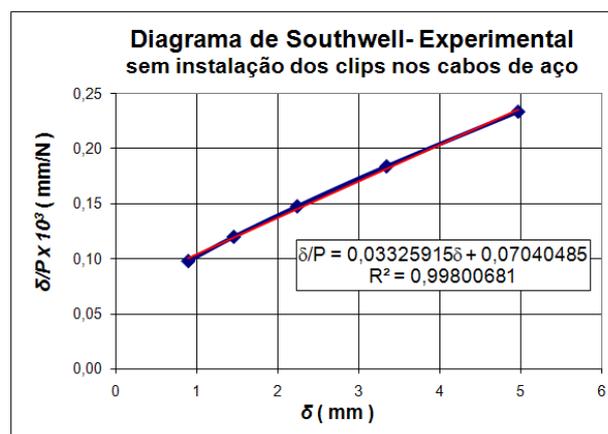


Figura 4.2.57: Diagrama de Southwell com cabos livres.

Dos diagramas experimentais de Southwell, tem-se a carga de Euler $F_E = 30,1$ kN para os cabos livres e $F_E = 37,7$ kN para os cabos clipados, apresenta um ganho de 25 % maior quando são utilizados os clips nos cabos de aço, mostrando-se assim ser um dispositivo eficiente que aumenta a força limite do mastro.

Na Figura 4.2.58 tem-se a deformada do eixo do mastro, durante o ensaio, que mostra uma onda completa se observado numa vista superior, com o centro do mastro se apresentando como um ponto de inflexão, e três semi-ondas numa vista lateral, apresentando dois pontos de inflexão, coincidentes com as seções de fixação das cruzetas.

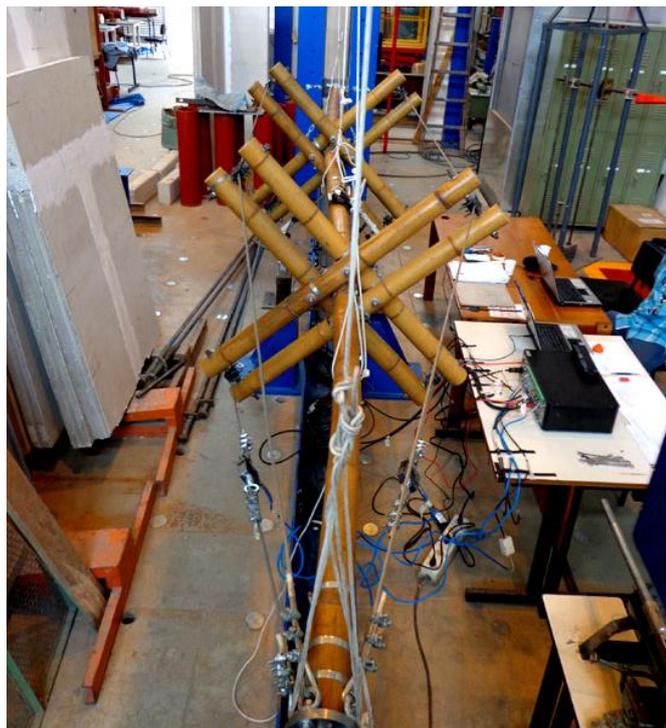


Figura 4.2.58: Deformada visual ocorrida no eixo do mastro, durante o ensaio.

No decorrer do experimento, o que se pode observar também é que as tensões ocorridas nos dois cabos de aço inferiores, que possuíam as células de carga para registro das tensões, registraram de um lado, um aumento da tensão, enquanto que de outro, foi registrada a relaxação do sistema, mantendo um equilíbrio entre as forças solicitadas. Pode-se perceber esta diferença de tensão nos cabos, na Figura 4.2.59.

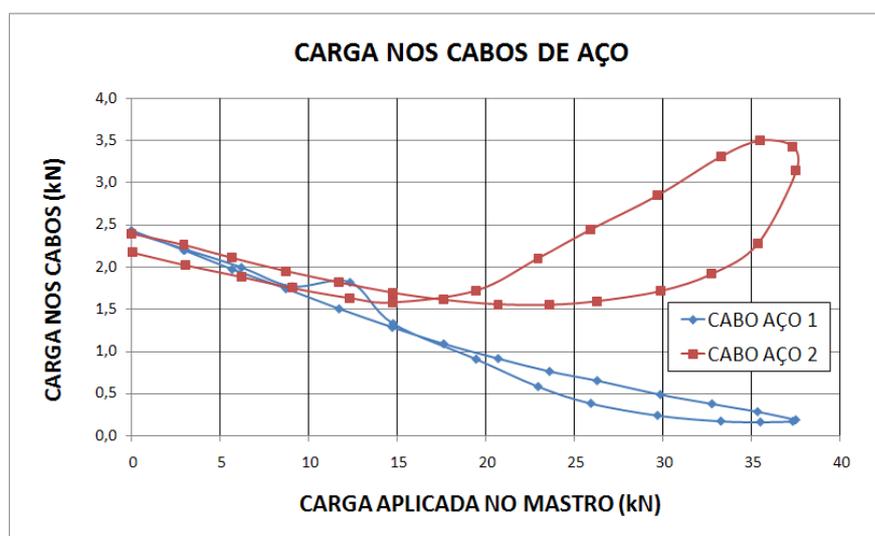


Figura 4.2.59: Diferença de tensão nos cabos de aço, durante o ensaio.

Pode-se observar também nesta figura que os cabos 1 de 2, que continham as células de carga, foram pré-tensionados em 2,42 kN e 2,39 kN respectivamente, antes da aplicação de

carga. Durante o ensaio, as tensões dos cabos inferiores se comportaram diferentemente, devido ao modo de flambagem ocorrido. O cabo nº 2, diminuiu até 17 kN e aumentou até 35 kN. Já no cabo nº 1, instalado na porção inferior do mastro apenas diminuiu sua tensão durante todo o experimento.

O modo de flambagem da barra central foi influenciado tanto pelas imperfeições iniciais como principalmente pela pré-tensão dos cabos. As duas células de carga disponíveis foram instaladas nos cabos inferiores, contando-se que pela ação da gravidade, se pudesse forçar o plano de deflexão global. Isso não aconteceu, pois ainda que se tenha procurado dar a mesma pré-tensão nos cabos, pelo número de voltas dadas aos esticadores e pela resistência oferecida ao aperto, a pré-tensão dos cabos superiores não foi quantificada. Por outro lado, o desvio de eixo dos bambus individuais é singular e a resposta, nessa composição, torna-se um tanto imprevisível. Curiosamente, ainda que o diagrama de Southwell tenha sido prejudicado pelo modo de flambagem resultante, ele ofereceu condições de previsão do comportamento do mastro na determinação da carga de Euler, com boa aproximação. Novamente, a curva PDelta de descarga mostrou uma perda de energia, Figura 4.2.54, que muito provavelmente estaria principalmente associada à fluência do bambu. Neste ponto, a pesquisa foi desviada para a investigação da fluência dos bambus isolados em flexo-compressão, ainda que a investigação da fluência não fosse o objetivo central desta tese e exigiria uma metodologia específica para se tratar o problema tanto globalmente quanto localmente (fluência dos nós e fluência dos internós), considerando-se também o conteúdo de umidade do material, a duração e a intensidade do carregamento, bem como a esbeltez do sistema.

Por outro lado, por todas as razões já citadas relativas ao difícil controle geométrico e físico do mastro híbrido, a pesquisa desviou-se para investigação de dois outros mastros propostos nesta tese, que pudessem ser facilmente fabricados e facilmente controlados.

Capítulo 4

Parte 3

MASTRO COMPOSTO

Introdução

A utilização dos bambus como suportes de estruturas tensionadas de pequeno porte, exige que se façam composições sistêmicas dos bambus individuais, ou seja, mastros de bambus. Ainda que as estruturas tensionadas sejam coberturas mais leves para grandes vãos, a pré-tensão da membrana, superposta às ações de vento e cargas acidentais, faz com que os mastros sejam comprimidos por forças relativamente elevadas. Essa potencialização dos bambus em mastros viabiliza nova possibilidade de aplicação dos bambus a estruturas deste tipo e outras, tornando acessíveis às populações em geral e às populações rurais em particular, conforme mostram Moreira, Santos e Silva (2014), e resultados práticos das conquistas mais recentes da engenharia, que se expressam nas estruturas tensionadas.

O desempenho dos bambus isolados e de mastros sob flexo-compressão tem surpreendido positivamente pesquisadores experientes em estruturas. A flexibilidade do material e da barra, pela distribuição anatômica dos tecidos resistentes, conjugadas a razões do diâmetro por espessura de parede D/t específicas, permitem deflexões elevadas sem ocorrência de instabilidade localizada, se o bambu contém umidade interna de equilíbrio da ordem de 10 % e não contém rachaduras.

Do mesmo modo, o mastro composto aqui desenvolvido pode sofrer deflexões globais na força limite, sem o surgimento de instabilidade localizada, seja dos trechos livres entre os espaçadores, seja das paredes internodais dos bambus, vistas como cascas.

Essas constatações favoráveis são estímulos a se utilizarem os bambus como mastros de estruturas tensionadas, ainda que de pequeno porte, conseguindo-se uma estética coerente

com a proposta de leveza, facilidade construtiva, manutenção e reposição de elementos, utilização de recursos renováveis e sustentabilidade dos biomas.

Neste tipo de mastro, quatro bambus paralelos de 5,5 metros de comprimento, da espécie *Phyllostachys pubescens*, foram conectados descontinuamente por segmentos de bambu interpostos e fixos por parafusos de aço. Os experimentos foram também utilizados para a aferição da modelagem numérica pelo método de elementos finitos (MEF), cujos resultados são aqui amplamente discutidos.

4.3.1 - Projeto do Mastro

Os bambus foram selecionados visualmente segundo as prescrições de serem tão retilíneos quanto possível, e com dimensões de diâmetro e espessura de parede, também tão próximas quanto possível. As características geométricas das barras são mostradas na Tabela 4.3.1.

Para a barra central, da qual se extraíram os espaçadores, as razões geométricas são: $D_T/D_B = 0,93$; $t_T/t_B = 0,94$; $I_T/I_B = 0,76$; $A_T/A_B = 0,88$. Para as 4 barras contínuas denominadas barras da coroa, as médias das razões geométricas são: $D_T/D_B = 0,76$; $t_T/t_B = 0,64$, $I_T/I_B = 0,30$, $A_T/A_B = 0,50$; onde a letra “D” se refere ao diâmetro, “t” se refere à espessura, a letra “I” se refere ao momento de inércia, a letra “A” se refere à Área, e os índices “T” e “B” se referem ao Topo e Base, respectivamente.

O bambu central foi dividido em segmentos para confecção dos espaçadores, uma decisão apenas metodológica, visto que os espaçadores podem ser feitos de sobras de outros bambus ou mesmo de segmentos de outros materiais, como por exemplo, de madeiras de reflorestamento torneadas cilíndricamente.

Tabela 4.3.1: Características geométricas da barra central e das barras paralelas:

Extremidade	Barra Central		Barras Contínuas	
	Topo	Base	Topo	Base
Média do Diâmetro (mm)	87	94	82	109
Média da Espessura de parede (mm)	8,3	8,8	7,0	11,0
Diâmetro Interno (mm)	70	76	68	87
Momento de Inércia (mm ⁴)	158	208	118	398
Área (cm ²)	20,4	23,1	16,5	33,3

Esta etapa contou com um pré-dimensionamento baseado em modelagem numérica que aguardaria a validação e aferição após a realização dos experimentos mecânicos.

O mastro foi projetado conforme a distribuição de parafusos e comprimentos indicados na Figura 4.3.1, com alma descontínua e 2 espaçadores internos, surgindo assim 3 trechos vazios de igual comprimento.

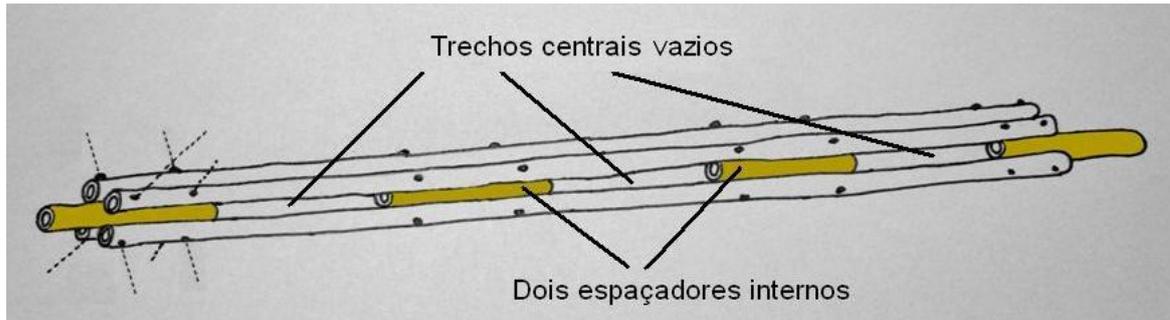


Figura 4.3.1: Esquema da alma descontínua com espaçadores internos.

Os dois planos dos parafusos têm inclinação de 45° em relação ao eixo y (Figura 4.3.2).

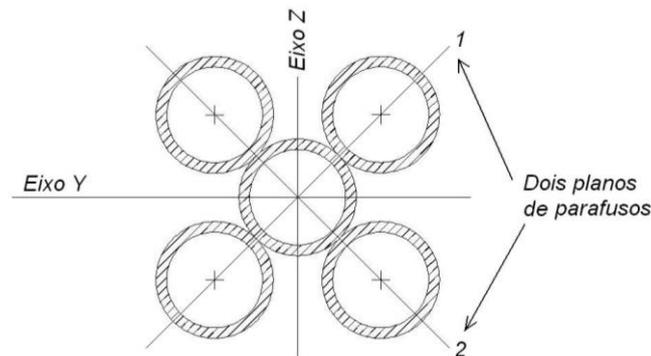


Figura 4.3.2: Seção transversal dos trechos interligados.

O primeiro experimento, com utilização de parafusos com diâmetro de 13 mm, rapidamente indicou problemas, associados tanto à flexão dos parafusos de extremidade, onde se tem o maior deslizamento entre as barras, quanto em relação à plastificação – esmagamento – dos furos no contato com os parafusos.

Procedeu-se então à troca de todos os parafusos para 15,9 mm de diâmetro e um novo experimento foi realizado, eliminando quase 100 % dos problemas.

Contudo, o fato da fabricação desses mastros ter ocorrido de modo artesanal, com perfuração utilizando furadeira manual, já dificulta a utilização de parafusos de 15,9 mm. Para parafusos de até 13 mm existem brocas longas capazes de perfurar simultaneamente 3 barras de bambus sequenciais, num comprimento de até 35 cm. Brocas com 15,9 mm com esse

comprimento não são normalmente fabricadas para perfuração manual devido ao risco oferecido aos operários, caso a broca trave por atrito durante a furação. O impacto de retorno poderia ferir o operário desatento. Com a utilização da broca de 13 mm pode-se constatar esse risco, pois quando acontece o travamento em uma ou outra furação, deve-se estar muito firme para absorção do impacto no intervalo do tempo entre o travamento e a desativação da furadeira elétrica. A industrialização da produção de mastro com dispositivos mecânicos não foi objetivo desta tese.

4.3.2– Modelagem Numérica

O mastro foi modelado com elementos de barras, discretizados com comprimento de 20 cm, em análise estática não-linear. Segundo o modelo numérico, os eixos centroidais dos bambus do mastro e dos bambus da coroa foram interligados por parafusos de 16 mm. Os parafusos, para a modelagem adotada, devem ser liberados de torção, nos pontos de contato com o eixo das coroas (Figura 4.3.3). Os módulos de elasticidade médios das barras dos bambus foram obtidos experimentalmente para cada elemento isolado, conforme apresentado anteriormente. Considerou-se também seção transversal circular e espessura de parede constante numa mesma seção transversal.

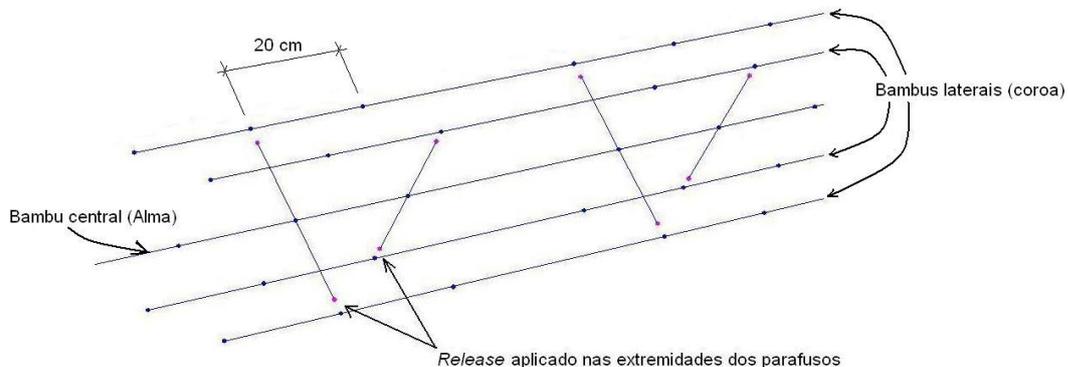


Figura 4.3.3: Modelo numérico.

Considerou-se que os diâmetros e espessuras de parede de todos os bambus utilizados variassem linearmente da base para o topo do elemento. Com isso, cada segmento de 20 cm teve diâmetro e espessura constante, correspondente à extremidade de menor diâmetro.

Considerou-se também uma imperfeição geométrica inicial igual ao comprimento do mastro dividido por 300, ou seja, 20 mm. Desse modo, todos os eixos dos bambus da coroa

foram considerados descrevendo senóides que seguiram o eixo da alma, conforme a equação 4.3.1, distanciando-se deste eixo à medida que os diâmetros aumentam do topo para a base.

$$z = \delta_0 \operatorname{sen} \frac{\pi x}{l} \quad (4.3.1)$$

Embora esse modelo tivesse funcionado perfeitamente para aferição do comportamento das barras isoladas de bambu (vide itens 4.1.2.2 e 4.1.2.3), havia uma grande expectativa quanto à possibilidade do modelo numérico ajustar-se ao experimento deste protótipo, devido ao conjunto de simplificações já adotadas.

A modelagem do mastro foi realizada com o software SAP 2000, v14, em análise estática não-linear geométrica. Para facilitar a modelagem e diminuir o tempo de processamento, o mastro foi modelado com elementos de barra tubular – pipe – material isotrópico, coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$ conforme constatado no experimento do item 4.1.1; e dividindo-se os bambus em segmentos com seção constante a cada 200 mm, variando-se a seção de segmento a segmento. Com essa modelagem relativamente simples, pode-se simular com precisão a linha elástica do mastro, obtendo-se por outro lado, os esforços solicitantes – forças normais, forças cortantes e momentos fletores, fundamentais para o pré-dimensionamento dos componentes, embora se soubesse de antemão que o modelo não seria fiel aos efeitos localizados no protótipo. A imperfeição geométrica inicial δ_0 do eixo do mastro, de difícil medição como já dito, foi considerada igual a $l/300$, sendo l o comprimento do mastro, ou seja, $\delta_0 = 20$ mm. As barras contínuas têm 5,5 metros de comprimento. Os espaçadores foram distribuídos a cada 1630 mm de distância entre suas seções centrais (Figura 4.3.4), ao longo do eixo central do protótipo, sendo fixos aos bambus laterais através de 4 barras roscadas. Os espaçadores internos foram considerados com 600 mm de comprimento. As barras roscadas foram modeladas como elementos de barras de aço de seção circular maciça, de 15,9 mm de diâmetro, ficando sujeitas a momentos fletores e esforços cortantes a partir do início da deflexão lateral do mastro.

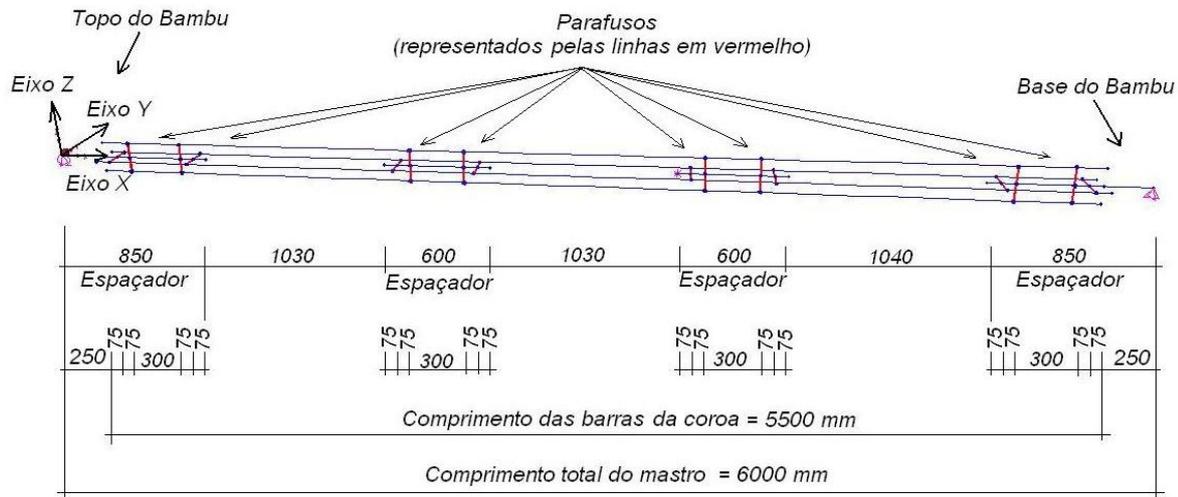


Figura 4.3.4: Dimensões do sistema estrutural.

Variando-se a força aplicada, foi possível estimar a carga de Euler e a carga limite do modelo, com a utilização dos diagramas de Southwell, Figura 4.3.5, que no caso resultou numa reta de equação $\delta/P = 0,0150780977\delta + 0,2949235279$, cujo inverso da inclinação é a carga de Euler do Sistema e cuja imperfeição inicial é o ponto onde a reta corta o eixo dos deslocamentos. Com essa simulação obteve-se a carga de Euler $F_E = 66,32$ kN e $\delta_0 = 19,56$ mm, valor próximo da imperfeição inicial dada à barra, igual a 20 mm. Considerou-se que essa imperfeição já incluísse a flecha devida ao peso próprio do mastro.

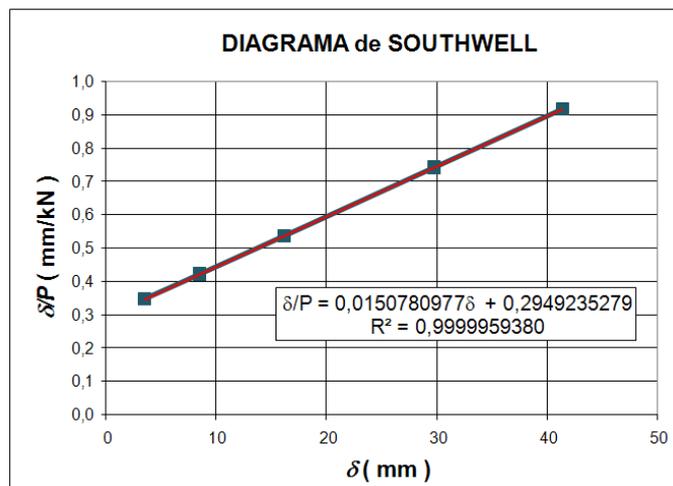


Figura 4.3.5: Diagrama de Southwell numérico.

4.3.3 – Projeto do Experimento

Os mastros foram ensaiados na horizontal, para se contar com a participação do peso próprio cuja influência foi em princípio incluída no funcionamento. No entanto, verificou-se posteriormente ser esta influência desprezável, por estar representada pela imperfeição inicial do eixo adotada na modelagem numérica, para carga axial igual a zero, considerada igual a 20 mm, ou seja, $\delta_0 = 20$ mm.

Todos e resultados dos experimentos e análises posteriores utilizaram a técnica do Diagrama de Southwell, para obtenção das cargas de Euler F_E e imperfeição inicial δ_0 do sistema.

Dos experimentos com bambus isolados, constatou-se que as medições de deslocamentos realizadas na seção central da barra eram suficientes para que se tivesse uma modelagem coerente que pode ser calibrada com os experimentos. Esta mesma solução foi aplicada ao mastro composto, facilitando o tratamento dos dados através do diagrama de Southwell, cuja equação refere-se a medições de deslocamentos na seção central de uma barra prismática. Três transdutores de deslocamentos foram posicionados conforme Figura 4.3.6, DT-1 e DT-3 horizontalmente e DT-2 verticalmente. Junto ao atuador hidráulico de operação manual instalou-se uma célula de carga com capacidade de 100 kN (Figura 4.3.7). Todos os 4 medidores foram conectados a um sistema para aquisição de dados em tempo real.

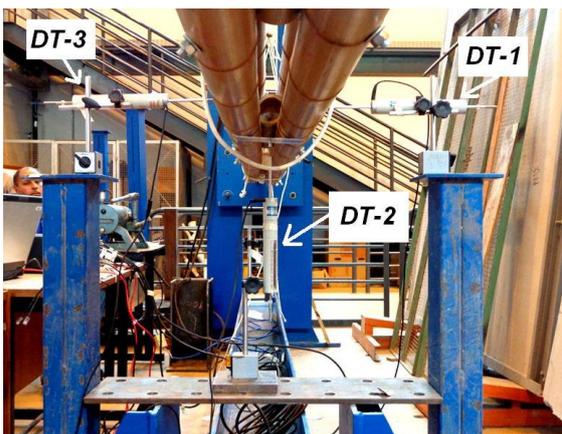


Figura 4.3.6: Instalação dos DTs no centro do mastro.

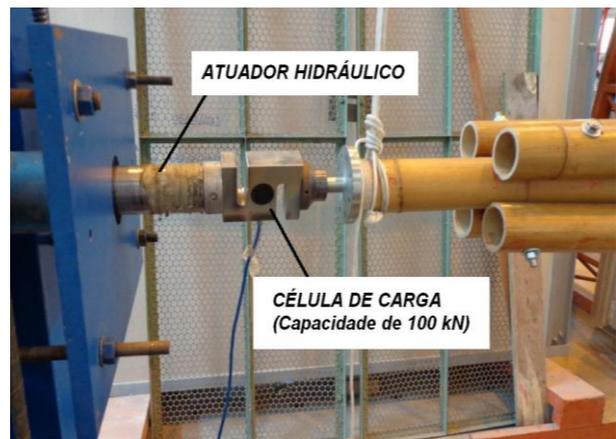


Figura 4.3.7: Atuador hidráulico e célula de carga.

Chapas equalizadoras foram utilizadas para o contato da haste móvel dos DTs, Figura 4.3.8. Para não forçar a célula de carga e evitar o risco do mastro se romper e danificar os DTs, o mastro permaneceu suspenso na extremidade próxima do atuador por uma corda de

polipropileno, ficando as outras três cordas afrouxadas mantidas, apenas por segurança, de forma a não impedir as deflexões laterais, Figura 4.3.9.



Figura 4.3.8: Fixação das chapas equalizadoras.



Figura 4.3.9: Cordas de segurança.

4.3.4 – Ensaio Mecânico

Conforme Figura 4.3.10, foram impostos três ciclos iniciais de carga, com etapas de 3,0 kN até o limite aproximado de 15,5 kN, para a acomodação do sistema. Após esta fase, continuou-se o carregamento em passos de 3 kN até a carga limite de 45,32 kN, estabelecida quando se atingiu a horizontalidade da curva PDelta (carga *vs* deslocamento).

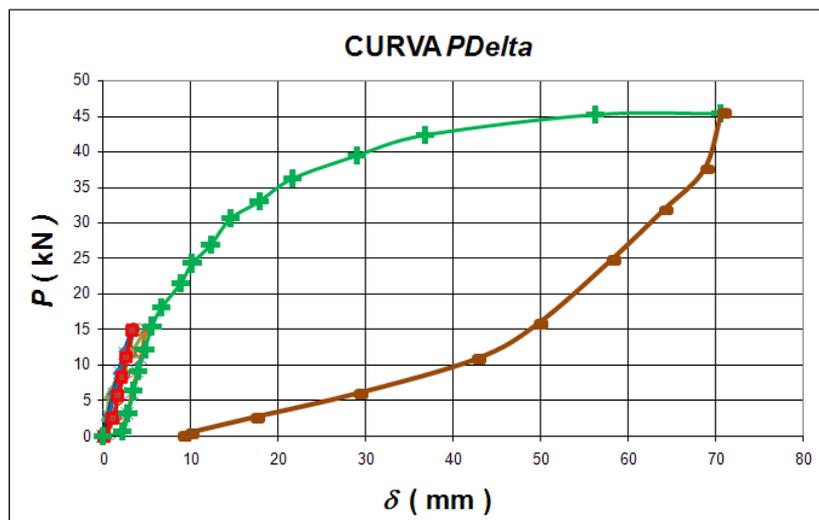


Figura 4.3.10: Curva P (carga) versus δ (deslocamento)

A Figura 4.3.11 apresenta uma amplificação dos 3 ciclos iniciais.

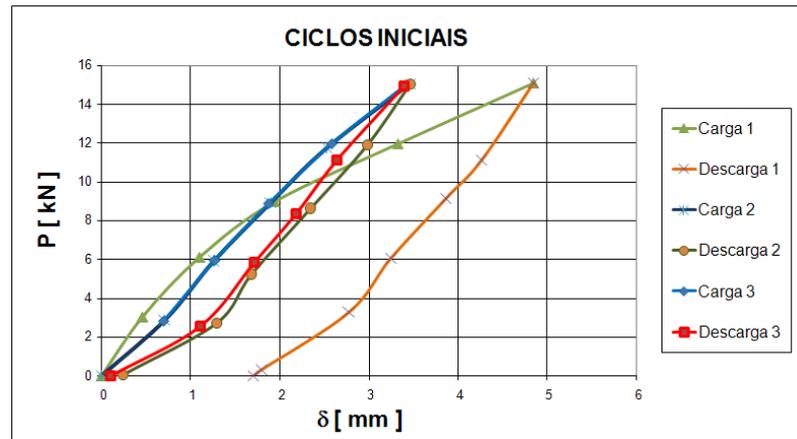


Figura 4.3.11: Ciclos iniciais P (carga) x δ (deslocamento).

No entanto, a razão das cargas de Euler do modelo numérico para o resultado experimental, mostrou que o modelo numérico estava mais rígido em 21,9 % (66,32 kN contra o valor experimental de 54,4 kN), Figura 4.3.12. Esta rigidez pode ser atribuída ao momento de inércia resultante do modelo numérico em função do próprio modelo adotado para simular o experimento bem como das geometrias dos elementos tomadas por trechos e dos módulos de elasticidade dos materiais determinados experimentalmente, exceto o módulo de elasticidade das barras de aço tomado como conhecido.

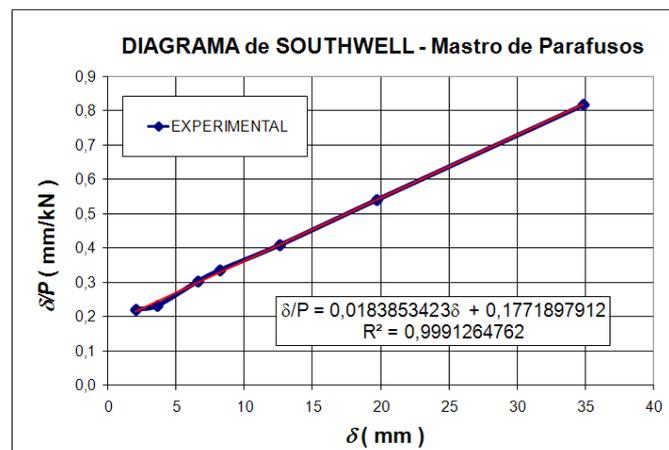


Figura 4.3.12: Diagrama de Southwell (Experimental).

Testou-se então uma correção do módulo de elasticidade para 80% e 75% dos módulos determinados experimentalmente para cada elemento de barra. Esta redução de 25 % feita aos módulos foi suficiente para acompanhar com perfeição o experimento através do modelo numérico adotado com inércia variável. Como o que importa é a rigidez à flexão EI , a redução pode ser feita ou sobre E ou sobre I ou sobre o produto EI . Assim, adotou-se essa última opção, pois facilitará a análise do problema. Feito esta correção equivalente a 75% dos módulos de elasticidade individuais determinados, ou seja, com uma redução de 25% aplicada

totalmente sobre os módulos de elasticidade, sabendo-se que parte da diferença entre os valores de rigidez deve-se às folgas e deformações localizadas no parafuso e parte ao fato da inércia do modelo ser uma resultante do próprio modelo adotado, obteve-se $F_E = 54,55$ kN (apenas 0,3 % maior do que a carga de Euler do experimento) com deslocamento inicial do sistema $\delta_0 = 19,94$ mm. A Figura 4.3.13 apresenta a comparação das curvas PDelta, experimental e numérico.

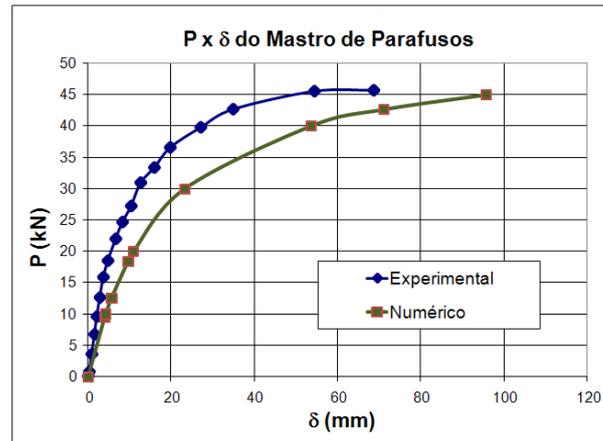


Figura 4.3.13: Comparação das curvas PDelta (Numérico e Experimental).

Pode-se observar que o último ponto da curva experimental realmente mostra um deslocamento diferenciado e acentuado que reflete o esmagamento progressivo do furo. O fato da curva numérica não ter coincidido com a curva experimental refere-se ao fato do experimento ter apresentado uma imperfeição inicial de 9,5 mm obtida pelo Diagrama de Southwell e do modelo numérico ter sido gerado com uma imperfeição inicial de 20 mm. Isso faz a curva PDelta declinar ainda que a carga de Euler seja a mesma, pois a carga de Euler não varia com a imperfeição inicial. A imperfeição inicial apenas gera tensões mais elevadas nos materiais, não interferindo, contudo na definição da carga de Euler. A redução de 25 % aplicada ao módulo de elasticidade, para ajuste do modelo numérico ao experimento, pode ser melhor distribuída aplicando-se 18% sobre o módulo de elasticidade e o restante de 7% ao momento de inércia resultante do modelo, visto que o modelo numérico difere bastante do objeto físico, principalmente na conexão entre os elementos. A rigidez excessiva do modelo pode ser verificada pelo distanciamento dos deslocamentos iniciais δ_0 obtidos do Diagrama de Southwell com a real imperfeição inicial do modelo.

Plotando-se os diagramas de Southwell numérico e experimental, com a correção do módulo de elasticidade citado, Figura 4.3.14, obtem-se pelo inverso da inclinação da reta, a carga de Euler do mastro, $F_E = 54,4$ kN, sendo 99,7% do valor de 54,55 kN, encontrado na simulação. Do mesmo modo, a imperfeição inicial do sistema, dada pelo ponto onde a reta

cruza o eixo horizontal forneceu $\delta_0 = 9,64$ mm, contra 19,94 mm obtido da simulação. Nesse caso, pode-se inferir que o mastro não tem a imperfeição de 20 mm considerada na modelagem. Poucos experimentos adicionais serão necessários para aferição exata do modelo, que serão apresentados no item 4.3.7.

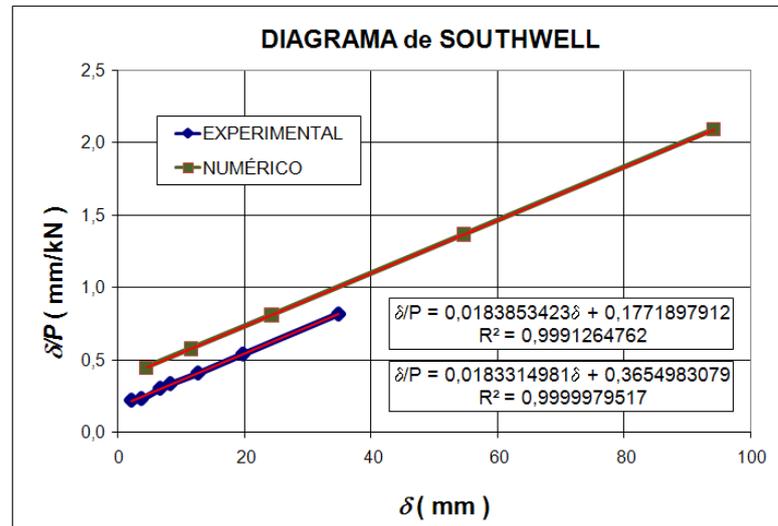


Figura 4.3.14: Comparação dos Diagramas de Southwell (Numérico e Experimental).

Nas Figuras 4.3.15 e 4.3.16, têm-se a linha elástica do mastro, ao atingir a carga limite. As cordas de polipropileno mostradas em diversas posições internas ao mastro estão frouxas e não impedem os deslocamentos transversais do mastro.



Figura 4.3.15: Linha elástica para $P = 45$ kN – perspectiva longitudinal.



Figura 4.3.16: Linha elástica para $P = 45$ kN – perspectiva lateral.

4.3.5 – Análises dos resultados experimentais e numéricos

A Figura 4.3.10 demonstrou que o mastro apresentou um comportamento elástico até a carga limite, quando então, a partir de um novo passo de deslocamento do atuador, não foi registrada nenhuma força resistente adicional, ou seja, passaram a ocorrer deformações

plásticas, registradas na mesma figura pelo deslocamento residual de 10 mm. A força limite registrada foi igual a 83 % da carga de Euler do sistema, igual a 54,4 kN, obtida do diagrama de Southwell. O fato de a modelagem numérica ter se ajustado tão bem aos resultados experimentais, reflete a regularidade de funcionamento dos bambus, já que foram modelados com a média dos diâmetros dos 4 elementos, todos descrevendo juntos a semi-onda senoidal do eixo imaginário do mastro.

Como a força limite experimental ocorreu para uma força axial de compressão de 45,32 kN, tem-se nas Figuras 4.3.17 a 4.3.20, as deflexões, forças axiais, forças cortantes e momentos fletores simuladas numericamente para o valor de 45 kN.

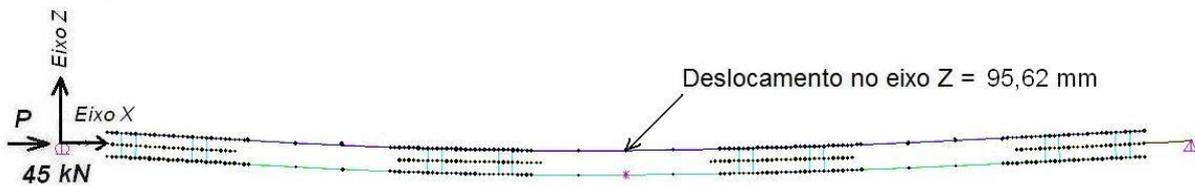


Figura 4.3.17: Deflexões – fator de escala = 1

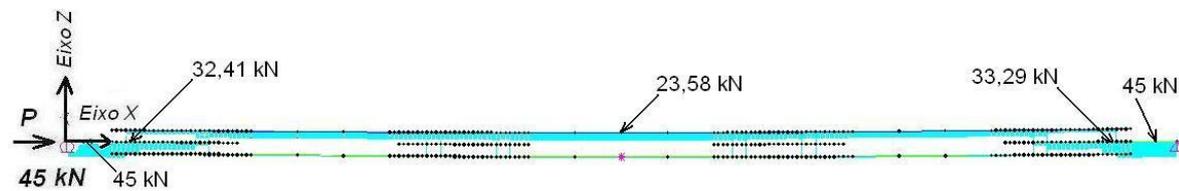
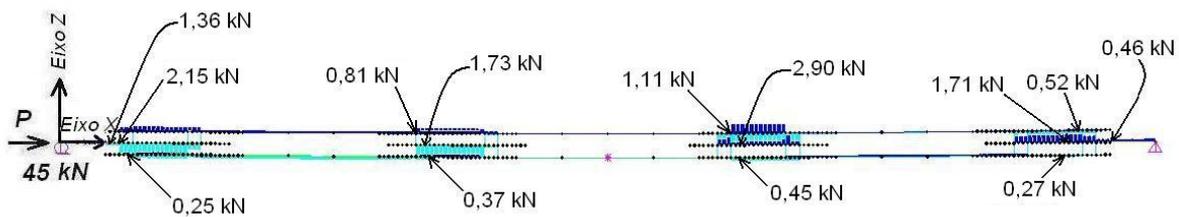
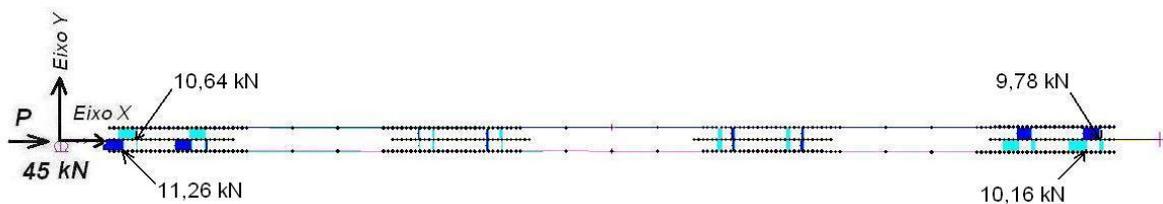


Figura 4.3.18: Forças axiais.

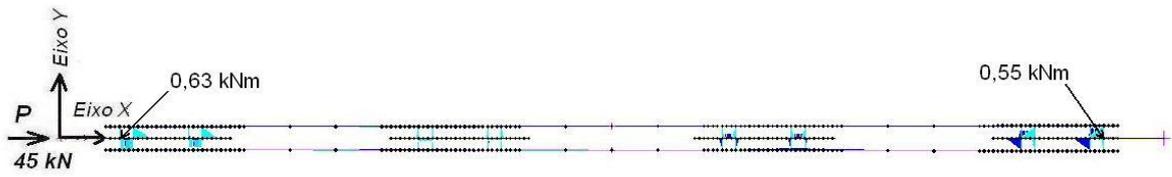


a) Plano XZ (Vertical)

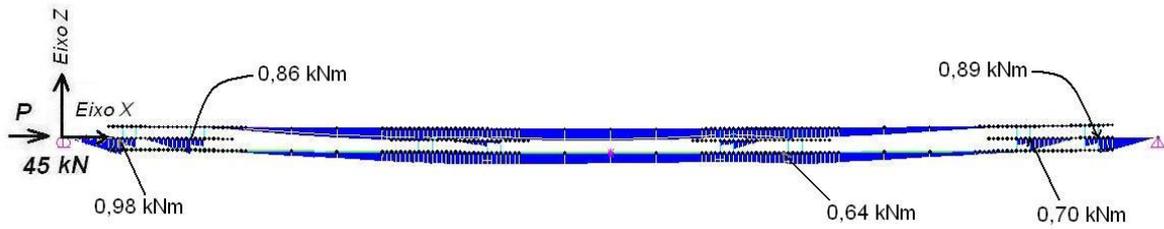


b) Plano XY (Horizontal)

Figura 4.3.19: Forças cortantes.



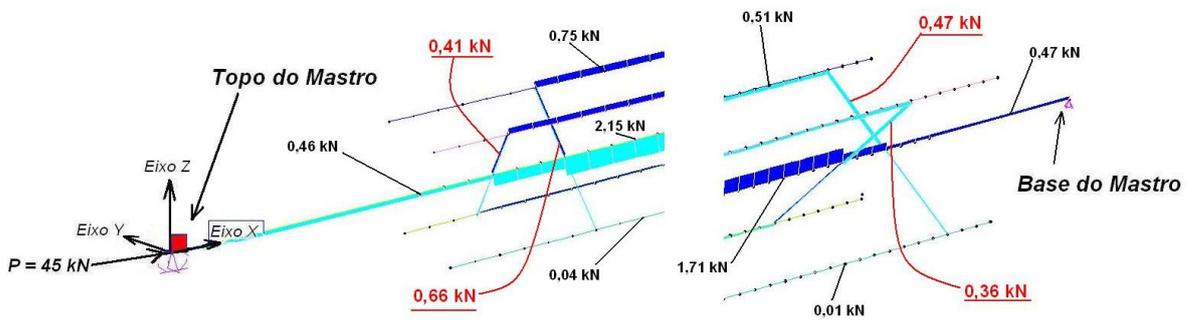
a) Plano XY (Horizontal)



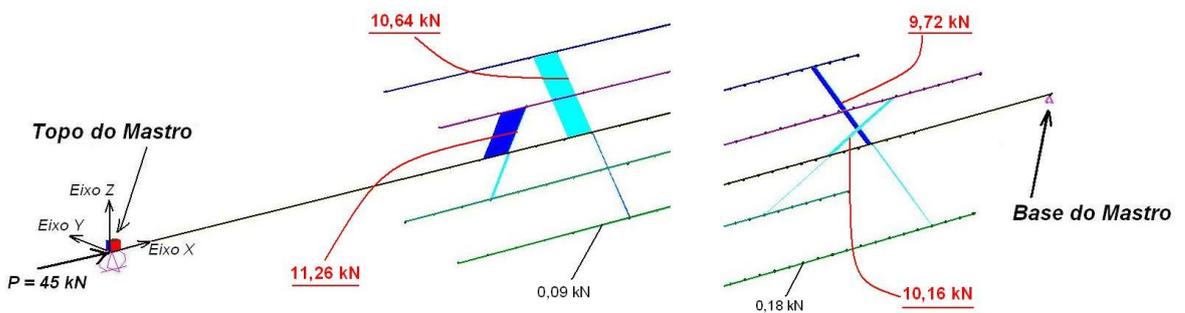
b) Plano XZ (Vertical)

Figura 4.3.20: Momentos Fletores.

Para os parafusos, têm-se nas Figuras 4.3.21 e 4.3.22 a indicação (em vermelho) das forças cortantes máximas e momentos fletores máximos, respectivamente.

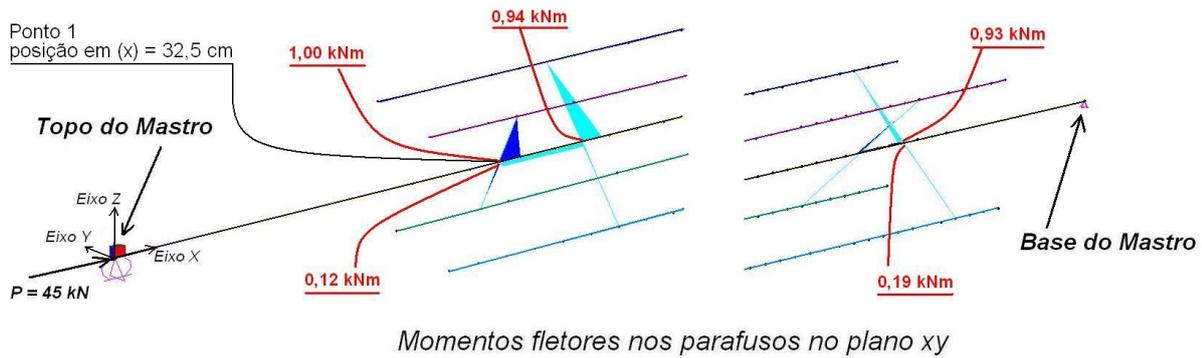


a) Plano XZ (Vertical)

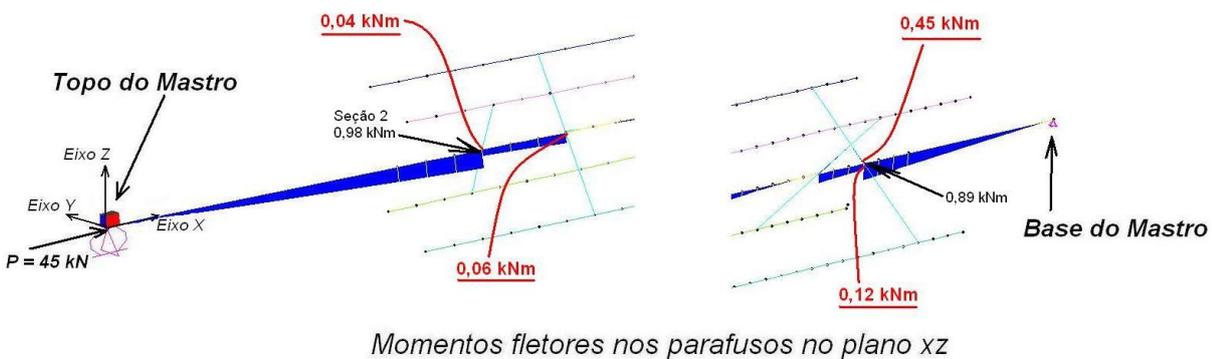


b) Plano XY (Horizontal)

Figura 4.3.21: Forças cortantes nos parafusos.



a) Plano XY (Horizontal)



b) Plano XZ (Vertical)

Figura 4.3.22: Momentos Fletores nas extremidades.

Estimando-se as tensões máximas de compressão na seção transversal do espaçador à extrema esquerda, onde $D = 8,4 \text{ cm}$, $A = 22 \text{ cm}^2$ e $I = 155 \text{ cm}^4$, sendo a força axial igual a 45 kN, Figura 4.3.18 e o momento fletor igual a 0,98 kNm, Figura 4.3.20b, tem-se $\sigma_c = 47 \text{ MPa}$, que representa 58,7% das tensões limites de resistência do lote, iguais a $80 \pm 9 \text{ MPa}$.

Do mesmo modo, a partir da força cortante máxima no pino igual a 11,26 kN, Figura 4.3.21b, obtém-se as tensões médias máximas de compressão no furo, onde se tem uma espessura de parede de 9,4 mm, iguais a 84 MPa, maiores que 80 MPa, anunciando o esmagamento progressivo do furo, Figuras 4.3.23, 4.3.24 e 4.3.25. Pode-se observar também que o passo da rosca do parafuso funcionou como meio de corte, penetrando na parede do bambu devido às altas concentrações de tensões, fazendo com que a parede reduzisse a área útil, problema que pode ser evitado utilizando-se barras lisas com roscas abertas apenas nas extremidades, fora do contato com as paredes.

Outro estado-limite a ser investigado é a flexão da barra roscada de 15,9 mm de diâmetro, Figura 4.3.26. Construtivamente, o real momento fletor no parafuso é cerca de 50 %

do valor simulado de 1,00 kNm, Figura 4.3.22a, ou seja, 0,50 kNm, que induzem tensões de flexão nos pinos iguais a 741 MPa, indicando que a barra roscada A-193 – B7 escoou, já que a resistência ao escoamento é $\sigma_y = 738$ MPa. Após passar pelo *hardening* (endurecimento), a barra roscada romperia para tensões $\sigma_u = 878$ MPa. Ambas as deformações plásticas localizadas nas ligações podem justificar o resíduo de 10 mm da Figura 4.3.10. Como consequência do esforço cortante entre as barras e das deformações plásticas localizadas nas conexões de extremidade, tem-se o deslizamento das seções extremas – *end slip* –, (Figura 4.3.27).



Figura 4.3.23: Ângulo de afastamento das barras.

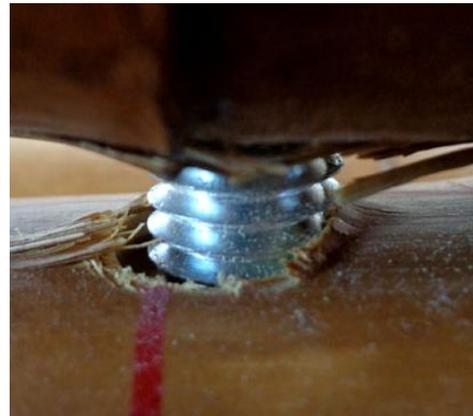


Figura 4.3.24: Perda de espessura de parede.



Figura 4.3.25: Penetração dos fios da rosca na parede do bambu.



Figura 4.3.26: Flexão do pino.

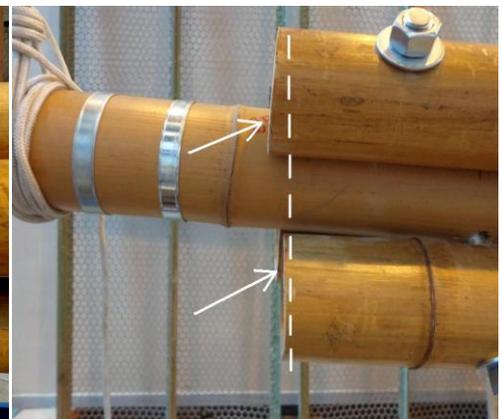


Figura 4.3.27: End Slip (deslizamento relativo de extremidade).

4.3.6 – Considerações acerca dos resultados

O mastro teve um comportamento elástico previsível, com grande capacidade de carga e deslocamentos laterais admissíveis em serviço. Supondo-se a carga de serviço igual a 50 % da carga limite, o mastro teria, segundo a Figura 4.3.10, deslocamentos laterais menores do que 10 mm, com tensões máximas tanto na seção transversal do bambu, como nos furos e nas barras roscadas, bem inferiores aos limites elásticos dos respectivos materiais.

A carga limite ficou estabelecida pelo esmagamento dos furos do espaçador, na extremidade com seção de menor diâmetro e espessura de parede, tensões de contato que podem ser reduzidas utilizando-se barras lisas, com roscas apenas nas extremidades. Isto evitaria concentração de tensões nas paredes dos bambus, pelos fios de rosca cortantes da barra roscada, que também eliminam parte da parede, diminuindo a espessura útil, Figura 4.3.24.

Pode-se ainda fazer composições mistas, substituindo-se os espaçadores por cilindros de madeira de reflorestamento, como o eucalipto, que diminuiriam as tensões de contato nesses segmentos mais solicitados, além de aumentar a rigidez do sistema, sem aumento relevante do peso próprio final, igual a 0,61 kN neste protótipo, que apresentou uma razão força/resistência igual a 74 kN/kN. O aumento de rigidez aumentaria a carga de Euler do mastro, aumentando também sua carga limite, que é condicionada pelas ligações. Do mesmo modo, quanto maior o número de espaçadores, maior a rigidez do sistema, com consequente aumento do limite de capacidade de carga.

Os resultados positivos obtidos estimulam que se proceda a estudos paramétricos para proposição de equações de dimensionamento de barras submetidas à força axial de compressão. A Figura 4.3.14 demonstra o ajuste da modelagem numérica ao experimento, tornando-a ajustada para estudos paramétricos, relativamente independentes de novos experimentos mecânicos, de onde se poderão extrair curvas de dimensionamento para mastros compostos em geral.

Elementos compostos parafusados foram utilizados para a construção de uma Capela, cenário da novela Araguaia, da Rede Globo de Televisão, no ano de 2010, Figuras 4.3.28 e 4.3.29.



Figura 4.3.28: Capela construída.



Figura 4.3.29: Detalhe dos elementos compostos parafusados.

Com projeto arquitetônico e estrutural da Arte Desenho Construtora, Rio de Janeiro, RJ; a edificação contou com análise e dimensionamento estrutural da UFMG, tendo sido a principal motivação para a investigação realizada nesta tese, embora a proposta aqui tenha configuração e composição originais.

O projeto teve solução estrutural ousada, devido às conexões parafusadas, e contou com a premissa de que no período de 10 meses de utilização do cenário nas condições de vento local, todos os elementos permaneceriam em perfeito estado, premissa que tem fundamento na umidade de equilíbrio da cidade do Rio de Janeiro, que é de cerca de 15 %, contra 8 % na cidade de Belo Horizonte. Embora a resistência e módulo de elasticidade dos bambus com umidade de 8 % sejam da ordem de 50 % maiores do que para a umidade de 15 %, a perda percentual de um lote por rachaduras é superior naqueles casos.

Abrigos são objetos de utilidade básica, essenciais, e todas as teorias relacionadas a estes objetos não deixam de ser tardias, em muitos aspectos, à construção social da realidade. Cabe à engenharia agregar conhecimento às soluções, em muitos casos intuitivas, de forma a garantir economia de materiais, porém condicionada à segurança das edificações em uso, num contexto determinado. Neste ponto reside o grande desafio da engenharia do bambu natural, isto é, tentar resgatar o bambu do reino da pura tradição, caracterizada por uma redundância de elementos e por escala que garante a segurança, gerando sistemas estruturais já realizados com outros materiais de construção industrializados, sob conceitos de base tecnológica.

4.3.7 – Validação e Aferição do modelo numérico

Constatou-se que o modelo numérico havia ficado mais rígido que o experimento, comparando-se as cargas de Euler obtidas do Diagrama de Southwell, entre o experimento e o modelo. Conforme pode se constatar na norma de aço, ABNT NBR 8800 (2008, p.80), por razões de folga dos parafusos, os cálculos devem sofrer um fator de redução de 15%. No caso dos bambus esta diferença entre as cargas de Euler (numérico e experimental) ficou igual a 25%, o que é perfeitamente admissível se forem considerados os pontos:

- ✓ Não há controle da folga nos furos devido à furação manual, o que deixa os primeiros furos no mesmo alinhamento, com folgas relativamente altas.
- ✓ Os parafusos se comprimem contra os furos plastificando a região de contato, conduzindo a deslocamentos localizados relativamente altos, já que o módulo de elasticidade médio dos bambus, registrado, foi de apenas 12,5 GPa, Tabela 4.1.2.

- ✓ O bambu é um material ortotrópico, estando sujeito também a deformações por cisalhamento, que não foram consideradas numericamente.
- ✓ A deflexão máxima ocorre muito próxima à seção central das barras, mas não exatamente no centro, e sim a uma distância de cerca de 45% do comprimento, da extremidade de menor diâmetro.

Contudo, a validação do modelo somente seria conseguida se as reduções do módulo de elasticidade fizessem com que os Diagramas de Southwell numéricos e experimentais ficassem paralelos.

Por outro lado, o modelo numérico ficaria ainda mais correspondente se pudesse ser ainda mais simplificado, considerando-se todas as barras com diâmetro e espessuras constantes e iguais à média dos extremos. Ou seja, o mastro foi também modelado com bambus com um único diâmetro e espessura de parede, dadas pela média das medidas das 4 barras de bambus componentes, dos quais já se havia tomado a média das medidas das extremidades. Do mesmo modo, considerou-se o módulo de elasticidade médio dessas 4 barras, ou seja, $E_{red} = 0,75 \times 12,5 \text{ GPa}$.

Nas Figuras 4.3.30 e 4.3.31, tem-se o resultado das curvas PDelta e Diagrama de Southwell para os 3 casos, ou seja, para o experimento, para o modelo numérico com inércia variável e para o modelo numérico com inércia constante, lembrando novamente que os modelos numéricos tiveram uma redução de 25% do módulo de elasticidade, quer individualmente, no caso de inércia variável; quer no valor médio de 12,5 GPa, no caso de inércia constante.

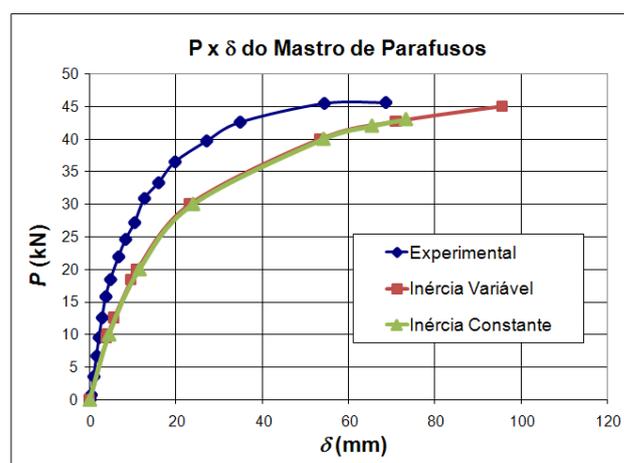


Figura 4.3.30: Curvas PDelta experimental e numérico do mastro composto.

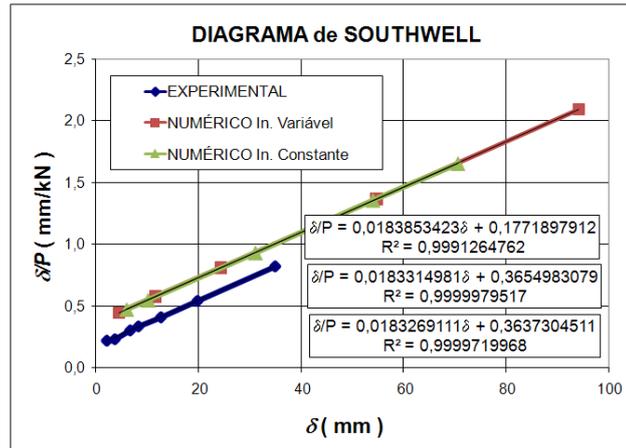


Figura 4.3.31: Diagramas de Southwell experimental e numérico do mastro composto.

A Tabela 4.3.2 apresenta a Carga de Euler (F_E) e imperfeição inicial registrados:

Tabela 4.3.2: Carga de Euler e imperfeição inicial do sistema:

	Carga de Euler (F_E) (kN)	Imperfeição Inicial do sistema (mm)
Experimental	54,39	9,64
Modelagem Numérica com inércia variável	54,55	19,94
Modelagem Numérica com inércia constante	54,56	19,85

Constata-se deste modo o perfeito ajuste do modelo numérico ao experimento, considerando-se assim válido o modelo numérico para a geração de resultados teóricos.

4.3.8 – Estudos paramétricos para aplicações estruturais com Bambus Tipo

Para a geração de resultados em um estudo paramétrico, considerou-se que o modelo numérico proposto estava validado para representar bem este tipo de mastro, desde que se considerasse uma perda de 25% na rigidez à flexão EI , conforme aferição apresentada.

Verificou-se também que seria conveniente aumentar um pouco a distância entre furos alinhados, que foram passados de 7,5 cm para 10 cm, para dar uma tolerância na fabricação, já que se trata de furação manual que não garante que a igual distância entre furos dada no início da furação nos bambus da coroa, coincidirá com a distância entre os últimos furos nos bambus opostos da coroa.

Verificou-se também, numericamente, que a colocação de bambus espaçadores no centro do mastro era mais indicada pra melhorar o desempenho, já que no centro ocorrem os maiores momentos fletores.

Desse modo foram gerados 7 mastros tipo, com diferentes diâmetros e espessuras médias de parede. Para cada mastro tipo, foram considerados comprimentos de 2 m, 3 m, 4,5 m e 6 m. Parafusos com diâmetro de 16 mm foram utilizados apenas nas extremidades dos mastros, e nas partes centrais, foram utilizados diâmetros de 13 mm. O número de parafusos e distâncias entre eles devem seguir as configurações tipo, conforme Figuras 4.3.32 a 4.3.35.

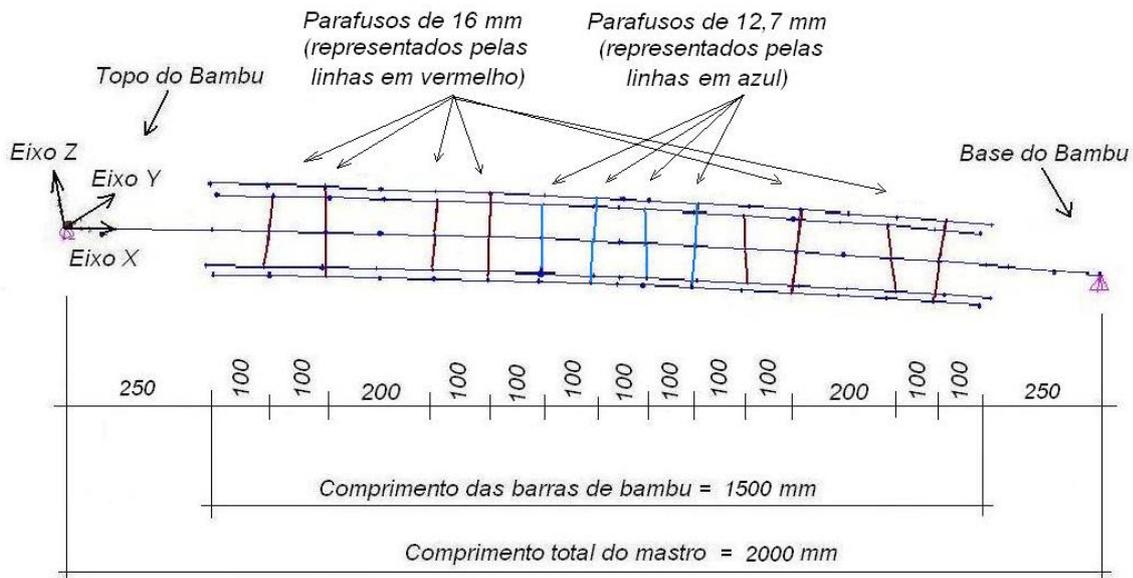


Figura 4.3.32: Distância entre espaçadores e parafusos no mastro de 2 metros.

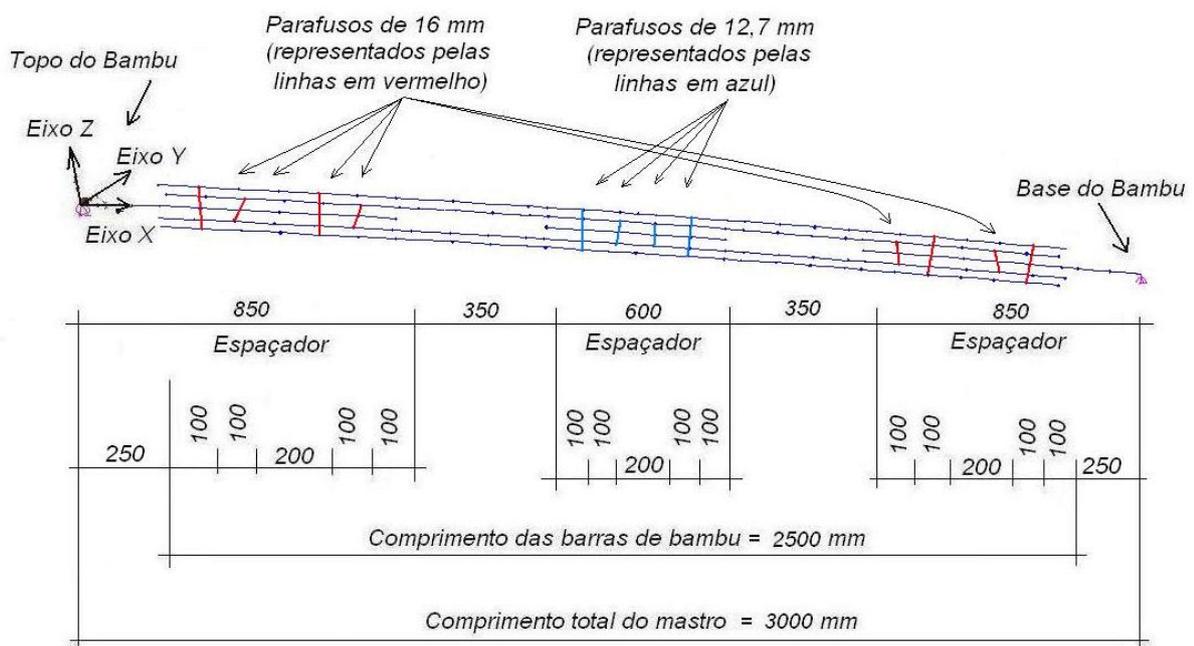


Figura 4.3.33: Distância entre espaçadores e parafusos no mastro de 3 metros.

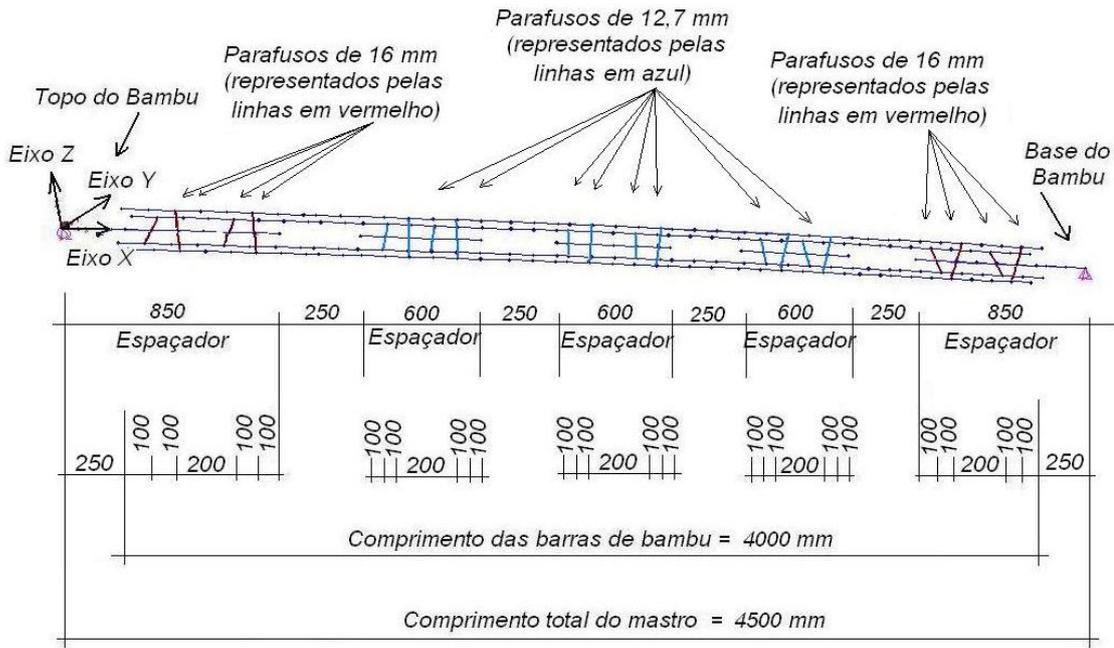


Figura 4.3.34: Distância entre espaçadores e parafusos no mastro de 4,5 metros.

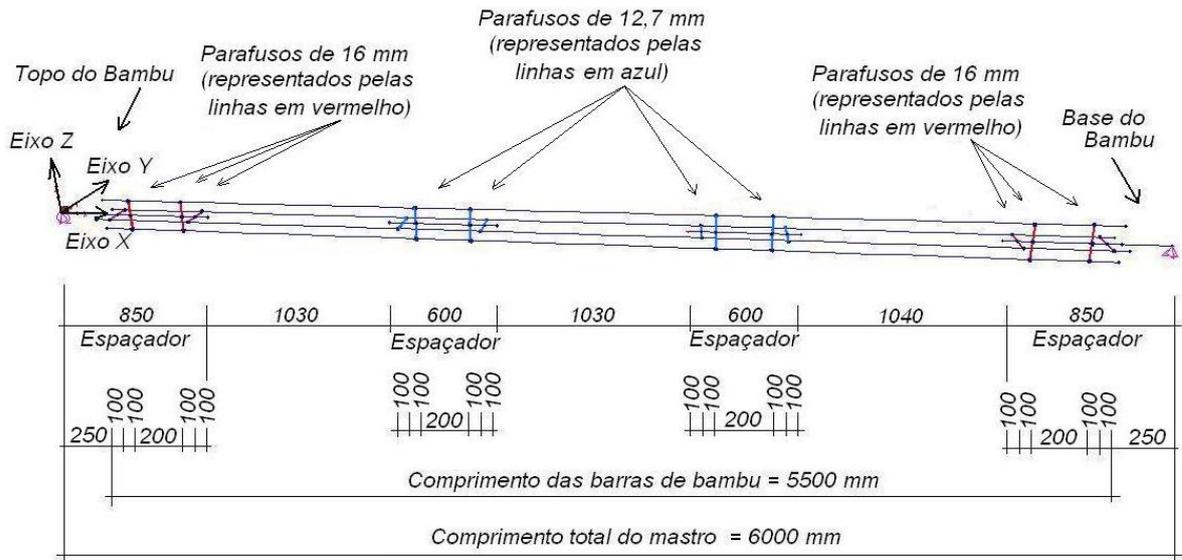


Figura 4.3.35: Distância entre espaçadores e parafusos no mastro de 6 metros.

Seguem na tabela 4.3.3 as características geométricas das barras de “Bambus Tipo” utilizados na modelagem numérica dos mastros compostos:

Tabela 4.3.3: Propriedades geométricas das barras dos Bambus Tipo.

Bambu Tipo	D (mm)	t (mm)	Área (cm ²)	I (cm ⁴)
1	50	5	70,7	18
2	65	6,5	11,9	52
3	65	13	21,2	76
4	85	8,5	20,4	151
5	85	17	36,3	223
6	100	15	40,1	373
7	100	30	66,0	478

Como tanto o módulo de elasticidade dos bambus como os momentos de inércia variam da base para o topo de uma barra, objetiva-se principalmente os produtos EI globais em todas as investigações e dele se tem grande precisão, através do diagrama de Southwell.

Para cada mastro tipo e cada comprimento, foram traçados os Diagramas de Southwell, com os quais podem ser calculados os produtos $E_r I_b$, onde:

E_r = módulo de elasticidade de referência = 10 GPa e I é o momento de inércia resultante do sistema.

I_b = momento de inércia da seção maciça ou bruta.

Foram também consideradas duas possibilidades: mastro com alma descontínua e mastro com alma contínua.

Plotando-se os produtos $E_r I_b$ para um comprimento fixo dos mastros tipo obteve-se as parábolas das Figuras 4.3.36 a 4.3.42, com ajuste de 100 %.

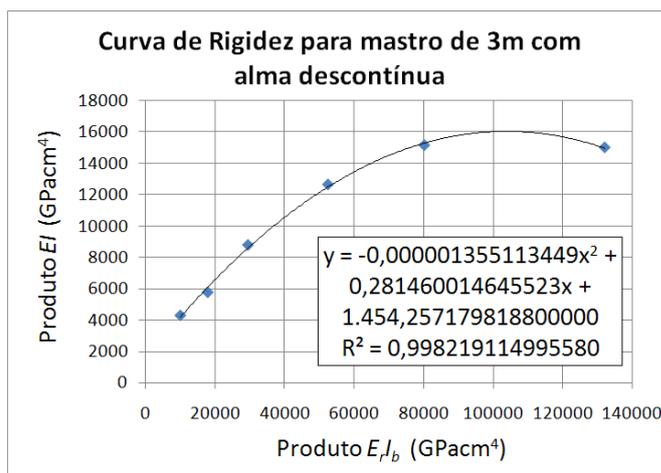


Figura 4.3.36: Curva de rigidez para mastro de 3 m com alma descontínua.

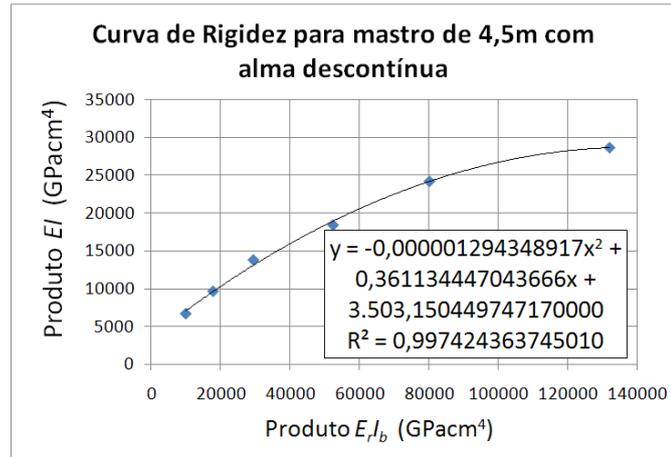


Figura 4.3.37: Curva de rigidez para mastro de 4,5 m com alma descontínua.

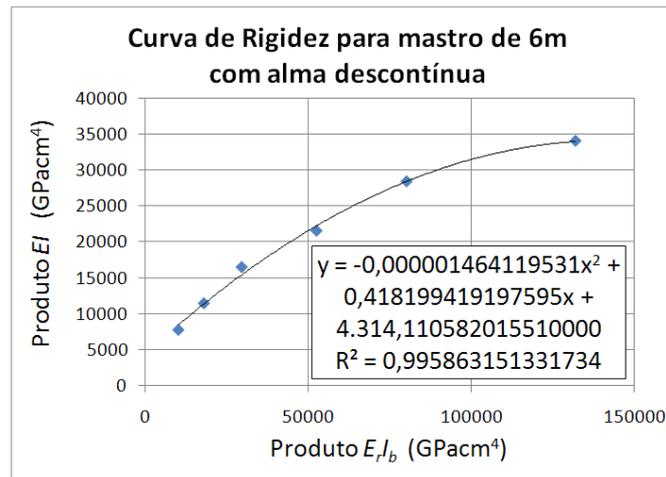


Figura 4.3.38: Curva de rigidez para mastro de 6 m com alma descontínua.

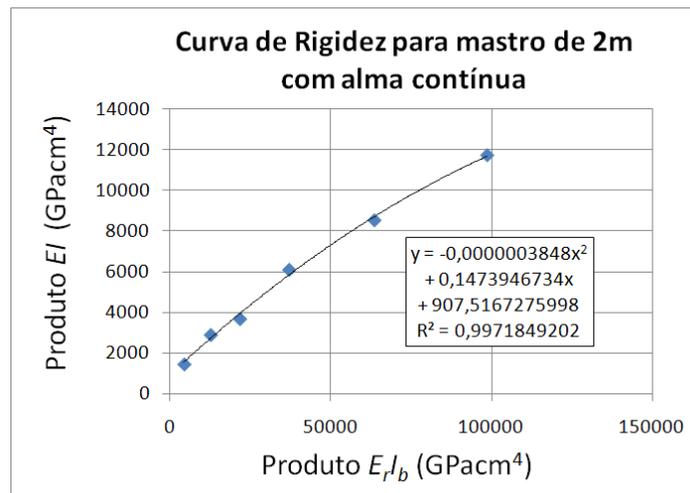


Figura 4.3.39: Curva de rigidez para mastro de 2 m com alma contínua.

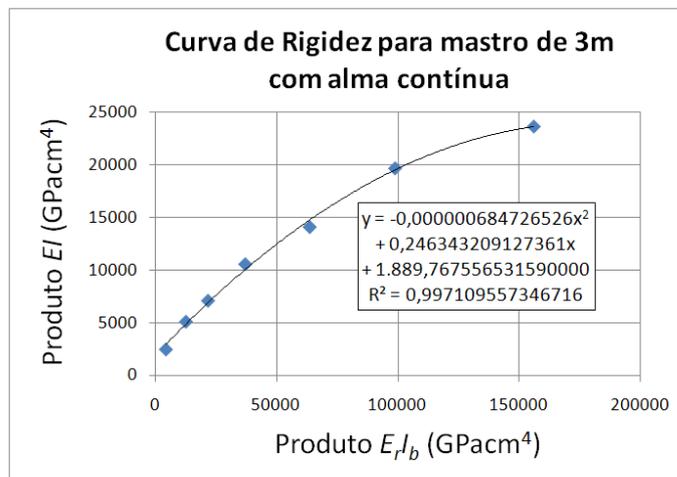


Figura 4.3.40: Curva de rigidez para mastro de 3 m com alma contínua.

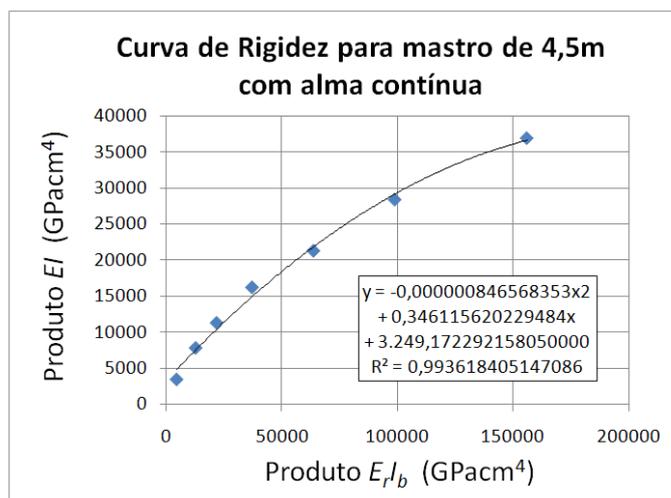


Figura 4.3.41: Curva de rigidez para mastro de 4,5 m com alma contínua.

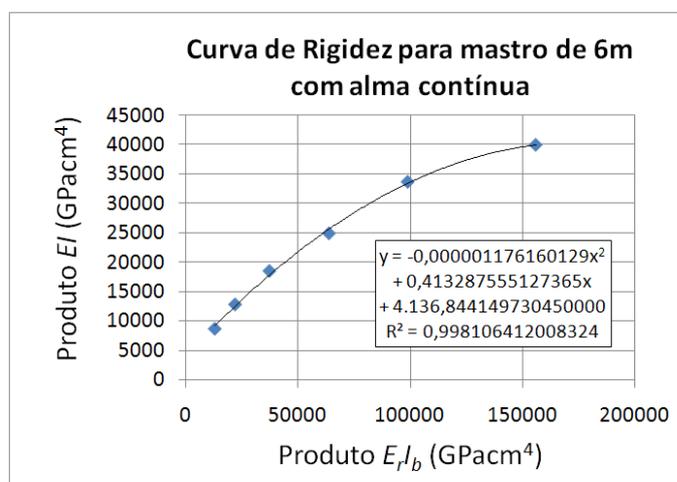


Figura 4.3.42: Curva de rigidez para mastro de 6 m com alma contínua.

Apresenta-se a seguir a Tabela 4.3.4, com o Produto EI para mastros compostos *versus* o comprimento de mastros, realizada a partir de Bambus Tipo, com alma contínua, e a Tabela

4.3.5, com o Produto EI para mastros compostos *versus* comprimento de mastros, realizada a partir de Bambus Tipo, com alma descontínua. Em negrito, tem-se os produtos obtidos a partir do Diagrama de Southwell traçado para cada caso. Os mastros de alma contínua consideraram um prolongamento da alma de 200 mm em cada extremidade em relação ao comprimento da coroa. Outra diferença é que no mastro de alma contínua, a posição dos parafusos foi espelhada a partir do centro do mastro. Na primeira coluna das Tabelas 4.3.4 e 4.3.5, tem-se os produtos $E_r I_b$, para $E_r = 10$ GPa, módulo utilizado para o traçado das curvas de ajuste, Figuras 4.3.36 a 4.3.42. O índice r foi retirado da tabela para não causar confusão na utilização, pois interessa no uso da tabela que seja calculado o produto $E I_b$ para o mastro a ser dimensionado, sobre o qual aplica-se a redução de 25%.

Para ambas as tabelas, na vertical dos comprimentos de 2, 3, 4,5 e 6 metros, tem-se as variações de $E_r I_b$ segundo as equações de ajuste das Figuras 4.3.36 a 4.3.42, respectivamente. A interpolação horizontal foi considerada linearmente entre as colunas já estabelecidas, variando-se os comprimentos de 25 em 25 cm. Por apresentar dimensões reduzidas, e sem possibilidade de instalação de espaçadores internos para mastros com alma descontínua menores que 3 metros de comprimento, então na Tabela 4.3.5 não foram considerados mastros de 2 a 2,75 metros de comprimento (vide espaçamento interno apresentado na Figura 4.3.32).

Tabela 4.3.4: Produtos *EI* versus comprimento dos mastros, alma contínua.

EI_b (GPacm ⁴)	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00	3,25	3,50	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,25	5,50	5,75	6,00
4450	1556	1910	2264	2618	2972	3272	3572	3873	4173	4473	4773	4970	5166	5363	5560	5756	5953
5000	1635	2002	2370	2737	3104	3413	3722	4032	4341	4650	4959	5162	5364	5567	5769	5971	6174
10000	2343	2829	3314	3800	4285	4675	5065	5456	5846	6236	6626	6880	7135	7389	7643	7898	8152
12700	2717	3265	3813	4360	4908	5341	5775	6208	6641	7075	7508	7789	8071	8352	8633	8915	9196
15000	3032	3632	4232	4831	5431	5901	6371	6841	7310	7780	8250	8554	8857	9161	9465	9768	10072
20000	3701	4412	5122	5833	6543	7091	7640	8188	8736	9285	9833	10183	10533	10883	11232	11582	11932
21790	3937	4686	5435	6183	6932	7508	8084	8661	9237	9813	10389	10755	11121	11487	11852	12218	12584
25000	4352	5169	5986	6803	7620	8246	8871	9497	10122	10748	11373	11767	12160	12554	12947	13340	13734
30000	4983	5903	6824	7744	8664	9365	10066	10768	11469	12170	12871	13305	13740	14174	14608	15043	15477
35000	5595	6615	7634	8654	9673	10448	11224	11999	12774	13550	14326	14799	15271	15744	16216	16689	17161
37080	5844	6904	7964	9023	10083	10889	11695	12501	13307	14113	14919	15407	15894	16382	16869	17357	17844
40000	6188	7303	8418	9533	10648	11497	12345	13194	14042	14891	15739	16247	16755	17263	17770	18278	18786
45000	6761	7968	9175	10382	11589	12509	13429	14350	15270	16190	17110	17651	18191	18732	19272	19813	20353
50000	7315	8610	9905	11200	12495	13486	14476	15467	16458	17448	18439	19009	19580	20150	20720	21291	21861
55000	7850	9229	10609	11988	13367	14427	15486	16546	17606	18665	19725	20323	20920	21518	22115	22713	23310
60000	8366	9826	11286	12745	14205	15332	16459	17587	18714	19841	20968	21590	22212	22834	23456	24078	24700
63620	8727	10243	11759	13275	14791	15966	17142	18317	19492	20668	21843	22481	23119	23757	24394	25032	25670
70000	9340	10950	12560	14169	15779	17037	18296	19554	20812	22071	23329	23992	24654	25317	25979	26642	27304
75000	9798	11477	13156	14835	16514	17836	19158	20480	21802	23124	24446	25124	25802	26481	27159	27837	28518
80000	10236	11981	13726	15470	17215	18599	19983	21368	22752	24136	25520	26212	26904	27596	28288	28980	29672
85000	10656	12463	14269	16076	17882	19327	20772	22218	23663	25108	26553	31472	32174	32877	33580	34282	30769
90000	11056	12921	14785	16650	18514	20019	21523	23028	24533	26037	27542	28253	29999	31000	32000	33001	31806
95000	11437	13356	15275	17194	19113	20676	22239	23802	25364	26927	28490	29900	30975	32051	33127	34202	32784
98740	11710	13667	15624	17581	19538	21144	22749	24355	25960	27566	29171	29889	30607	31325	32042	32760	33478
100000	11799	13769	15738	17708	19677	21297	22916	24536	26156	27775	29395	30113	30831	31550	32268	32986	33704
105000	12142	14158	16175	18191	20207	21882	23557	25233	26908	28583	30258	30976	31694	32412	33129	33847	34565
110000	12465	14524	16584	18643	20702	22431	24161	25890	27619	29349	31078	31793	32508	33223	33937	34652	35367
115000	12769	14868	16967	19065	21164	22946	24728	26511	28293	30075	31857	32566	33275	33984	34692	35401	36110
120000	13054	15188	17323	19457	21591	23425	25258	27092	28925	30759	32592	33293	33993	34694	35394	36095	36795
125000	13319	15485	17652	19818	21984	23868	25751	27635	29519	31402	33286	33975	34664	35353	36042	36731	37420
130000	13566	15753	17950	20146	22343	24275	26208	28140	30072	32005	33937	34612	35287	35962	36637	37312	37987
135000	13793	16012	18230	20449	22667	24647	26627	28607	30586	32566	34546	35204	35862	36521	37179	37837	38495
140000	14001	16240	18479	20718	22957	24983	27009	29035	31061	33087	35113	35752	36390	37029	37667	38306	38944
145000	14189	16445	18701	20957	23213	25284	27354	29425	31496	33566	35637	36253	36870	37486	38102	38719	39335
150000	14359	16628	18897	21166	23435	25549	27663	29777	31891	34005	36119	36710	37301	37893	38484	39075	39666
155000	14509	16787	19066	21344	23622	25811	27961	30110	32259	34409	36558	37122	37685	38249	38812	39376	39939
155820	14532	16812	19091	21371	23650	25813	27975	30138	32301	34463	36626	37185	37743	38302	38861	39419	39978
160000	14640	16924	19208	21492	23776	25973	28169	30366	32563	34759	36956	37489	38022	38555	39087	39620	40153

Tabela 4.3.5: Produtos EI versus comprimento dos mastros, alma descontínua.

EI_b (GPacm ⁴)	3,00	3,25	3,50	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,25	5,50	5,75	6,00
4259	2628	3027	3425	3823	4221	4620	5018	5193	5368	5543	5718	5894	6069
5000	2828	3236	3644	4052	4460	4868	5276	5458	5640	5822	6004	6186	6369
10118	4163	4640	5117	5594	6071	6548	7025	7253	7482	7710	7939	8167	8396
15000	5371	5914	6457	7000	7543	8086	8629	8900	9172	9443	9715	9986	10258
17978	6076	6660	7243	7827	8410	8994	9577	9874	10171	10468	10765	11062	11359
20000	6541	7153	7764	8375	8986	9597	10208	10522	10836	11150	11464	11778	12092
25000	7644	8324	9003	9683	10363	11043	11723	12078	12433	12788	13144	13499	13854
29582	8595	9338	10081	10824	11567	12310	13054	13445	13837	14229	14621	15012	15404
30000	8678	9427	10176	10925	11674	12423	13172	13567	13962	14357	14752	15147	15542
35000	9645	10464	11283	12101	12920	13739	14557	14991	15424	15857	16291	16724	17158
40000	10544	11433	12322	13211	14100	14989	15878	16348	16818	17289	17759	18229	18699
45000	11376	12335	13295	14254	15214	16174	17133	17639	18145	18651	19157	19662	20168
50000	12139	13170	14201	15232	16262	17293	18324	18864	19404	19944	20484	21024	21564
52557	12504	13571	14639	15706	16773	17841	18908	19465	20022	20579	21135	21692	22249
55000	12835	13938	15040	16143	17245	18348	19450	20023	20595	21168	21741	22313	22886
60000	13463	14638	15813	16988	18162	19337	20512	21116	21719	22323	22927	23531	24135
65000	14024	15271	16519	17766	19013	20261	21508	22142	22776	23410	24044	24677	25311
70000	14516	15837	17158	18478	19799	21120	22440	23103	23765	24427	25089	25752	26414
75000	14941	16336	17730	19124	20519	21913	23308	23997	24686	25375	26065	26754	27443
80000	15298	16767	18236	19704	21173	22641	24110	24825	25540	26255	26970	27685	28400
80250	15314	16787	18259	19731	21204	22676	24149	24865	25581	26297	27013	27729	28446
85000	15588	17131	18674	20218	21761	23305	24848	25587	26326	27065	27805	28544	29283
90000	15809	17428	19047	20665	22284	23902	25521	26283	27045	27807	28569	29331	30093
95000	15963	17657	19352	21046	22741	24435	26129	26913	27696	28479	29263	30046	30829
100000	16049	17820	19590	21361	23132	24902	26673	27476	28280	29083	29886	30690	31493
105000	16067	17915	19762	21610	23457	25305	27152	27974	28796	29618	30439	31261	32083
110000	16018	17943	19867	21792	23717	25642	27566	28405	29244	30083	30922	31761	32600
115000	15901	17903	19906	21908	23911	25913	27916	28771	29625	30480	31335	32189	33044
120000	15716	17797	19877	21958	24039	26120	28201	29070	29939	30808	31677	32546	33415
125000	15463	17623	19782	21942	24102	26261	28421	29303	30185	31066	31948	32830	33712
130000	15143	17382	19620	21859	24098	26337	28576	29470	30363	31256	32150	33043	33936
132133	14985	17258	19531	21804	24077	26350	28623	29521	30418	31316	32214	33112	34010
135000	14754	17073	19392	21711	24029	26348	28667	29570	30474	31377	32281	33184	34087
140000	14298	16697	19097	21496	23895	26294	28693	29605	30517	31429	32341	33253	34165
145000	13775	16255	18734	21214	23694	26174	28654	29573	30493	31412	32331	33251	34170
150000	13183	15744	18306	20867	23428	25989	28550	29476	30401	31326	32251	33176	34101
155000	12524	15167	17810	20453	23096	25739	28382	29312	30241	31171	32100	33030	33960
160000	11797	14522	17248	19973	22699	25424	28149	29082	30014	30947	31879	32812	33745

4.3.8.1 – Utilização das Tabelas

O momento de inércia da seção bruta é calculado a partir da disposição da Figura 4.3.43.

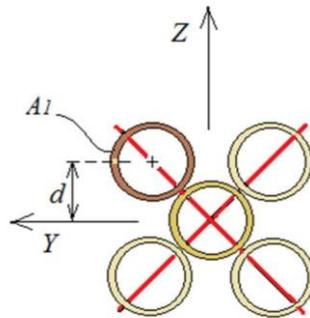


Figura 4.3.43: Disposição dos bambus para cálculo do Momento de Inércia da seção bruta.

Ou seja:

$$I_b = nI_1 + 4A_1d^2 \quad (4.3.2)$$

Onde $n = 4$ para alma descontínua e $n = 5$ para alma contínua e A_1 é a área de uma única seção transversal.

Tendo-se o módulo de elasticidade E médio do lote homogêneo de onde se extrai barras de bambus para a fabricação de um mastro qualquer, então, tem-se o produto EI_b , sobre o qual aplica-se a redução de 25%. No cruzamento do comprimento do mastro, na vertical, com o produto calculado, na horizontal, tem-se a rigidez efetiva $k_{ef} = EI$ do mastro em estudo. Obtem-se assim, a carga de Euler procurada. Fornecendo-se o comprimento l em cm , tem-se a Carga de Euler (F_E) em kN , dada por:

$$F_E = \frac{10^2 \pi^2 k_{ef}}{l^2} \quad (4.3.3)$$

Exemplo:

Seja o mastro Tipo 4 de alma contínua, com $D = 85$ mm; $t = 8,5$ mm; $l = 6$ m; $A = 20,4$ cm², e $I = 151$ cm⁴ (Tabela 4.3.3). Tem-se então $d = 8,5\cos 45$ e $I_b = 3693$ cm⁴. Se o lote tem $E = 11$ GPa, então $EI_b = 40623$ GPacm⁴.

Então, $0,75 EI_b = 30467$ cm⁴. Observando este valor para EI_b , na Tabela 4.3.4, tem-se que o produto $k_{ef} = EI$ para o comprimento de 6 metros deve situar entre 15477 GPacm⁴ e

17161 GPacm⁴. O valor pode ser obtido por interpolação linear ou, a favor da segurança, pode-se considerar o menor valor. Então:

$$F_E = \frac{\pi^2 \cdot 15477 \cdot 10^2}{600^2} = 42 \text{ kN} \quad (4.3.4)$$

4.3.8.2 – Fluência do Mastro

O Diagrama de Southwell correspondente à curva PDelta do mastro de parafusos, no trecho de carga, forneceu a carga de Euler do sistema $F_E = 54,39 \text{ kN}$ e uma imperfeição inicial $\delta_0 = 9,64 \text{ mm}$ (Tabela 4.3.2).

O mastro foi submetido à força $P_{\max} = 45,32 \text{ kN}$, 83 % da carga de Euler, por cerca de 20 minutos, para documentação do experimento, quase horizontalizando a curva PDelta, que teoricamente tenderia para a carga de Euler, Figura 4.3.10. Esse tempo fez relaxar de tal forma o sistema, que a curva de descarga não apresentou uma forma coerente para a leitura do Diagrama de Southwell. Por outro lado, o sistema apresentou um deslocamento residual de 7,86 mm, que muito provavelmente representa as deformações plásticas ocorridas por concentração das tensões nos furos dos parafusos, além de deformações viscosas ainda não recuperadas.

Contudo, da Figura 4.3.44, pode-se determinar as diferenças de deslocamentos na descarga e na carga, que estariam sustentando o mesmo carregamento. Essas diferenças, para os níveis de carga marcados na Figura 4.3.44, têm um valor médio de $45,67 \pm 2,84 \text{ mm}$. O relativamente baixo coeficiente de variação, igual a 6,2 %, indica, por um lado, que a relaxação teria atingido um limite, de tal forma a dificultar a rápida recuperação viscosa que se iniciou a partir e para baixo da carga aproximada de 12,5 kN. Considerando-se que essa diferença de deslocamentos seja devida à relaxação e dividindo-se pela imperfeição inicial $\delta_0 = 9,63 \text{ mm}$, obtida da curva de carregamento, tem-se a razão de 4,74.

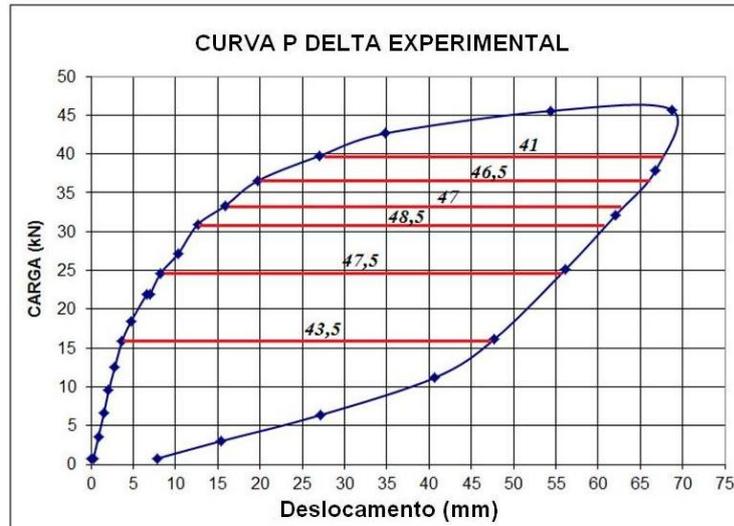


Figura 4.3.44: Curva P Delta (carga e descarga) experimental.

Ou seja, inversamente, pode-se assumir que a fluência do mastro correspondeu a $\delta_f = 4,74\delta_0$, no intervalo de carga de 12,5 kN (23% de F_E) até a carga de 40 kN (74 % de F_E). Seguindo-se o mesmo procedimento do estudo de fluência dos mastros isolados, pode-se então propor para o mastro a curva do coeficiente de fluência da Figura 4.3.45.

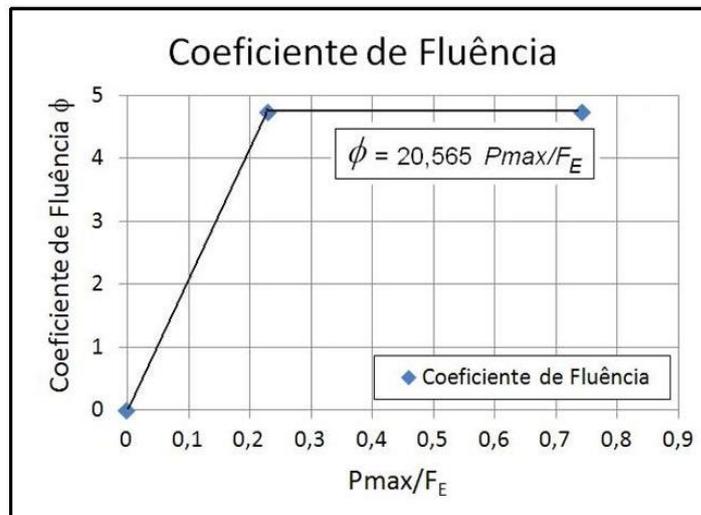


Figura 4.3.45: Coeficiente de Fluência.

Comparando-se os gráficos das Figuras 4.1.52 e 4.3.45, vê-se que o mastro foi bem mais sensível à fluência do que os bambus isolados. Ou seja, para $P_{max} = 0,4F_E$, o mastro está respondendo com uma deflexão devida à fluência $\delta_f = 4,74\delta_0$.

Considerando-se

$$\delta_T = (\delta_0 + \delta_f) \frac{F_E}{F_E - P} \quad (4.3.5)$$

tem-se que a deflexão lateral máxima vale $9,55\delta_0$. Ou seja, para este mastro em particular, que apresentou $\delta_0 = 9,63$ mm, pode-se dizer que suportaria uma carga de 21,76 kN ($0,4F_E$) com uma deflexão lateral máxima, após a fluência, de 9,2 cm, que corresponde a $l/65$.

Quanto da carga de Euler poderá ser absorvida com segurança pelo mastro, considerando-se os bambus em perfeito estado, dependerá ainda dos estados limites últimos a serem investigados:

- ✓ Compressão máxima nos furos
- ✓ Flexão dos parafusos
- ✓ Compressão máxima da alma no topo do mastro

4.3.8.3 – Quando se deve considerar a fluência

Comentários iniciais:

- a) Os mastros utilizando barras de Bambus Tipo T4 e T3 (Tabela 4.3.3), denominados MT4 e MT3, foram criados para gerar uma envoltória para as possibilidades, de tal forma que tanto o mastro MT3 com 6 metros de comprimento, como o mastro MT4 com 2 metros de comprimento não se justificam na prática.
- b) Como explicado anteriormente, as Tabelas 4.3.4 e 4.3.5 foram obtidas através dos diagramas de Southwell, que nos forneceu o produto EI para o sistema, com o emprego do software SAP 2000, aferido ao experimento.
- c) Devido à geometria particular de cada bambu, como observado anteriormente, torna-se muito difícil o desacoplamento entre a geometria representada por I e as propriedades mecânicas representadas por E , sendo uma das razões porque se optou trabalhar com o produto EI , que é suficiente para a generalização dos resultados e utilização nas equações diferenciais.
- d) Bambus com diferentes diâmetros e diferentes espessuras de parede podem ter a mesma inércia com esbeltezes diferentes. Logo, com exceção dos bambus tipo, que foram utilizados para traçar as tabelas, não se tem como prever com exatidão os valores de esbeltez dos mastros. Eles podem ser obtidos indiretamente, a partir da obtenção dos produtos EI das Tabelas 4.3.4 e 4.3.5. Neste caso, tendo-se o módulo de elasticidade do lote, pode-se calcular o momento de inércia do sistema, dividindo-se o

produto EI por E . Tendo-se a área da seção transversal média, então, pode-se dizer que um mastro qualquer tem sua esbeltez aproximada pela equação geral
$$\lambda = \frac{l}{\sqrt{\frac{I}{A}}}$$

Na Tabela 4.3.6, tem-se que todos os mastros tipo, para todos os diferentes comprimentos, tiveram esbeltez maior que 80. Segundo a ABNT (NBR 7190), todas as peças de madeira com esbeltez maior que 80 devem considerar a fluência para o cálculo da flambagem. Devido à semelhança da constituição orgânica dos dois materiais, e uma vez constatada a fluência do bambu, tanto nos bambus isolados, com esbeltez média de 173, como nos mastros tipos, adota-se aqui a mesma condição. Salienta-se que em bambus ensaiados em flambagem por Moreira (1998) em segmentos de 2 metros de comprimento com esbeltez média igual a 55, não se registrou fluência dos segmentos.

Desse modo, todos os mastros parafusados cujos comprimentos e design sigam os tipos desenvolvidos nessa tese e se encaixem nas Tabelas 4.3.4 e 4.3.5, devem considerar a excentricidade devido à fluência, independentemente do comprimento. Claro que em alguns casos a excentricidade devido à fluência poderá ter um valor desprezável, já que há outras condições limites para o mastro, que podem tornar a carga limite P_{max} muito pequena em relação à carga de Euler, diminuindo significativamente o efeito da fluência, conforme Figura 4.3.45.

Nas Tabelas 4.3.6 e 4.3.7, I_{ef} é o momento de inércia obtido a partir dos Diagramas de Southwell dos mastros tipo, dividindo-se os produtos EI pelo módulo $E_r = 10$ GPa; l_1 é o comprimento livre de um elemento, entre dois parafusos consecutivos mais distantes entre si e λ_l é a esbeltez média correspondente, que diz respeito à possibilidade de flambagem localizada desse segmento de comprimento l_1 .

Tabela 4.3.6: Esbeltez dos mastros tipo de alma contínua.

MT1 – D= 50 mm ; t= 5 mm; $A_1= 7,1 \text{ cm}^2$; $I_1= 18,1 \text{ cm}^4$; $I_b= 445 \text{ cm}^4$				
l (m)	I_{ef} (cm ⁴)	λ_{ef}	l_I (cm)	λ_I
2,0	156	95	40	25
3,0	297	104	75	47
4,5	477	122	65	41
6,0	595	145	105	66
MT2 – D= 65 mm ; t= 6,5 mm; $A_1= 11,95 \text{ cm}^2$; $I_1=51,73 \text{ cm}^4$; $I_b= 1270 \text{ cm}^4$				
l (m)	I_{ef} (cm ⁴)	λ_{ef}	l_I (cm)	λ_I
2,0	272	94	40	19
3,0	491	105	75	36
4,5	751	127	65	31
6,0	920	153	105	50
MT3 – D= 65mm ; t= 13 mm; $A_1=21,2 \text{ cm}^2$; $I_1= 76,3 \text{ cm}^4$; $I_b= 2179 \text{ cm}^4$				
l (m)	I_{ef} (cm ⁴)	λ_{ef}	l_I (cm)	λ_I
2,0	394	104	40	21
3,0	693	117	75	40
4,5	1039	144	65	35
6,0	1258	174	105	57
MT4 – D= 85 mm;t= 8,5 mm; $A_1= 20,4 \text{ cm}^2$; $I_1=151 \text{ cm}^4$; $I_b= 3708 \text{ cm}^4$				
l (m)	I_{ef} (cm ⁴)	λ_{ef}	l_I (cm)	λ_I
2,0	584	85	40	15
3,0	1008	95	75	28
4,5	1492	118	65	24
6,0	1784	143	105	39
MT5 – D= 85mm ; t= 17 mm; $A_1=36,3 \text{ cm}^2$; $I_1= 223 \text{ cm}^4$; $I_b= 6362 \text{ cm}^4$				
l (m)	I_{ef} (cm ⁴)	λ_{ef}	l_I (cm)	λ_I
2,0	873	91	40	16
3,0	1479	105	75	30
4,5	2184	130	65	26
6,0	2567	160	105	42
MT6 – D= 100 mm; t = 15 mm; $A_1= 40 \text{ cm}^2$; $I_1=373 \text{ cm}^4$; $I_b= 9874 \text{ cm}^4$				
l (m)	I_{ef} (cm ⁴)	λ_{ef}	l_I (cm)	λ_I
2,0	1171	83	40	13
3,0	1954	96	75	24
4,5	2917	118	65	21
6,0	3348	147	105	34
MT7 – D= 100 mm ; t= 30 mm; $A_1= 66\text{cm}^2$; $I_1= 478 \text{ cm}^4$; $I_b= 15582 \text{ cm}^4$				
l (m)	I_{ef} (cm ⁴)	λ_{ef}	l_I (cm)	λ_I
2,0	1453	95	40	15
3,0	2365	122	75	28
4,5	3662	135	65	24
6,0	3998	173	105	39

Tabela 4.3.7: Esbeltez dos mastros tipo de alma descontínua.

MT1 – D= 50 mm ; t= 5 mm; $A_1= 7,1 \text{ cm}^2$; $I_1= 18,1 \text{ cm}^4$; $I_b= 445 \text{ cm}^4$				
l (m)	I_{ef} (cm ⁴)	λ_{ef}	l_l (cm)	λ_l
3,0	262	110	75	47
4,5	502	120	65	41
6,0	607	144	105	66
MT2 – D= 65 mm ; t= 6,5 mm; $A_1= 11,95 \text{ cm}^2$; $I_1=51,73 \text{ cm}^4$; $I_b= 1270 \text{ cm}^4$				
l (m)	I_{ef} (cm ⁴)	λ_{ef}	l_l (cm)	λ_l
3,0	416	113	75	36
4,5	703	131	65	31
6,0	840	159	105	50
MT3 – D= 65mm ; t= 13 mm; $A_1=21,2 \text{ cm}^2$; $I_1= 76,3 \text{ cm}^4$; $I_b= 2179 \text{ cm}^4$				
l (m)	I_{ef} (cm ⁴)	λ_{ef}	l_l (cm)	λ_l
3,0	608	125	75	40
4,5	958	150	65	35
6,0	1136	183	105	57
MT4 – D= 85 mm;t = 8,5 mm; $A_1= 20,4 \text{ cm}^2$; $I_1=151 \text{ cm}^4$; $I_b= 3708 \text{ cm}^4$				
l (m)	I_{ef} (cm ⁴)	λ_{ef}	l_l (cm)	λ_l
3,0	860	103	75	28
4,5	1305	126	65	24
6,0	1540	154	105	39
MT5 – D= 85mm ; t= 17 mm; $A_1=36,3 \text{ cm}^2$; $I_1= 223 \text{ cm}^4$; $I_b= 6362 \text{ cm}^4$				
l (m)	I_{ef} (cm ⁴)	λ_{ef}	l_l (cm)	λ_l
3,0	1250	114	75	30
4,5	1891	140	65	26
6,0	2250	170	105	42
MT6 – D= 100 mm; t = 15 mm; $A_1= 40 \text{ cm}^2$; $I_1=373 \text{ cm}^4$; $I_b= 9874 \text{ cm}^4$				
l (m)	I_{ef} (cm ⁴)	λ_{ef}	l_l (cm)	λ_l
3,0	1531	108	75	24
4,5	2415	130	65	21
6,0	2845	159	105	34
MT7 – D= 100 mm ; t= 30 mm; $A_1= 66\text{cm}^2$; $I_1= 478 \text{ cm}^4$; $I_b= 15582 \text{ cm}^4$				
l (m)	I_{ef} (cm ⁴)	λ_{ef}	l_l (cm)	λ_l
3,0	1499	140	75	28
4,5	2862	153	65	24
6,0	3401	186	105	39

Com relação ao mastro de envoltória MT1, as inércias efetivas para os mastros de 4,5 m e 6 m iguais a 477 e 595 cm⁴, respectivamente (Tabela 4.3.6) não deveriam ser maiores do que a inércia bruta $I_b = 445 \text{ cm}^4$. Na realidade, esses bambus esbeltos, com esse comprimento, estão trabalhando com a inércia bruta, o que indica que o modelo numérico estaria mais rígido do que o correspondente modelo físico. Mas isto já se havia constatado, ou seja, que o modelo numérico havia ficado cerca de 25 % mais rígido do que o protótipo ensaiado. A diferença de 34 % entre as inércias de 595 cm⁴ e 445 cm⁴ pode então ser considerada no âmbito de todas as simplificações adotadas, se for considerado também que a incerteza no produto EI está tanto em E como em I , e os momentos efetivos foram calculados para $E = 10 \text{ GPa}$.

4.3.8.4 – Quantas divisões adotar quando o comprimento se situar entre 3 e 4,5 m

A esbeltez máxima do comprimento livre dos mastros tipo aconteceu para o mastro com bambu tipo 1 (denominado MT1), para o comprimento de 6 m, onde $\lambda_l = 66$, para um comprimento destravado $l_l = 105$ cm. No protótipo ensaiado, adotou-se um comprimento livre máximo de 127,5 cm, com 3 divisões, resultando numa esbeltez local $\lambda_l = 42$ ($A = 24,3 \text{ cm}^2$; $I = 228 \text{ cm}^4$). Considerando-se que esta seja a esbeltez máxima para os comprimentos destravados, a Tabela 4.3.8 apresenta para cada mastro tipo, os seguintes comprimentos máximos destravados:

Tabela 4.3.8: Medidas para comprimentos máximos destravados.

Comprimentos destravados máximos (cm) para $\lambda_{l_{\max}} = 42$						
MT1	MT2	MT3	MT4	MT5	MT6	MT7
67	87	80	109	104	128	113

Contudo, o protótipo que não apresentou problema de instabilidade local, foi dividido em 3 partes, e o comprimento destravado estava em posição bem mais desfavorável que os mastros tipo, pois nestes há travamento no centro do mastro. Portanto, a não ser pelo mastro MT1, extremamente esbelto e que dificilmente seria construído, principalmente utilizando-se parafusos de 16 mm e 13 mm, pode-se adotar para todos os mastros um comprimento destravado máximo de 105 cm, entre 2 parafusos consecutivos num mesmo bambu, ainda que para MT3 tenha $\lambda_l = 57$ que é maior que 42. Conclui-se desse modo, que adotando-se as disposições construtivas propostas nessa tese, com as respectivas distâncias entre furos e entre furos e bordos, mastros com comprimentos maiores ou iguais a 3,7 metros deverão ser divididos em 4 partes, e até esse valor, poderão ser divididos em 3 partes, com exceção de mastros de bambus de muito pequeno diâmetro, tipo MT1.

4.3.8.5 – Equação diferencial da Linha Elástica

Tendo-se o produto EI , o restante do problema pode ser resolvido a partir da equação diferencial da linha elástica, para o cálculo das forças cortantes máximas nos parafusos, com as quais se verificam as pressões máximas nos furos bem como a flexão dos mesmos. Partindo-se de

$$EIz'' = -M(x) \quad (4.3.6)$$

E derivando-se uma vez tem-se

$$EIz''' = -V(x) \quad (4.3.7)$$

O esforço cortante somente surgirá entre os parafusos que conectam a alma à coroa, à medida que o mastro é carregado, provocando então deflexões laterais medidas durante o experimento, δ_m . Supondo-se que a curva de deflexão medida seja dada pela Equação 4.3.8:

$$z(x) = \delta_m \operatorname{sen} \frac{\pi x}{l} \quad (4.3.8)$$

Derivando-se 3 vezes e substituindo-se na Equação 4.3.7, tem-se

$$V(x) = EI\delta_m \frac{\pi^3}{l^3} \cos \frac{\pi x}{l} \quad (4.3.9)$$

A equação é totalmente coerente, fornecendo o cortante máximo em $x = 0$ e cortante nulo em $x = l/2$.

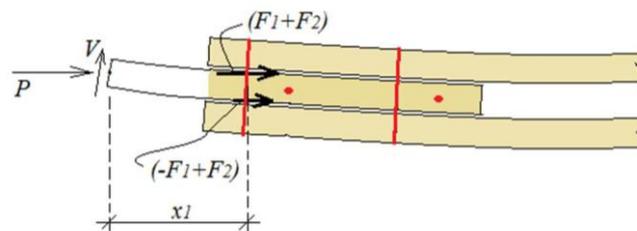


Figura 4.3.46: Cortante máximo nos parafusos.

Da Figura 4.3.46, pode-se considerar que esta força cortante provocará um fluxo de cisalhamento $q(x)$ em cada alinhamento de parafusos, dada pela Equação 4.3.10, uma vez que existem duas linhas de parafusos.

$$q(x) = \frac{V(x)Q_1}{I_b} \quad (4.3.10)$$

Onde $Q_1 = A_1 d$ é o momento estático de uma única seção em relação ao eixo Z, I_b é o momento de inércia da seção bruta em relação ao mesmo eixo.

Portanto, a força total que atuará na intersecção da alma com a coroa, em uma linha de parafusos, devida à deflexão medida, para cada passo de carga, vale:

$$F_1 = \int_0^{l/2} q(x) dx \quad (4.3.11)$$

Substituindo-se a Equação 4.3.9 na Equação 4.3.10 e 4.3.10 em 4.3.11 e integrando-se à Equação 4.3.9, obtém-se:

$$F_1 = \frac{F_E}{I_b} Q_1 \delta_m \quad (4.3.12)$$

δ_m é o deslocamento máximo medido no centro do mastro. Este deslocamento, em função da carga aplicada P , para pequenos deslocamentos, pode ser dado por:

$$\delta_m = \frac{\delta_0 + \delta_f}{\frac{F_E}{P} - 1} \quad (4.3.13)$$

Substituindo-se $Q_1 = A_1 d$ e a Equação 4.3.13 na Equação 4.3.12 e considerando-se a favor da segurança, que os 4 parafusos de 16 mm da extremidade absorvam todo o esforço cortante, tem-se que a força cortante máxima, atuante no parafuso mais próximo da extremidade, onde ocorre o maior deslizamento, vale:

$$F_1 = \pm \frac{F_E A_1 d (\delta_0 + \delta_f) P}{2 I_b (F_E - P)} \quad (4.3.14)$$

onde a constante 2 refere-se aos dois parafusos que estão no mesmo alinhamento da extremidade.

Na Equação 4.3.14 o sinal positivo refere-se à força cortante no trecho do parafuso que conecta a alma às barras comprimidas da coroa e o sinal negativo refere-se à força cortante no trecho do parafuso que conecta a alma às barras tracionadas da coroa. Caso o mastro seja de alma descontínua, deve-se superpor a essas forças devidas à flexão, a força $F_2 = P/8$. Então a equação geral para a estimativa das forças máximas em um parafuso é dada por:

$$F_T = F_1 + F_2 = \pm \frac{F_E A d \delta_m}{2 I_b} + \frac{P}{8} \quad (4.3.15)$$

onde

$$\delta_m = \frac{(\delta_0 + \delta_f)P}{(F_E - P)} \quad (4.3.16)$$

Pode-se considerar que essas forças transferem-se em igual grandeza para os furos, podendo-se dessa forma verificar a pressão média no furo dada por:

$$\sigma = \frac{F_T}{td_p} \quad (4.3.17)$$

Tem-se, portanto, outra condição para a carga limite P , pois as tensões de compressão não podem exceder o limite de resistência local à compressão paralela às fibras f_{c0} ou seja, a Equação 4.3.18 permite avaliar a carga limite para pressão máxima no furo:

$$\frac{F_T}{td_p} \leq f_{c0} \quad (4.3.18)$$

A flexão do pino pode também ser verificada a partir das forças dadas pela Equação 4.3.15, através do modelo numérico da Figura 4.3.47. Os apoios e cargas estão posicionados no centro das paredes dos bambus interligados. Entre os apoios internos e as forças solicitantes, deixou-se também uma folga caso os bambus não se toquem devido às imperfeições localizadas (saliências dos nós), o que dependerá da espécie dos bambus.

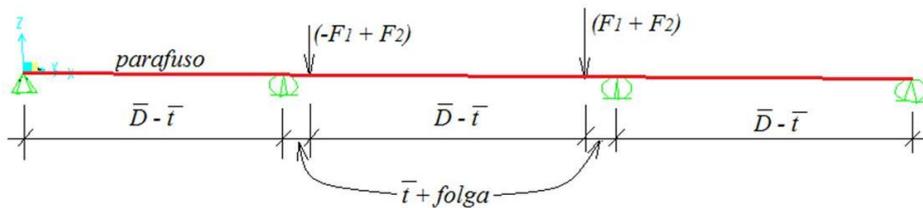


Figura 4.3.47: Apoios e cargas no centro das paredes dos bambus.

Com esse modelo, podem-se estimar os momentos fletores e cortantes máximos nos parafusos, Figuras 4.3.48 e 4.3.49, tanto do mastro experimental como dos mastros tipo. Com este modelo aplicado para alma contínua, onde se tem $F_2 = 0$, constatou-se poder aplicar uma força axial limite nos mastros tipo, $P_{max} = 0,66 F_E$ sem problemas de flexão do parafuso de aço, para o qual foi considerado uma tensão de escoamento $f_y = 240$ MPa. Contudo, para alma descontínua, em que se tem $F_2 \neq 0$ a carga limite não pôde ultrapassar 64 kN, para não haver escoamento do parafuso.

Outro estado limite último a ser investigado é a tensão máxima de compressão no bambu, devido à flexão do espaçador da extremidade mais esbelta, Figura 4.3.22b.

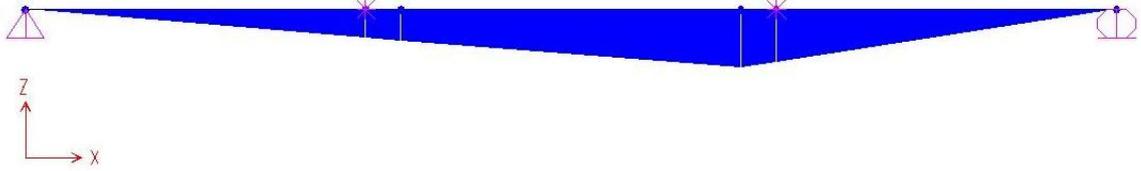


Figura 4.3.48: Momentos fletores.



Figura 4.3.49: Forças cortantes.

Partindo-se da equação deformada do mastro, pela Equação 4.3.19 pode-se calcular as tensões máximas em qualquer posição do mastro.

$$\delta(x) = \delta_T \operatorname{sen} \frac{\pi x}{l} \quad (4.3.19)$$

onde

$$\delta_T = \frac{F_E}{(F_E - P)} (\delta_0 + \delta_f) \quad (4.3.20)$$

Supondo-se que o ponto de momento máximo situe-se a uma distância x_1 do apoio, pode-se então estabelecer outra condição para a carga limite, ou seja, as tensões de compressão máximas na seção mais solicitada:

$$\frac{P}{A_1} + \frac{P\delta(x_1)D_1}{2I_1} \leq f_{c0} \quad (4.3.21)$$

Finalmente e não menos importante, é a limitação do deslocamento lateral máximo, o estado limite de utilização. Os bambus caracterizam-se por terem resistência mecânica

elevada, mas com modo de elasticidade relativamente baixo. Fazendo-se $x = l/2$ na Equação 4.3.19, a quarta condição para o estado limite, é dada pela Equação 4.3.22.

$$\delta_T \leq \delta_{lim} \quad (4.3.22)$$

δ_{lim} é o deslocamento lateral limite, que pode ser estabelecido de acordo com o adequado funcionamento na utilização bem como por questões estéticas. Normalmente é estabelecido em função do comprimento do mastro.

Como aplicação das equações deduzidas, investiga-se a seguir as tensões limites e deslocamentos laterais para o mastro ensaiado.

Compressão máxima nos furos

Inicia-se por avaliar a pressão máxima no furo do primeiro parafuso mais próximo da extremidade, para $P_{max} = 45,32$ kN, com um deslocamento lateral total $\delta_m = 68,72$ mm e $F_E = 54,40$ kN. Tem-se também os seguintes dados:

$\bar{D} = 95,2$ mm $\bar{t} = 9$ mm, de onde se calculam $A_1 = 24,4$ cm², $I_1 = 229$ cm⁴; $d = 6,73$ cm; $I_b = 5337$ cm⁴.

Substituindo-se esses valores na Equação 4.3.15, obtém-se força máxima de compressão no furo:

$$F_{max} = F_1 + F_2 = + \frac{54,4 \times 24,4 \times 6,73 \times 6,87}{2 \times 5337} + \frac{45,32}{8} = 5,74 + 5,67 = 11,41 \text{ kN} \quad (4.3.23)$$

Tem-se desse modo que as tensões máximas de compressão nos furos, considerando-se $\bar{t} = 8,95$ mm e o diâmetro do parafuso $d_p = 15,9$ mm, é dada pela Equação 4.3.17.

$$\sigma_c = \frac{11,41 \times 10^3}{9 \times 15,9} = 79,7 \text{ MPa} \quad (4.3.24)$$

Esse valor já atinge o limite de resistência à compressão paralela, encontrado para o lote desses bambus, igual a 80 ± 9 MPa (MOREIRA, 1998, e SILVA *et al*, 2014). Ou seja, as

deformações residuais registradas na descarga do mastro devem-se principalmente a estes esmagamentos das fibras no contato do parafuso com o furo.

4.3.8.6 – Flexão dos parafusos

Se de um lado a parede do bambu está solicitada com a força de 11,41 kN, do outro ela estaria sendo solicitada por -0,08 kN (sendo -5,75 kN + 5,67 kN).

Para a modelagem do parafuso, as cargas foram consideradas atuantes no centro da parede do bambu central (alma) enquanto os apoios foram colocados também no centro das paredes dos dois bambus laterais (coroa) interligados pela alma. Não foi dado nenhum espaçamento entre os bambus, por se constatar durante a fabricação que ao se apertar as porcas dos parafusos, os bambus se tocaram. Dependendo da espécie de bambu e da razão dos diâmetros nodais pelos diâmetros internodais, sempre menores, deve-se prever pelo menos 5 mm de espaçamento entre os bambus interligados, o que aumentará sensivelmente os momentos fletores máximos no parafuso.

O momento fletor máximo de 0,052 kNm gera tensões normais máximas nos parafusos de 15,9 mm de 133 MPa que é menor do que 738 MPa, não registrando neste caso escoamento do parafuso (Figura 4.3.50); diferentemente do resultado numérico observado no item 4.3.5. Na realidade, o modelo numérico foi interessante e prático após ajustado ao experimento para a obtenção das curvas PDelta e Diagramas de Southwell, mas não reflete a correta solicitação em todos os componentes do mastro, razão pela qual partiu-se para as equações diferenciais.

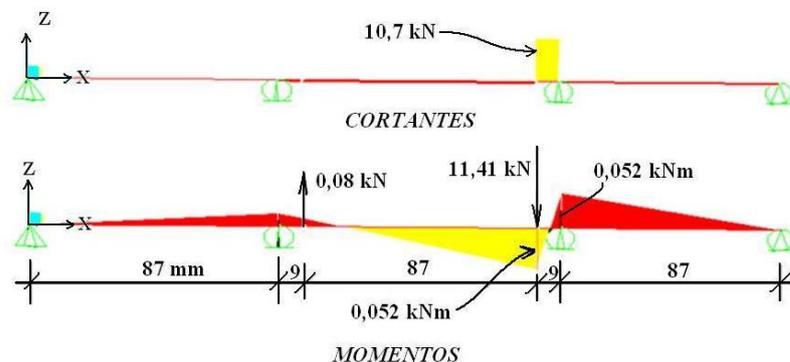


Figura 4.3.50: Esforços solicitantes no parafuso mais carregado do mastro.

Por outro lado, se o material relaxa, há um alívio da força F_1 no parafuso, Equação 4.3.15, termo devido à flexão, ou seja, somente a componente elástica do deslocamento lateral estaria solicitando o parafuso, juntamente com F_2 caso a alma seja descontínua.

Inversamente, se o mastro flui sob uma força máxima de compressão P_{max} , um peso morto colocado sobre o topo do mastro, então do mesmo modo o acréscimo de deslizamento devido à fluência não iria aumentar a força máxima no parafuso, embora as tensões máximas de compressão nos bambus arqueados, na zona côncava próxima ao centro do mastro, aumentem devido ao aumento dos momentos fletores, já que os braços de alavanca de P_{max} aumentam. Ainda assim, considerou-se na Equação 4.3.14, o deslocamento δ_f devido à fluência, conservativamente.

4.3.8.7 – Compressão máxima da alma no topo do mastro

Para a avaliação das tensões de compressão máximas, ocorridas no ponto 1, Figura 4.3.22, basta aplicar a Equação 4.3.19, onde $\delta_T = \delta_0 + \delta_m = 9,5 + 68,7 = 78,2$ mm. Então, para a carga $P_{max} = 45,32$ kN; $\delta_T = 68,7$ mm; $A_I = 24,3$ cm²; $I_1 = 228$ cm²; $D_1 = 9,5$ cm; $x_1 = 32,5$ cm, tem-se pela Equação 4.3.19:

$$\delta(32,5) = 6,872 \times \text{sen} \frac{\pi \times 32,5}{600} = 1,16 \text{ cm} \quad (4.3.25)$$

E da Equação 4.3.21, obtém-se

$$\frac{45,32}{24,3} + \frac{45,32 \times 1,16 \times 9,5}{2 \times 228} = 3 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 30 \text{ MPa} \quad (4.3.26)$$

Este valor está bem aquém do limite de resistência à compressão paralela, como visto (igual a 80 ± 9 MPa).

Deste modo confirma-se que o estado limite do mastro ensaiado ficou estabelecido pelo esmagamento dos furos, fenômeno inclusive detectado visualmente durante os ensaios, para a carga de compressão $P = 0,83 F_E$.

A avaliação do estado limite de utilização foi realizada no item sobre fluência do mastro, constatando-se que a fluência é muito relevante para verificação do mastro, podendo vir a limitar a carga no caso de mastros esbeltos, por poderem exigir cargas menores que os estados limites últimos, sob penalidade de trazerem prejuízos estéticos.

Capítulo 4

Parte 4

MASTRO DE FEIXE

Introdução

O design do mastro de feixe de bambu, proposto e analisado nesta parte da tese consiste de um conjunto de sete barras de bambu, sendo uma barra central denominada alma, e outras seis unidades de barras distribuídas em torno dessa barra central, denominadas de barras de coroamento. Esse design se mostrou ideal para bambus com diâmetros externos com valores próximos entre si ao longo do comprimento, fazendo com que as barras de coroamento se aproximassem umas das outras, evitando-se vazios.

Esta parte do capítulo 4 trata do projeto e fabricação dos mastros de feixe e a análise numérica que permitiu o acompanhamento dos experimentos, construção dos mastros, dos testes de compressão axial, com medições automáticas de carga e deflexão lateral que permitiram a aferição dos modelos numéricos, bem como das técnicas de dimensionamento.

4.4.1 – Projeto do Mastro

O primeiro protótipo consistiu de um segmento de bambu central ou alma, de 6 m de comprimento circundado por seis segmentos de 3,6 m, formando a coroa. As características geométricas dessas barras são apresentadas na Tabela 4.4.1. Para a coroa, as dimensões tabeladas são os valores médios das seis barras. Os bambus foram unidos pelas cintas de aço de $14,3 \text{ mm}^2$ de área, distribuídas ao longo do comprimento, de acordo com o pré-dimensionamento. A alma, tem as razões geométricas: $D_T/D_B = 0,68$; $t_T/t_B = 0,61$; $I_T/I_B = 0,21$; $A_T/A_B = 0,43$. A média das razões geométricas das barras de coroamento são: $D_T/D_B = 0,83$; $t_T/t_B = 0,78$, $I_T/I_B = 0,47$, $A_T/A_B = 0,43$; onde os índices “T” e “B” indicam o Topo e a Base dos bambus, respectivamente. Não houve preocupação de se selecionar os segmentos

com medições prévias destas razões, pois a seleção ocorreu visualmente, o que diminuiu o tempo de seleção e aumentou o aproveitamento das barras, que tiveram como condição serem visualmente retilíneos e ausentes de defeitos de furos, fissuras ou ataques de fungos.

Tabela 4.4.1: Características geométricas da barra central (alma) e das barras laterais (coroa) do primeiro mastro de feixe.

Características do Bambu	Alma		Coroa	
	Topo	Base	Topo	Base
Média do Diâmetro (mm)	77,3	113,2	77,8	93,9
Média da Espessura de parede (mm)	7,2	11,8	7,1	9,1
Diâmetro Interno (mm)	62,9	89,6	63,6	75,7
Momento de Inércia (cm ⁴)	98	467	100	212
Área Efetiva (cm ²)	15,8	36,6	15,8	36,6

4.4.2 – Análise Numérica

A modelagem considerou elementos finitos de barra tubulares – pipes – de 200 mm de comprimento, para cada um dos bambus, com inércias variáveis de segmento a segmento. Todas as barras da coroa ficam a uma distância do eixo da alma, igual à média dos diâmetros correspondentes naquela posição ao longo do mastro. Ainda que tenha sido medida uma imperfeição inicial de 20 mm, observou-se que o aperto das fitas metálicas sobre as barras de coroamento, tendiam a tornar o eixo retilíneo, ao mesmo tempo em que não se observava o plano de deflexão inicial da alma. Mesmo com este fato, preferiu-se fazer a modelagem com uma deflexão inicial da alma de $\delta = 20$ mm.

As barras foram agrupadas em feixes pelas cintas metálicas as quais foram apertadas com auxílio de máquina de cintar, já observada na Figura 3.2.6.2. Na modelagem, essas cintas foram simuladas por parafusos de aço de seção circular maciça que interligam o eixo das barras. Assim, variando-se o diâmetro dos parafusos, pode-se calibrar o modelo numérico aos resultados experimentais. Considerou-se o peso específico do material bambu igual a 7,9 kN/m³, e o módulo de elasticidade de 11,9 GPa, valores médios obtidos para o lote de onde se retiraram os elementos do protótipo. Na Figura 4.4.1, pode-se observar o projeto e a localização das cintas metálicas no conjunto do mastro.

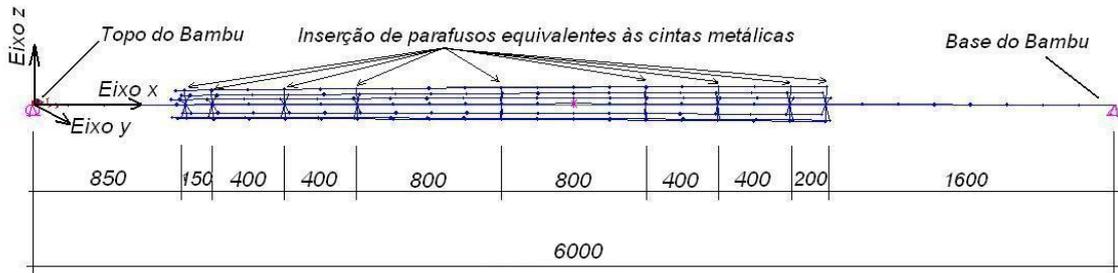


Figura 4.4.1: Projeto e localização das cintas metálicas no primeiro mastro de feixe.

Com os resultados das simulações foram traçados os diagramas de Southwell, de onde se obteve a Carga de Euler do sistema, obtida pelo inverso da inclinação da reta do diagrama. A Figura 4.4.2 apresenta os deslocamentos obtidos para a força de 18 kN, valor limite do experimento; os eixos dos bambus foram interligados por parafusos de 6,1 mm de diâmetro, obtido pelo ajuste do modelo numérico aos resultados experimentais.

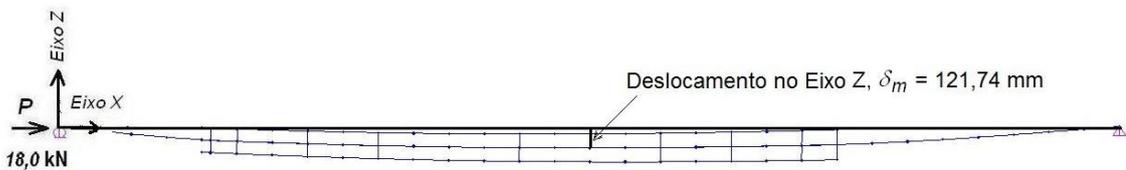


Figura 4.4.2: Linha elástica para $P = 18$ kN.

Do diagrama de Southwell numérico, Figura 4.4.3, obteve-se a carga de Euler de 24,3 kN. Do mesmo modo, a imperfeição inicial do sistema é obtida pelo ponto em que a reta cruza o eixo horizontal dos deslocamentos, tendo-se $\delta_0 = 31$ mm.

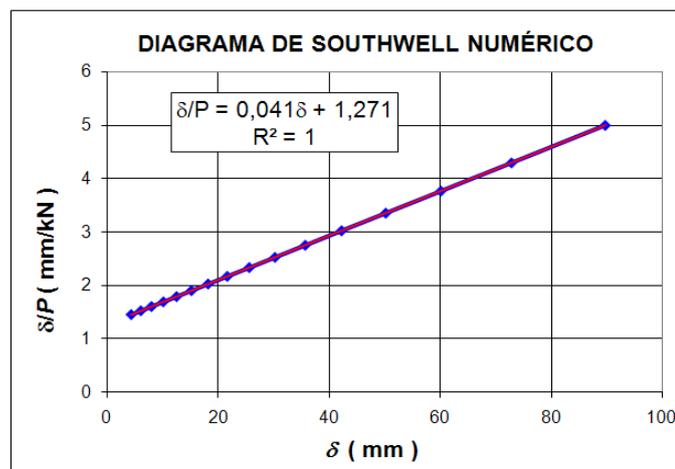


Figura 4.4.3: Diagrama de Southwell Numérico.

4.4.3 – Design e Fabricação

A grande vantagem dessa proposta é a forma relativamente simples de se produzir o mastro de feixe, que sem dúvida consome mais bambus que os demais mastros que foram estudados. Contudo, o que se perde em consumo de materiais ganha-se em facilidade construtiva. Seguindo-se as disposições previstas pela modelagem numérica, nas Figuras 4.4.4 e 4.4.5 têm-se algumas etapas de fabricação do mastro, em que se posicionam os bambus adequadamente, por exemplo, amarrando-os com corda, para em seguida juntá-los com uma cinta de aço inoxidável de seção de 19 mm de largura por 0,75 mm de espessura, que é apertada e cortada utilizando a mesma ferramenta. O processo é finalizado com um clip que trava a cinta metálica. A Figura 4.4.6 apresenta o aspecto finalizado do mastro, já no pórtico de reação.



Figura 4.4.4: Instalação da cinta metálica.



Figura 4.4.5: Tensão e corte da cinta metálica.



Figura 4.4.6: Mastro finalizado e instalado no pórtico de reação.

Projeto do Experimento

Considerando-se a situação de uso mais desfavorável, o mastro foi testado horizontalmente (Figura 4.4.7). De experiências de testes de compressão de bambus isolados constatou-se que medições de deslocamentos realizadas no centro da barra, ainda que o bambu tenha inércia variável ao longo do comprimento, produzem resultados de alta precisão. Isso facilita muito o experimento e generalização dos resultados, pois a reta do diagrama de Southwell é deduzida para barras prismáticas, para medições efetuadas no centro da barra. Desse modo, foram instalados três Transdutores de Deslocamento (DT) na sessão central do mastro, DT-2 medindo deslocamentos verticais e os DT-1 e DT-3 posicionados a 45 graus, (Figura 4.4.8), onde chapas equalizadoras recebem as hastes dos DTs (Figura 4.4.9). Desse modo, procura-se pela gravidade, induzir um plano de deflexão para o mastro, para facilitar as medições. O mesmo sistema de rótulas e medidores experimentais anteriores foram utilizados neste experimento. Na extremidade de menor diâmetro, tem-se portanto uma célula de carga de 100 kN conectada a um atuador hidráulico de operação manual (Figura 4.4.10). Célula de carga e DTs foram conectados ao Sistema de Aquisição de Dados.



Figura 4.4.7: Projeto do experimento.

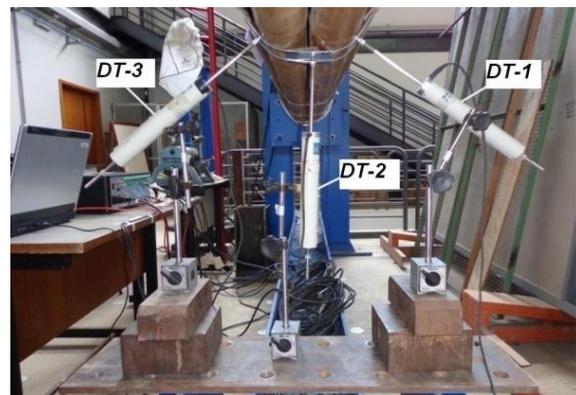


Figura 4.4.8: Posicionamento dos DTs.

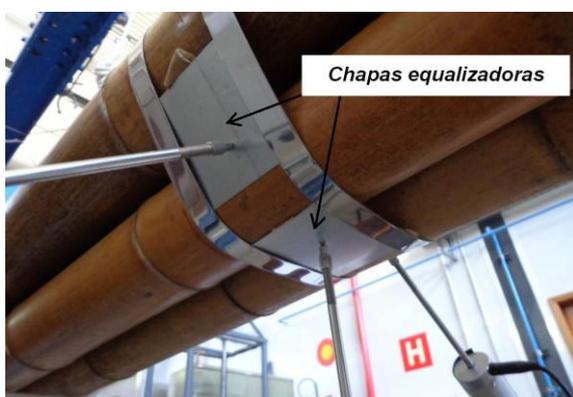


Figura 4.4.9: Chapas equalizadoras.

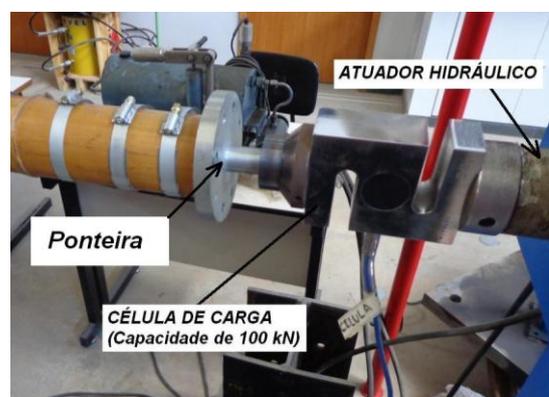


Figura 4.4.10: Ponteira, célula de carga e atuador hidráulico.

4.4.4 – Ensaio Mecânico e Resultados

Foram aplicados três ciclos iniciais de carga, sendo dois ciclos iniciais com passos de carga de 2,5 kN e outro ciclo com passos de 3,0 kN, até o limite de 14,8 kN. Após a descarga do último ciclo, em passos de carga de 3,0 kN, o mastro foi levado à carga limite de 17,8 kN, (Figura 4.4.11), caracterizada por não haver registro adicional de carga para 3 novos passos de deslocamentos consecutivos do atuador. O deslocamento residual de 6 mm da descarga 4 indica o surgimento de deformações plásticas que conduziram à carga limite.

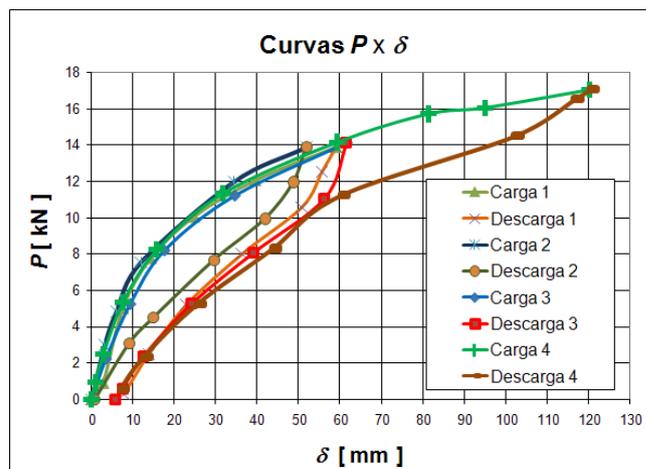


Figura 4.4.11: Cargas $P \times$ deslocamentos δ

Esse resultado foi utilizado para calibrar a modelagem numérica, conduzindo a parafusos de 6,1 mm de diâmetro, que fazem o papel das cintas metálicas, em que a rigidez à flexão do parafuso simula o atrito entre as barras, contrapondo-se ao livre deslizamento. Tem-se na (Figura 4.4.12), uma comparação das curvas $P \times \delta$ numérica e experimental.

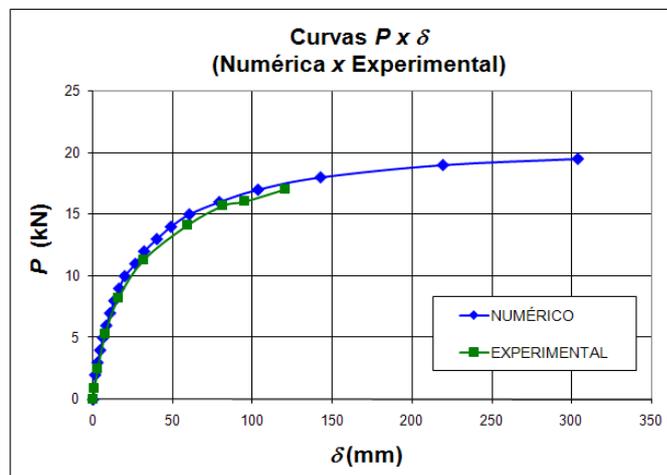


Figura 4.4.12: Cargas $P \times$ Deslocamentos δ (Numérica \times Experimental).

Do mesmo modo, na Figura 4.4.13 tem-se o Diagrama de Southwell do experimento, que forneceu um valor F_E de 19,6 kN, contra 24,3 kN obtido numericamente. Essas diferenças podem estar associadas ao módulo de elasticidade tomado para os bambus, igual a 11,9 GPa. Coeficientes de variação maiores que 20 % podem ser considerados para lotes em que não se tem a garantia do controle de idade dos bambus, como é o caso.

Por outro lado, diminuindo-se o diâmetro dos parafusos que simulam as cintas metálicas, diminui-se a rigidez do mastro, reduzindo-se a carga de Euler.

Por outro lado a reta de tendência da Figura 4.4.13 cruza o eixo horizontal em $\delta_0 = 20,9$ mm, valor da imperfeição inicial do sistema, contra 31 mm obtidos por simulação. A menor imperfeição acusada no experimento deve-se muito provavelmente ao fato da direção da imperfeição geométrica do feixe, de muito difícil previsão, ter agido contra a gravidade, indicando por sua vez que deve-se reduzir a rigidez da simulação, seja porque o módulo de elasticidade médio é menor, seja porque deve-se permitir maior deslizamento entre as barras, com a redução do diâmetro dos parafusos.

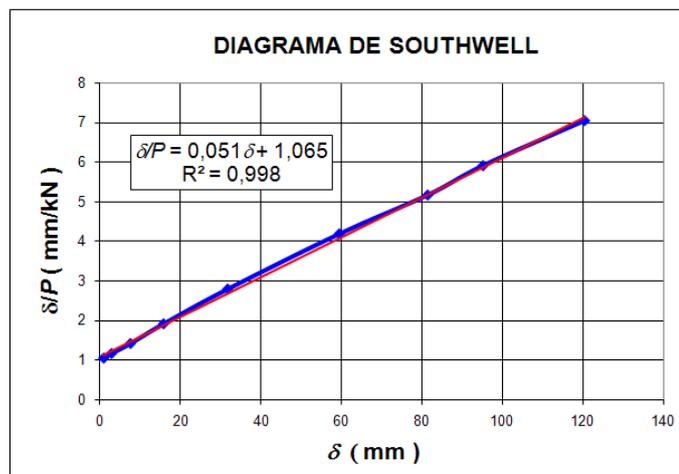


Figura 4.4.13: Diagrama de Southwell Experimental.

Tem-se na Figura 4.4.14 a linha elástica do mastro, sob carga limite, onde se vê que a deflexão lateral contou principalmente com a rotação dos trechos livres do bambu central, e em particular, com a extremidade de menor inércia.



Figura 4.4.14: Rotações relativas da extremidade de menores inércias.

Com o auxílio de uma caneta laser, posicionada no bordo de uma das barras superiores da coroa e apontando-se para o outro bordo da mesma barra, e medindo-se o deslocamento da superfície do bambu, mediu-se um deslocamento aproximado de 20 mm para o trecho em feixe, Figuras 4.4.15 e 4.4.16. Como a deflexão máxima medida no centro do mastro foi de 120,5 mm, para a carga limite de 17,8 kN, infere-se que cerca de 100,5 mm foram provenientes das deformações dos trechos livres da alma.

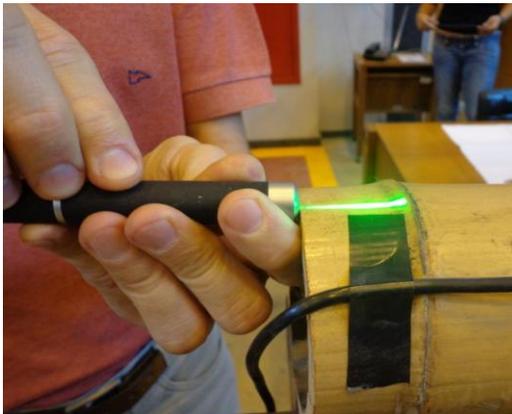


Figura 4.4.15: Posicionamento da caneta laser na extremidade superior da barra.

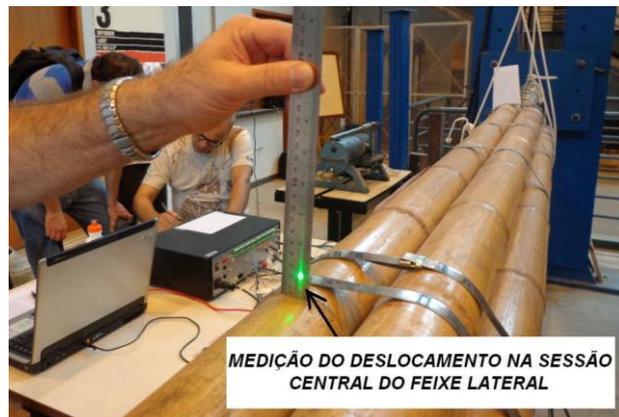


Figura 4.4.16: Deflexão de 20 mm no centro do mastro.

4.4.5 – Análise dos resultados experimentais e numéricos

O fato da simulação ser ajustável aos resultados experimentais reflete a regularidade do comportamento mecânico do bambu, que apesar de ser natural, não homogêneo e não prismático, permite ser modelado como de seção circular, com variação linear de inércia de um extremo ao outro, com elementos de barra – pipe – e material isotrópico, o que não deixa de ser surpreendente. A modelagem apontou que com os esforços solicitantes de força axial igual a 18 kN, e momento fletor foi de 1,81 kNm , na seção mais solicitada – seção 5 – do trecho livre de menor inércia, $I_4 = 127 \text{ cm}^4$, área = 18,2 cm^2 (Figura 4.4.17).

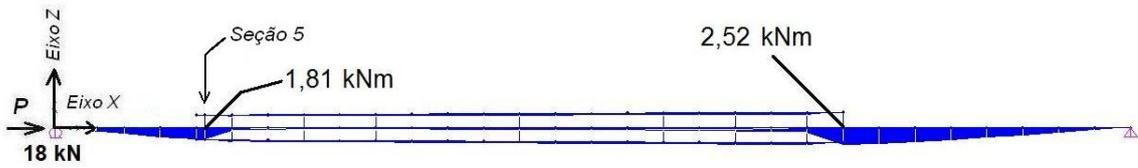


Figura 4.4.17: Momento fletor no plano XZ.

Assim, tem-se

$$\sigma = \frac{18000}{1820} + \frac{1810000}{1270000} \cdot \frac{82,25}{2} = 68,5 \text{ MPa}$$

Essa tensão de compressão máxima igual a 68,5 MPa pode significar o início do esmagamento local das fibras para bambus da espécie *Phyllostachys pubescens*. Todos os demais pontos do mastro estão com tensões de compressão paralela bem inferiores a essa, tendo-se, portanto, localizado, o ponto que estabeleceu a carga limite. Se fosse insistido na aplicação de novos carregamentos, a parede do bambu teria instabilidade local nesta posição. Este foi um dos modos de ruptura constatados por Moreira (1998) em estudos de flambagem de elementos isolados de dois metros de comprimento. Constatou-se naquelas investigações que a instabilidade local ocorreria após as tensões atingirem o limite de resistência à compressão das fibras, em bambus sem rachaduras. Este fato se deve às razões entre o diâmetro e espessura de parede D/t das seções transversais bem como às razões entre a distância internodal e espessura de parede l_n/t do trecho em questão; razões estas estabelecidas geneticamente ao longo de milhões de anos de adaptações da espécie às ações ambientais.

A força máxima de tração nos parafusos que simulam o aprisionamento causado pelas cintas de aço de $14,3 \text{ mm}^2$ foi de 0,97 kN, Figura 4.4.18, produzindo tensões inferiores a 63 MPa, que seriam facilmente absorvíveis pela cinta.

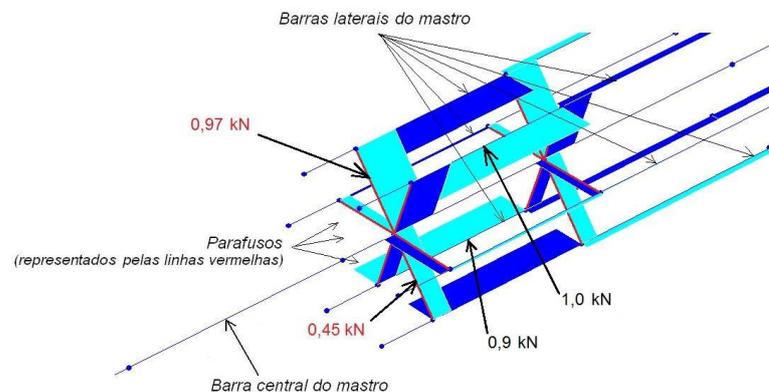


Figura 4.4.18: Tração máxima nos parafusos.

Já a força cortante de 8,6 kN, observada na Figura 4.4.19 mostra uma situação de risco de amassamento dos bambus da coroa, apontando a necessidade de se fazerem enchimentos locais com resina poliuretana expansiva, conforme investigações de Moreira e Ribeiro (2013).

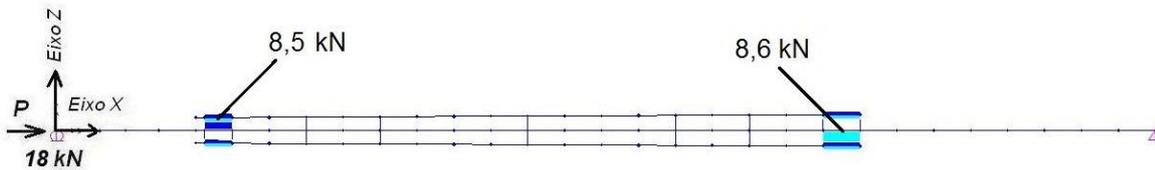


Figura 4.4.19: Forças cortantes, no eixo XZ (Vertical).

O experimento deixou claro que o aumento do comprimento das barras laterais é fundamental para o aumento da carga limite do mastro, apontando ser esta a melhor solução, embora com um consumo maior de bambus. Cuidado especial deve ser tomado na escolha da alma, de forma que a extremidade de menor diâmetro tenha a maior espessura de parede possível.

Com estas considerações, optou-se pela construção do segundo mastro de feixe, com barras laterais de coroa de 5,40 metros de comprimento.

4.4.6 – Segundo protótipo

O segundo protótipo do mastro de feixe foi composto de uma alma de 6 m de comprimento e coroas de 5,4 m de comprimento. As sete barras do mastro têm as dimensões apresentadas na Tabela 4.4.2.

A última linha da Tabela 4.4.2 fornece o diâmetro D e espessura t do centro C do elemento, considerados como as médias dos diâmetros da base e do topo. Com esses valores centrais pode-se estimar o momento de inércia de um elemento tipo do mastro, $I_C = 183 \text{ cm}^4$. Como neste modelo de mastro não há conectores de cisalhamento, o mastro deve responder com um momento de inércia próximo de sete vezes esse valor, ou seja, $I_b = 1281 \text{ cm}^4$. Qualquer diferença estaria associada ao atrito entre os elementos, o que deverá ser verificado através da análise dos resultados experimentais.

Já os módulos E (GPa) da última coluna foram obtidos de experimentos dos elementos isolados, através do diagrama de Southwell.

A configuração e design do mastro podem ser observados na imagem da Figura 4.4.20. As cintas metálicas foram espaçadas conforme Figura 4.4.1, sendo a extremidade reforçada com duas cintas.

Tabela 4.4.2: Dimensões das barras do segundo mastro de feixe.

BAMBUS		D_B (mm)	D_T (mm)	t_B (mm)	t_T (mm)	E (GPa)
Alma		107,0	75,4	10,1	6,1	13,24
Coroa	1	96,0	76,2	9,6	6,8	16,02
	2	94,5	76,5	9,9	7,0	15,24
	3	96,4	78,8	10,1	6,7	14,57
	4	92,2	75,4	9,6	7,1	14,44
	5	112,0	86,1	11,3	7,3	13,78
	6	102,1	80,9	10,0	6,9	13,00
Médias verticais		100,1	78,5	10,1	6,8	14,33
Médias horizontais		$D_C = 90,0$		$t_C = 8,5$		14,33



Figura 4.4.20: Configuração e design do mastro II.

4.4.7 – Ensaio do Segundo Protótipo

O experimento foi realizado na posição horizontal, contando com o peso próprio que foi traduzido como uma imperfeição inicial adicional ao sistema, quando da análise numérica.

Os três transdutores de deslocamentos também foram posicionados conforme esquema anterior, mostrado na Figura 4.4.8. O atuador hidráulico de operação manual e os transdutores foram conectados o sistema de aquisição de dados para leitura e registro em tempo real.

Foram aplicados dois ciclos de carga de 15 kN, feito também a descarga e posteriormente, foi aplicado a carga máxima de 32,54 kN, obtendo-se um deslocamento máximo vertical de 115,11 mm na seção central. Foi feita a descarga, e novo carregamento que atingiu o máximo de 31,61 kN. As figuras 4.4.21 e 4.4.22 apresentam respectivamente as curvas PDelta do experimento, e o diagrama de Southwell, registrando uma $F_E = 46,57$ kN, com imperfeição inicial do sistema $\delta_0 = 37,53$ mm.

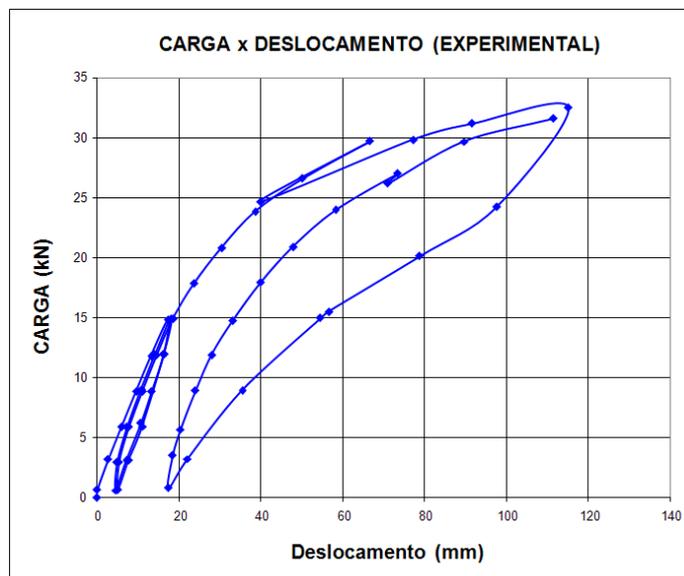


Figura 4.4.21: Curva PDelta experimental.

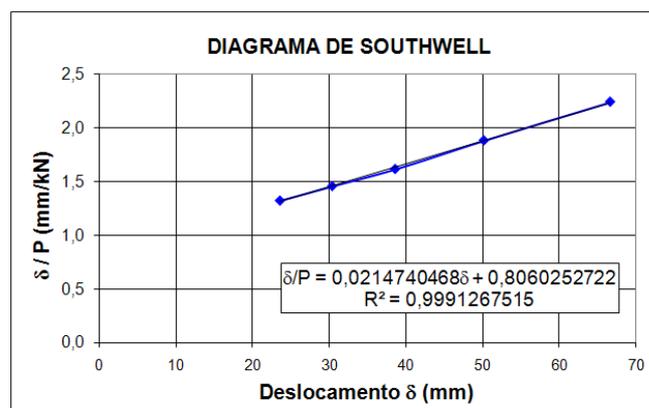


Figura 4.4.22: Diagrama de Southwell experimental.

Com o experimento, realizou-se também a calibração da modelagem numérica tanto para inércia variável de cada seção, quanto para a modelagem com inércia constante, tendo como base a média das inércias das seções das extremidades. Na Figura 4.4.23, tem-se o

modelo numérico extrudado, com inércia constante. Na Figura 4.4.24, tem-se a comparação das curvas PDelta do experimento com essas duas modelagens numéricas. A Figura 4.4.25 apresenta a comparação dos diagramas de Southwell também do experimento e das duas modelagens: com inércia variável e inércia constante. Os modelos numéricos consideravam imperfeição inicial $\delta_0 = 20$ mm, com parafusos de 3,4 mm de diâmetro.

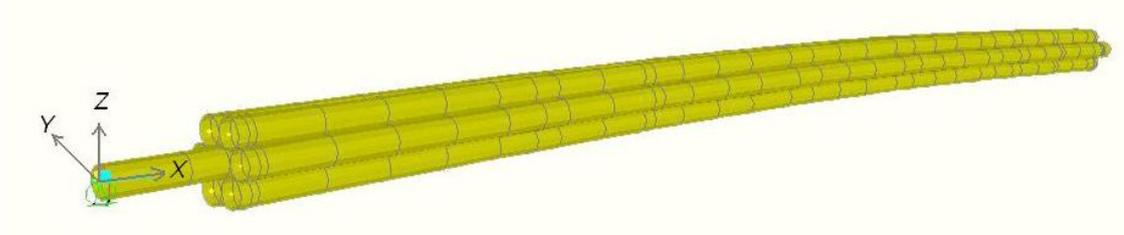


Figura 4.4.23: Modelo numérico extrudado com barras prismáticas.

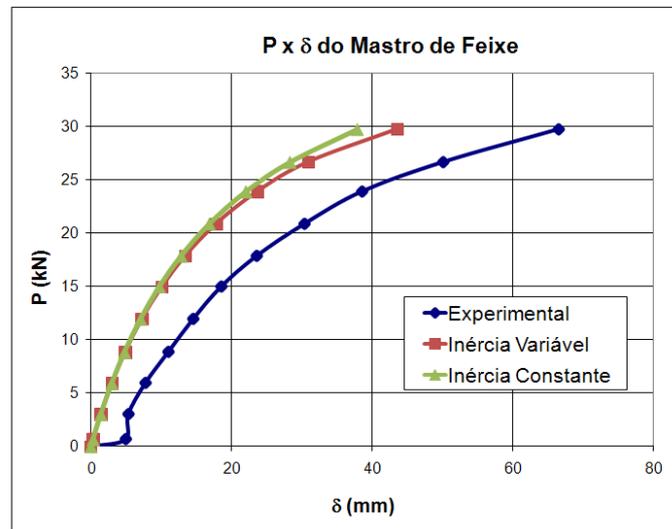


Figura 4.4.24: Comparação das Curvas PDelta experimental e numéricas.

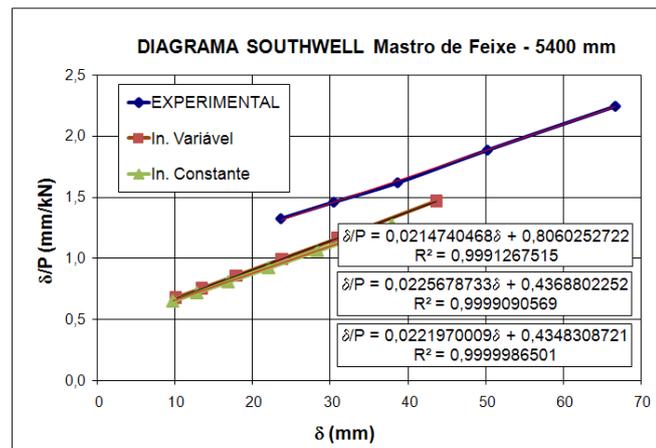


Figura 4.4.25: Comparação dos Diagramas de Southwell experimental e numéricas.

A Tabela 4.4.3 apresenta as Cargas de Euler (F_E) e as imperfeições iniciais registradas:

Tabela 4.4.3: Cargas de Euler e imperfeições iniciais do sistema:

	Carga de Euler (F_E) (kN)	Imperfeição Inicial do sistema (mm)
Experimental	46,57	37,53
Modelagem Numérica com inércia variável	44,31	19,36
Modelagem Numérica com inércia constante	45,05	19,59

A imperfeição inicial do protótipo, sendo maior que a considerada nos modelos numéricos, apenas faz declinar a curva PDelta, Figura 4.4.24, sem contudo alterar a carga de Euler. A modelagem numérica como mastro prismático forneceu uma carga de Euler igual a 97% da carga de Euler do experimento. Para melhor ajuste, basta diminuir o diâmetro dos parafusos, que representam as cintas metálicas. Considerando-se parafusos de 3,4 mm obtém-se a carga de Euler de 46,52 kN contra 46,57 kN.

Constatou-se desse modo, ser possível o perfeito ajuste do modelo numérico ao experimento. Estas modelagens numéricas foram utilizadas para se desenvolver o design mais adequado.

Contudo, conforme análise dos resultados experimentais, abordada no próximo item, constatou-se poder controlar todo o comportamento de mastros de feixe, sem conectores de cisalhamento, através das equações diferenciais, dispensando dessa forma a análise numérica.

4.4.8 – Análise dos Resultados

Para esta análise, partiu-se das observações do comportamento do mastro registrado pela Figura 4.4.21, quanto aos ciclos de carga e descarga aplicados no experimento, Figura 4.4.26. O primeiro ciclo de carga, onde se atinge 14,84 kN, acomoda o sistema em 4,51 mm. O segundo ciclo em que se atinge 14,94 kN, retorna em 4,99 mm na descarga, registrando o escorregamento entre os bambus, responsável pelo resíduo de 0,48 mm.

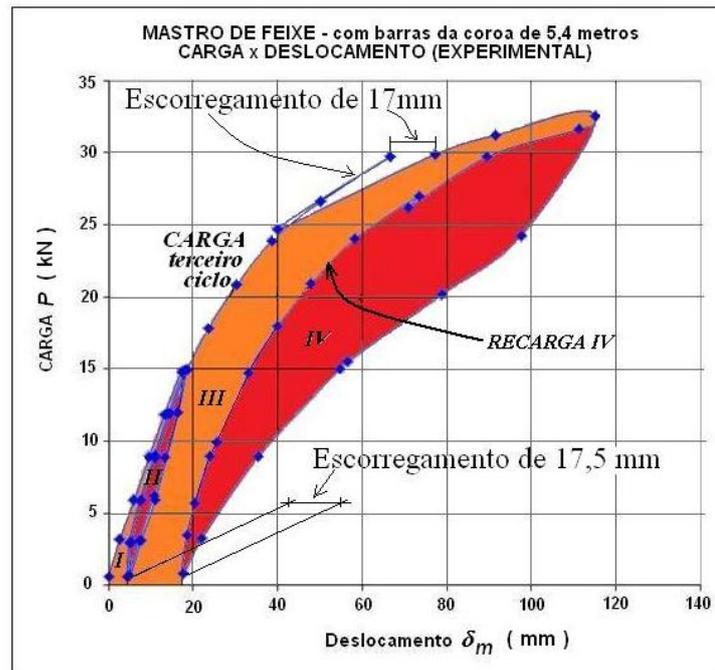


Figura 4.4.26: Curvas PDelta dos ciclos de carga e descarga do experimento.

4.4.8.1 – Análise das perdas de energia

Nos primeiros ciclos de carga e descarga podem ser observadas pequenas perdas de energia, parte devida ao escorregamento residual, área I, registrada em cor laranja, e parte devida à relaxação do material, área II, registrada em vermelho entre os dois ciclos. No terceiro ciclo o carregamento atinge uma carga de 32,54 kN, cuja descarga aponta um deslocamento residual de 17,5 mm. Novamente o quarto carregamento atinge a carga máxima de 31,61 kN (0,63 % de F_E), e a curva PDelta sobe paralelamente à curva do terceiro ciclo indicando um enrijecimento do sistema, já que a imperfeição inicial do terceiro ciclo é menor do que no carregamento 4, o que exigiria que a curva do quarto carregamento tombasse um pouco em relação ao carregamento do terceiro ciclo, se as rigidezes à flexão permanecessem exatamente iguais. Novamente, a perda de energia registrada deve-se, parte ao escorregamento, área III (registrada em cor laranja, incluindo também o a área II) e parte à relaxação do parênquima do bambu central, área IV, único bambu do feixe que estaria sujeito ao esforço cortante, desde que o atrito entre os bambus fosse desprezável, o que será verificado em seguida.

Comparando-se a perda de energia por relaxação do mastro de feixe com as relaxações dos bambus isolados, Figuras 4.1.20 a 4.1.25, percebe-se que elas têm o mesmo perfil, o que

confirma a expectativa de que somente a alma irá sofrer relaxação por cisalhamento, desde que o atrito não transfira esforços cortantes para a coroa.

4.4.8.2 – Análise das Imperfeições

Na Figura 4.4.27 tem-se o diagrama de Southwell comparativo das curvas de carga do terceiro ciclo e da recarga 4, onde se tomaram apenas os pontos que permitiram o traçado da reta do diagrama.

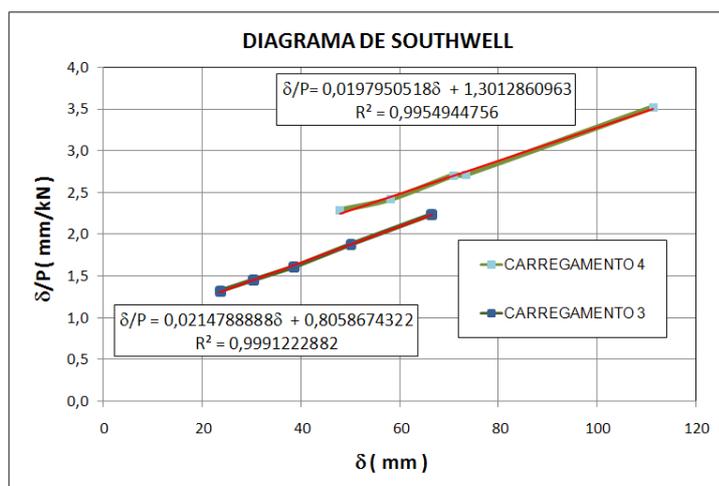


Figura 4.4.27: Comparação dos carregamentos – ciclo III e IV.

Obtém-se para o carregamento 3, pelo inverso da inclinação da reta, $F_E = 46,56$ kN, para uma imperfeição inicial de $\delta_0 = 37,52$ mm e para o carregamento 4, após a relaxação do sistema, $F_E = 50,52$ kN, com uma imperfeição $\delta_0 = 65,73$ mm. Supondo-se que a descarga do carregamento 4 retorne ao ponto de carga, tem-se que a diferença ($65,73 - 37,52 = 28,21$ mm) estaria associada à relaxação dos bambus por cisalhamento paralelo. Da comparação das cargas de Euler vê-se que a compactação do material pela relaxação do terceiro ciclo, enrijeceu temporariamente o bambu em 8,5 %.

Somente a descarga do quarto ciclo, que não foi realizada, poderia dizer se a compactação teria sido permanente, o que seria registrado pelo resíduo na descarga. Do terceiro ciclo obtém-se o produto $EI = 16983$ GPacm⁴. Do mesmo modo, tem-se para o carregamento 4, $EI = 18427$ GPacm⁴. Dividindo-se estes produtos pelo valor médio do módulo de elasticidade de todos os bambus ensaiados, $\bar{E} = 14,33$ GPa, tem-se os momentos de inércia do mastro iguais a 1185 cm⁴ e 1285 cm⁴, antes e após a relaxação, respectivamente. Observou-se no item 4.4.6 (2º parágrafo) que o momento de inércia de 7 bambus trabalhando em feixe sem atrito, calculados pela soma das inércias dos 7 bambus, resultou em 1281 cm⁴.

Considerando-se todas as simplificações adotadas e os ajustes dos resultados obtidos, demonstra-se que o mastro realmente trabalha com os 7 bambus independentes, não se podendo contar com o atrito entre eles. Assim, todos os mastros de feixe com o mesmo design poderão ser trabalhados pelas equações diferenciais de flexo-compressão, em que o momento de inércia da seção bruta I_b é dado pela soma dos momentos de inércia individuais, sem utilização do teorema dos eixos paralelos.

Constatou-se, no início dos experimentos, com a retirada das cordas de sustentação e com uma pequena carga, que o mastro deslocou-se de 18,61 mm, deslocamento permanente que foi descontado para o traçado das curvas PDelta e do diagrama de Southwell, Figuras 4.4.21 e 4.4.22, respectivamente. Em busca de uma explicação para essa acomodação inicial, modelou-se uma barra em flexão simples, com um trecho intermediário de 5,4 m e momento de inércia $I = 1281 \text{ cm}^4$, e aumento de 30 cm de cada extremidade, completando o comprimento para seis metros, com momento de inércia de 183 cm^4 , todos com módulo de elasticidade médio de 14,33 GPa, registrado na Tabela 4.1.2, e densidade aparente igual a 8 kN/m^3 , e obteve-se um deslocamento elástico de 9,2 mm. Ou seja, cerca de 50 % da acomodação imediata omitida da Figura 4.4.21, pode ser atribuída ao peso próprio do mastro que fez escorregar os bambus, tendo-se por consequência, de imediato, somente devido ao peso próprio, uma flecha por escorregamento de 9,4 mm.

Constatou-se também escorregamentos permanentes entre as barras, na descarga do terceiro ciclo, somando 17,5 mm; em que o sistema foi levado a 32,54 kN, cerca de 70 % da carga de Euler, se for considerado igual a $F_E = 45,56 \text{ kN}$. Desprezando-se, a favor da segurança, que a acomodação imediata tenha sido devida também ao peso próprio, tem-se um escorregamento total de $(18,61 + 17,5 = 36,11 \text{ mm})$. Pela curva da Figura 4.4.26, constata-se que 17 mm do escorregamento aconteceu para a carga de 29,71 kN, e ao final o mastro teria acumulado um deslocamento lateral de $(115,11 + 18,61 = 133,72 \text{ mm})$, ou seja, uma deflexão lateral máxima de $\frac{l}{45}$, sendo l o comprimento do mastro, o que já poderia estar comprometendo a estética estrutural. Desse modo, para cargas de utilização menores, a segunda parcela da acomodação seria provavelmente menor do que 17,5 mm.

Contudo, esta acomodação do sistema δ_a deverá ser computada juntamente à imperfeição inicial do eixo do sistema e à fluência. É certo que a imperfeição inicial do sistema é difícil de ser prevista, já que os bambus têm individualmente diferentes imperfeições que podem se contrapor internamente, mas o sistema fornece uma imperfeição inicial pelo diagrama de Southwell do carregamento do terceiro ciclo, igual a $\delta_0 = 37,52 \text{ mm}$,

e para o quarto carregamento obteve-se $\delta_0 = 65$ mm, para uma carga limite $P = 31,61$ kN e carga de Euler $F_E = 50,52$ kN. Como no quarto carregamento não houve nenhuma nova acomodação, pode-se escolhê-lo para as demais análises e verificações de expressões propostas. Na realidade, os escorregamentos fazem com que se perca a continuidade das equações que consideram comportamento elástico contínuo, de tal modo que a carga de Euler para o carregamento do terceiro ciclo somente pode ser obtida para cargas até 29,71 kN. Após o escorregamento há um visível tombamento da curva, Figura 4.4.21.

A imperfeição encontrada no diagrama de Southwell inclui teoricamente todas as deflexões que devem ser antecipadas na verificação do mastro: δ_0 (imperfeições geométricas do eixo); δ_a (imperfeições devidas a acomodações ou deslizamento entre as barras) e δ_f (deslocamentos visco-elásticos) ocorridos durante o carregamento, mas não as relaxações ocorridas a posteriori. Ou seja, no início da aplicação do quarto carregamento, já se somam as imperfeições $\delta_a = 18,61 + 17,5$ mm = 36,11 mm, sendo que 18,61 mm inclui também a deflexão devida ao peso próprio. Ou seja, os 28,9 mm restantes, constatados no diagrama de Southwell, referem-se grande parte às imperfeições geométricas do eixo, δ_0 e em menor parte à fluência δ_f ocorrida durante o carregamento. Por simplificação, vamos atribuí-la totalmente à geometria, pois a imperfeição δ_f é interessante de ser computada quando da descarga do sistema, ou seja, caso a carga permanecesse constante sob o valor máximo é que se teria realmente a forte influência da relaxação, que se traduziria em fluência pela diferença das imperfeições obtidas na carga e na descarga. Em resumo, pode-se distribuir assim as imperfeições registradas:

- Acomodação do sistema $\delta_a = 18,61 + 17,5 = 36,11$ mm $\Rightarrow \frac{l}{166}$
- Imperfeição do sistema apontada no carregamento do quarto ciclo $\delta_0 = 65 - 36,11 = 28,9$ mm $\Rightarrow \frac{l}{207}$
- Relaxação total registrada na descarga do terceiro ciclo, que não é computada na verificação das tensões desse experimento específico, pois teriam efeito a posteriori.

Como a relaxação e igualmente a fluência aumentam com o aumento do carregamento, pode-se propor um coeficiente de fluência ϕ , com o qual se possa avaliar uma imperfeição devida à fluência dada por $\delta_f = \phi \delta_0$. Devido à semelhança entre as curvas que detectam a relaxação tanto da alma do mastro de feixe como dos bambus isolados, será considerado para a avaliação da fluência o mesmo gráfico para as barras isoladas, Figura 4.1.52.

4.4.8.3 – Cargas limites

Uma vez constatado que o mastro de feixes trabalha com as barras independentes, sem qualquer transferência de esforço cortante para a alma, ou seja, sem conexões por atrito, todo o dimensionamento do mastro pode partir das equações diferenciais, já que se tem de imediato o produto EI_b para o mastro, onde diferentemente do mastro composto, $I_b = 7I_1$ em 90 % do comprimento e igual a I_1 nos 5% finais de cada extremidade. Por simplificação e uma vez que os momentos fletores na extremidade do mastro são pequenos e que a alma avança apenas 30 cm além da coroa, em cada extremidade do mastro, pode-se considerar barra prismática para aplicação das equações diferenciais.

Para o mastro de feixes têm-se os estados-limites últimos:

1. Tensões de compressão máximas na alma de extremidade
2. Tensões de compressão máximas na alma do centro do mastro
3. Cisalhamento máximo na alma
4. Amassamento dos bambus nas extremidades

E com o estado-limite de utilização têm-se a *deflexão máxima no centro do mastro*.

Seja a seção transversal do mastro, Figura 4.4.28:

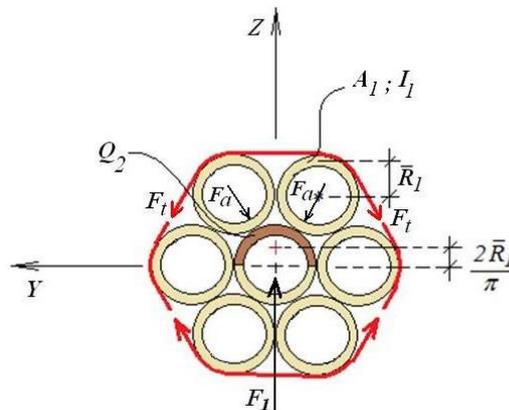


Figura 4.4.28: Seção transversal do mastro de feixe.

Onde

A_1 = área de um único elemento

Q_2 = momento estático da área hachurada da Figura, em relação ao eixo Y.

O problema se simplifica bastante se for considerada a linha elástica do mastro dada pela Equação 4.4.1

$$\delta(x) = \delta_T \text{sen} \frac{\pi x}{l} \quad (4.4.1)$$

onde

$$\delta_T = \frac{F_E}{(F_E - P)} (\delta_0 + \delta_f + \delta_a) \quad (4.4.2)$$

Supondo-se que o ponto de momento máximo na alma situe-se a uma distância x_1 do apoio, pode-se então estabelecer a primeira condição para a carga limite, ou seja, as tensões de compressão máximas na seção transversal mais solicitadas do prolongamento da alma, onde o momento de inércia é apenas I_1 .

Sendo,

$$\sigma_c = \frac{P}{A_1} + \frac{P\delta(x)D_1}{2I_1} \quad (4.4.3)$$

Então a condição limite será dada por

$$\sigma_c(x_1) \leq fc_0 \quad (4.4.4)$$

Do mesmo modo, deve-se condicionar as tensões máximas na alma, no centro do elemento, ou seja

$$\frac{P}{A_1} + \frac{P\delta\left(\frac{l}{2}\right)D_1}{14I_1} \leq fc_0 \quad (4.4.5)$$

Onde cada barra suportará uma fração de 1/7 do momento total atuante.

Os esforços cortantes, por outro lado, atuam somente na alma, e poderiam ser avaliados a partir da Equação 4.4.6, já deduzida para o mastro composto.

$$V(x) = EI_b \delta_m \frac{\pi^3}{l^3} \cos \frac{\pi x}{l} \quad (4.4.6)$$

Para $x = 0$ tem-se o cisalhamento máximo na alma. As tensões de cisalhamento máximas aconteceriam na linha neutra da alma, dadas pela Equação 4.4.7

$$\tau(0) = \frac{V(0)Q_2}{2EI_1} \quad (4.4.7)$$

onde Q_2 é o momento estático da área hachurada da Figura 4.4.28 em relação ao eixo Y, dado pela Equação 4.4.8

$$Q_2 = \frac{A_1 \bar{R}_1}{\pi} \quad (4.4.8)$$

Tem-se então a tensão de cisalhamento máxima dada por

$$\tau_{max} = E\delta \quad (4.4.9)$$

E a condição limite seria então, após algumas manipulações, dada por

$$\frac{\pi^3 E I_b Q_2 \delta_m}{2 \bar{t} l^3 I_1} \leq f_{v0} \quad (4.4.10)$$

Onde

$$\delta_m = \frac{P}{(F_E - P)} (\delta_0 + \delta_f + \delta_a) \quad (4.4.11)$$

Ou seja, δ_m são os deslocamentos laterais medidos após a aplicação da carga P .

Não menos importante, é a limitação do deslocamento lateral máximo, o estado-limite de utilização. Os bambus caracterizam-se por terem resistência mecânica elevada, mas com modo de elasticidade relativamente baixo. Fazendo-se $x = l/2$ na Equação 4.4.1, a quarta condição para o estado-limite, é dada pela Equação 4.4.12.

$$\delta_{Tuti} \leq \delta_{lim} \quad (4.4.12)$$

Onde

$$\delta_{Tuti} = \frac{F_E}{(F_E - P_{uti})} (\delta_0 + \delta_f + \delta_a) \quad (4.4.13)$$

δ_{lim} é o deslocamento lateral limite, que pode ser estabelecido de acordo com o adequado funcionamento na utilização bem como de acordo com questões estéticas. Normalmente este valor é tomado como uma fração do comprimento do elemento.

O estado-limite último por amassamento dos tubos na extremidade será avaliado no próximo item.

4.4.8.4 – Aplicação

A partir das equações deduzidas, faz-se abaixo uma estimativa das tensões máximas atuantes no mastro, para a carga máxima aplicada $P = 31,61$ kN, com a carga de Euler de 50,52 kN, carregamento 4 (Figura 4.4.26). Tem-se neste instante: $\delta_0 = 28,9$ mm, $\delta_a = 36,11$ mm; $\delta_f \cong 0$ (por hipótese). O bambu tem as dimensões médias dada na Tabela 4.4.2, ou seja, $D_c = 90$ mm, $t_c = \bar{t} = 8,5$ mm e o módulo de elasticidade médio $E = 14,33$ GPa. Destes dados se obtém $I_I = 182,7$ cm⁴; $A_I = 21,8$ cm².

Das Equações 4.4.11 e 4.4.13, obtêm-se respectivamente:

$$\delta_T = \frac{50,52}{(50,52-31,61)} (28,9 + 36,11) = 173,7\text{mm} \Rightarrow \frac{l}{35} \quad (4.4.14)$$

$$\delta_m = \frac{31,61}{(50,52-31,61)} (28,9 + 36,11) = 108,7 \text{ mm contra } 111,4 \text{ mm} \quad (4.4.15)$$

registrado no experimento, Figura 4.4.24, o que valida as hipóteses utilizadas.

Caso houvesse um peso morto sobre o mastro, deveria ser computada a fluência. Neste caso, ter-se-ia $\frac{P_{max}}{F_E} = 0,625$, e da Figura 4.1.52, obter-se-ia $\phi = 1,59$; portanto, a imperfeição devida à fluência $\delta_f = 1,59 \delta_0$, deveria ser antecipada. Ou seja, para este caso particular seria acrescentada uma imperfeição de $1,59 \times 28,9 = 46$ mm, correspondente à $\Rightarrow \frac{l}{130}$.

Os valores excessivos de imperfeições, associados aos módulos de elasticidade do bambu relativamente baixos, mostram que o controle de estados-limites de utilização é tão relevante quanto os estados-limites últimos para aplicação do mastro de feixes.

Da Equação 4.4.1 se obtém os deslocamentos máximos no segmento de 30 cm da alma nas extremidades, ou seja, a $x_1 = 30$ cm da extremidade, sendo:

$$\delta(30) = 173,7 \operatorname{sen} \frac{\pi 30}{600} = 27,8 \text{ mm} \quad (4.4.16)$$

Então as tensões de compressão máximas na extremidade da alma são dadas pela Equação 4.4.3:

$$\sigma_c = \frac{P}{A_1} + \frac{P\delta(x_1)D_1}{2I_1} = \frac{31,61}{21,8} + \frac{31,61 \times 2,78 \times 9}{2 \times 183} = 3,6 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 36 \text{ MPa} \quad (4.4.17)$$

E as tensões máximas no centro da alma pela Equação 4.4.5:

$$\frac{31,61}{21,8} + \frac{31,61 \times 17,73 \times 9}{14 \times 183} = 3,42 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 34,2 \text{ MPa} \quad (4.4.18)$$

Essas tensões, ainda que elevadas, situam-se bem abaixo das tensões limites de resistência do lote dos bambus que compõem o mastro (de 80 ± 9 MPa).

As tensões de cisalhamento no corpo da alma, nas seções extremas, são avaliadas pela Equação 4.4.8:

$$Q_2 = \frac{21,8 \times 4,075}{\pi} = 28,28 \text{ cm}^3 \quad (4.4.19)$$

E da Equação 4.4.9:

$$\tau_{max} = \frac{\pi^3 \times 1433 \times 28,28 \times 10,87 \times 7 \times 183}{2 \times 0,85 \times 600^3 \times 183} = 0,27 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 2,7 \text{ MPa} \quad (4.4.20)$$

As tensões de cisalhamento também estão abaixo do limite de resistência do lote, o que vem confirmar a grande capacidade das varas de pesca de bambu, que podem ser arqueadas tanto ou mais que as atuais varas poliméricas *high tech* dos molinetes, sem se romperem por tensões normais ou de cisalhamento.

Até o momento, as verificações demonstram que o mastro pode ser totalmente controlado pela flecha máxima do estado-limite de utilização, sem preocupações quanto ao nível das tensões máximas em nenhum ponto. Contudo, falta ainda verificar a possibilidade de amassamento dos bambus, pela compressão entre as barras superiores da coroa e a alma.

4.4.9 – Amassamento dos bambus nas extremidades

Seja a Figura 4.4.29, onde se tem a distribuição das cintas de aço ao longo do mastro de feixe, conforme ensaiado.

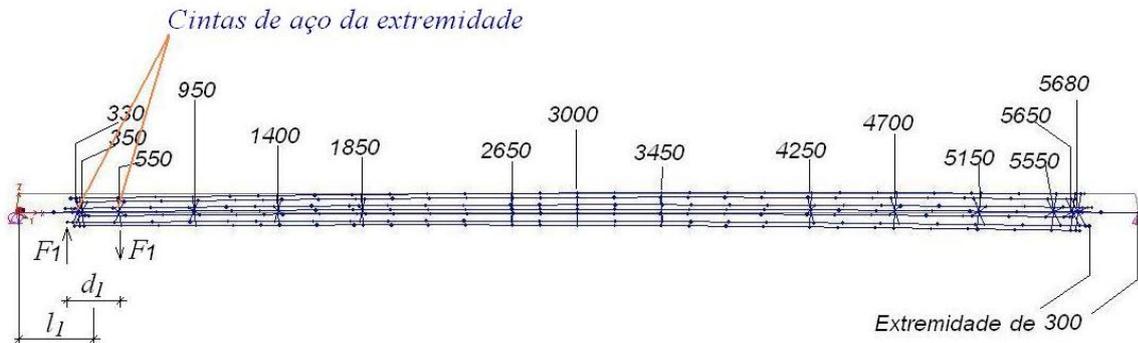


Figura 4.4.29: Localização das cintas metálicas conforme o mastro ensaiado.

Como constatado, os elementos do feixe trabalham independentemente, de forma que a inércia da composição é igual a sete vezes a inércia de uma única barra de bambu, considerando-se todas as barras como barras prismáticas de mesma inércia. E observou-se também que a linha elástica pode ser representada pela semi-onda senoidal:

$$y(x) = \delta_T \operatorname{sen} \frac{\pi x}{l} \quad (4.4.21)$$

Onde,

$$\delta_T = \frac{(\delta_0 + \delta_a + \delta_f) F_E}{F_E - P} \quad (4.4.22)$$

Ou seja, este equacionamento não está considerando a diminuição de inércia da extremidade, visto que a coroa cobre 90 % da alma. Contudo, o pequeno pescoço de comprimento $l_p = 30$ cm fica mais solicitado do que o trecho central, Figura 4.4.30:

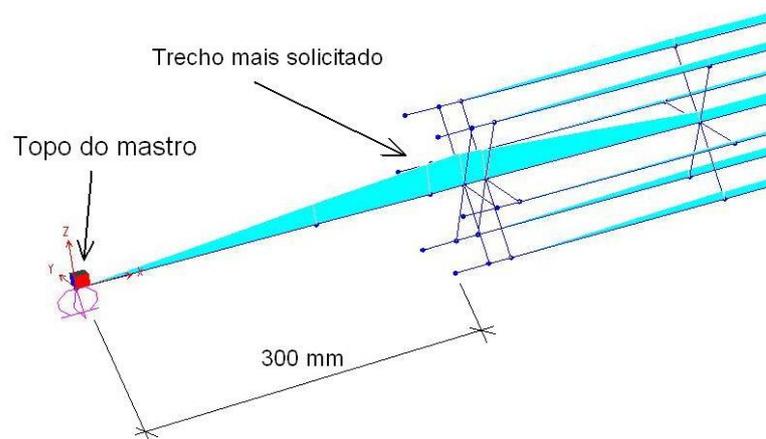


Figura: 4.4.30: Momento fletor na extremidade do mastro.

Substituindo-se l_1 , que posiciona o ponto entre as cintas metálicas extremas, na Equação 4.4.21 e P_{max} , na Equação 4.4.22 tem-se o momento:

$$M(l_1) = P_{max} y(l_1) \quad (4.4.23)$$

Por simplificação e a favor da segurança, pode-se considerar que este seja o momento de engastamento da alma entre as barras da coroa. Através dessa consideração, tem-se como estimar a força que amassou os bambus na extremidade mais esbelta, Figura 4.4.31, bem como o nível de tensões de tração nas cintas metálicas.



Figura 4.4.31: Amassamento das extremidades das barras da coroa.

A força de amassamento atuante na alma, no contato com a extremidade dos dois bambus da coroa superior seria dada por

$$F_1 = \frac{M(l_1)}{d_1} \quad (4.4.24)$$

Essa situação não é crítica para os bambus, pois segundo Moreira e Ribeiro (2013), regiões internodais dessa espécie de bambu, para o mesmo lote, suportaram forças limites médias de amassamento 6,01 kN. Contudo, anéis curtos de 5 cm de comprimento suportaram forças limites médias de 1,31 kN. Por outro lado, discos de 5 cm de comprimento, ou seja, pequenos segmentos contendo os nós, romperam-se para forças de amassamento médias de 4,82 kN. Como o amassamento da coroa, no caso deste mastro, consiste de uma carga concentrada na extremidade livre, pode-se esperar que as rupturas aconteçam para cargas mais baixas, que já levarão as tensões ao limite de resistência à tração perpendicular as fibras, rompendo o bambu.

A força F_1 comprime a alma contra a extremidade livre dos dois bambus da coroa, tentando passar a alma entre estes dois bambus, afastando-os lateralmente, Figura 4.4.31.

Ou seja, as barras da coroa estariam comprimidas entre as cintas metálicas e a alma por forças de amassamento transversal dadas por

$$F_a = \frac{F_1}{2\cos 30} \quad (4.4.25)$$

E a força de tração nas cintas metálicas mais extremas seria também igual a

$$F_t = \frac{F_1}{2\cos 30} \quad (4.4.26)$$

Calculando-se então essas solicitações para o experimento do segundo mastro de feixe, onde se tem:

$$P_{max} = 31,61 \text{ kN};$$

$$F_E = 50,52 \text{ kN};$$

$$\delta_0 + \delta_a + \delta_f = 66 \text{ mm};$$

$$l_l = 42,5 \text{ cm};$$

$$d_l = 25 \text{ cm}.$$

Logo, da Equação 4.4.21 tem-se

$$y(42,5) = \frac{6,6 \times 50,52}{(50,52 - 31,61)} \text{sen} \frac{\pi \times 42,5}{600} = 3,89 \text{ cm} \quad (4.4.27)$$

E da Equação 4.4.23 tem-se

$$M(42,5) = 31,61 \times 3,89 = 123 \text{ KNcm} \quad (4.4.28)$$

Logo, a força de amassamento que a alma estaria fazendo sobre os dois bambus superiores da coroa, de acordo com a Equação 4.4.24 vale

$$F_1 = \frac{123}{25} = 4,92 \text{ kN} < 6,01 \text{ kN} \quad (4.4.29)$$

Cada bambu da coroa estaria sendo amassado na ponta livre por uma força dada pela Equação 4.4.25, $F_a = 2,84 \text{ kN} \gg 1,31 \text{ kN}$. A coerência dos valores encontrados com os resultados de Moreira e Ribeiro (2013) e também com as rupturas observadas no experimento, Figura 4.4.31, validam a formulação proposta.

Sendo a área da seção transversal das cintas metálicas igual a $14,25 \text{ mm}^2$, elas teriam atingido tensões de cerca de 199 MPa. Ou seja, uma única fita estaria próxima de escoar, razão por se ter utilizado duas fitas lado a lado nas extremidades do mastro.

Registra-se, portanto, a recomendação de que a extremidade receba pelo menos dois anéis de fita metálica e que as extremidades livres da alma recebam enchimento de resina poliuretana expansiva, para aumento da resistência ao amassamento, como apontam Moreira e Ribeiro (2013).

Como exemplo de aplicação desse tipo de composição em feixe, nas Figuras 4.4.32 e 4.4.33, tem-se o projeto arquitetônico e construção do Instituto Kairós, da cidade de Macacos, estado de Minas Gerais, que contou com a colaboração da UFMG para o design dos componentes, distribuição dos pórticos, análise e dimensionamento estrutural. Na época da construção, em 1995, ainda não se tinham investigações como a que se realizou nesta Tese, de forma que essas aplicações basearam-se nos métodos matemáticos de análise e dimensionamento estruturais aplicados ao material bambu. Os bambus utilizados na construção foram da espécie *Phyllostachys aurea*, com cinco cm de diâmetro médio. Vários conceitos foram experimentados nesta estrutura piloto: elementos em feixe, design das ligações parafusadas, estruturas mistas com parte da coluna em eucalipto roliço, cobertura com membranas, entre outros.



Figura 4.4.32: Experimentos de monitoramento descritivo – Instituto Kairós.



Figura 4.4.33: Aplicação de estruturas em feixe no Instituto Kairós.

Observa-se assim que é inevitável que os fatos antecedam o aprofundamento das teorias, que uma vez realizadas, revertem-se sobre os objetos, condicionando o gasto mínimo de materiais à segurança das estruturas, cuja manipulação segura depende totalmente dos conceitos da engenharia de estruturas e engenharia dos materiais, ainda que seja relativamente fácil construir com o bambu.

5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 – Conclusões

A presente tese teve como objetivos o desenvolvimento de mastros híbrido, composto e de feixe, utilizando-se de barras de bambu e materiais como cabos de aço, cintas metálicas, parafusos e acessórios de fixação, buscando estabelecer estados-limites de serviço e último, e conhecer os comportamentos desses mastros frente às situações de uso.

Esses mastros, enquanto sistemas estruturais, constituem soluções inovadoras desenvolvidas, pois como se pôde observar, as análises de referências apontam para estruturas moleculares, laminados colados e bambu utilizado como material de preenchimento com cimento e argamassa, o que diferencia deste trabalho que utiliza as barras de bambu natural.

Durante a pesquisa, foram desenvolvidos elementos e sistemas de conexão entre barras de bambu, e deste com outros materiais como citado (cabos de aço, cintas metálicas, parafusos), de modo a sistematizar e otimizar o uso desses elementos na composição dos mastros.

Na fase inicial do trabalho, foram realizadas pesquisas bibliográficas de cunhos teóricos e práticas quanto ao uso de mastros em estruturas arquitetônicas e seu funcionamento, desde as estruturas mais remotas (como as tendas) às mais recentes (estruturas arquitetônicas leves), que utilizam sistemas de coberturas com membranas e tecnologia apropriadas, mostrando que o uso de mastros tem sido uma aplicação corrente nas demandas das atividades humanas, seja em pequena ou grande escala. Observou-se assim que o campo de atuação e aplicação deste tipo de estrutura dependerá da capacidade criativa e projetual tanto do designer ou arquiteto quanto do engenheiro de estruturas, em se tratando de um projeto que abrange essas áreas distintas, além é claro, do processo metodológico e análise estrutural para cada situação, em relação aos materiais e sistemas a serem utilizados. Pesquisou-se também sobre a flambagem de colunas, objetivando conhecer parâmetros de

análises e determinação de resistência das mesmas, a fim de se aplicar o conhecimento no estudo dos mastros aqui propostos.

A construção e o ensaio experimental do primeiro mastro (híbrido) possibilitaram o conhecimento e o desenvolvimento de técnicas que permitiram o aperfeiçoamento do processo de construção bem como a otimização do sistema estrutural proposto.

A construção e o ensaio experimental do segundo mastro (híbrido) trouxeram considerações importantes para a próxima fase: o desenvolvimento de mastros compostos e de feixes, com orientações a possíveis aplicações de estruturas tensionadas em diversos sistemas construtivos. Ficou evidente o ganho de funcionamento obtido no segundo mastro em relação ao primeiro: o valor maior de pré-tensão dos cabos, o aumento do braço das cruzetas, juntamente com a melhor distribuição ao longo da barra do bambu principal em função da esbelteza dos trechos. A pré-tensão dada aos cabos de aço mostrou-se fundamental para o aumento da força limite, diminuindo também a força máxima de tração nos cabos.

Com estes ensaios de mastro híbrido, observou-se também a necessidade de fixação dos cabos de aço junto às seções extremas das cruzetas, o que levou ao desenvolvimento de sistemas de conexão entre eles, denominado *clip* dos cabos de aço. Com a execução desse acessório, outros ensaios foram realizados, comprovando a eficiência do sistema, otimizando o sistema de cabos de aço no contexto do mastro híbrido, auxiliando na rigidez do sistema e aumentando a força limite possível de utilização. Outro fator importante na análise dos dois mastros construídos e ensaiados inicialmente foi a utilização do Diagrama de Southwell para análise da força axial de flambagem global (conhecida como Carga de Euler), sendo a força limite do sistema, e que possibilita também conhecer a imperfeição inicial do sistema, permitindo maior segurança a aplicação de carga nos ensaios dos mastros seguintes, visto que os primeiros tiveram um comportamento previsível conforme análise do diagrama e suas informações. Em ambos os casos do mastro híbrido, a modelagem numérica realizada pôde acompanhar com precisão o comportamento ocorrido no experimento, o que valida o uso desta ferramenta para projetos posteriores de novas estruturas. Com esses resultados, confirmou-se a eficiência deste tipo de mastros confeccionados a partir do projeto e do dimensionamento correto dos elementos estruturais.

Quanto ao programa experimental, pode-se concluir que se os procedimentos adotados tiveram êxito, por se tratar de um trabalho que envolveu diversas etapas, logística e controles de atividades, de modo que ao final dos experimentos, foi possível conhecer os resultados e utilizar os dados com boa precisão.

Prosseguindo com a pesquisa e o desenvolvimento, realizou-se o projeto e experimento do mastro composto, este construído com barras laterais de bambu e barras interpostas com espaçadores internos, também de barras de bambu sendo fixadas com barras roscadas de aço. Deste experimento, pôde-se constatar o grande desempenho frente aos mastros iniciais, visto a capacidade de carga que se aproximou de 45 kN com mesmo comprimento útil de seis metros e deflexão lateral de apenas 70 mm. No entanto, pode-se observar que a força limite do mastro ficou restrita pelo esmagamento dos furos na barra do bambu da extremidade de menor diâmetro e espessura de parede, detectado visualmente durante o ensaio, e também pelas tensões de contato. No caso, os parafusos utilizados podem ser substituídos por pinos lisos com roscas apenas nas extremidades, evitando concentração de tensões nas paredes dos bambus, e possível rachadura da barra. Neste sentido, continua sendo uma questão preocupante o fato do bambu poder rachar-se sob tensões residuais seja de secagem ou de uso estrutural com parafusos, visto que os bambus naturais têm um sério problema que é a possibilidade de racharem-se por secagem diferencial ou por serem utilizados onde a umidade de equilíbrio é muito baixa. A água, capturada pelas oxidrilas da celulose que compõem as paredes das células, conhecida como água de constituição, é fundamental para que se mantenha a integridade estrutural das barras.

No caso de tensões ou secagem causarem a rachadura, ter-se-ia um problema de flambagem de seções abertas, ou seja, flexo-torção, problema que pode ser tratado pelas equações de Vlasov. Sem a quantificação do grau de dano das fissuras para o empenamento da seção, e da restrição ao empenamento oferecida pelos diafragmas, não se tem como garantir a capacidade de carga de uma barra sujeita à compressão ou flexão, já que pode ser surpreendida pelas fissurações durante o seu uso.

Em fase subsequente, como estudos paramétricos ao tipo de mastro composto, foram criados sete tipos de barras de bambu com diferentes diâmetros e espessuras médias de parede, considerando comprimentos da ordem de 2 m, 3 m, 4,5 m e 6 m. E como são previsíveis em normas de aço (ABNT NBR 8800-2008), por razões de folga dos parafusos, os cálculos devem sofrer um fator de redução de 15%. Para os casos de uso de bambu estrutural, esse percentil avança para 25%, o que é perfeitamente admissível considerando os fatores observados e que para efeito de estudos estruturais, podem ser aplicados sobre o módulo de elasticidade E ou sobre o momento de inércia I , pois os termos da matriz de rigidez consideram o produto EI . Para estas modelagens tipo, optou-se por simplificação das barras com diâmetros e espessuras constantes, nas quais foram considerados os valores médios das dimensões entre as seções de extremidade do bambu. Duas tabelas de produto EI mostram

possibilidades de aplicação deste tipo de mastro com dimensões desde dois metros a seis metros apresentados de 25 em 25 cm, obtido numericamente, seja o mastro composto por alma contínua ou alma descontínua. Durante o experimento, observou-se também que a curva $P\Delta$ de descarga não apresentou uma forma coerente, sendo assim registradas deformações plásticas ocorridas por concentração de tensões nos furos dos parafusos, relaxando o sistema. Assim, analisou-se a fluência do mastro quanto a estes resultados e considerações para aplicações deste tipo de barra estrutural. Para este tipo de mastro, observou-se também a quantidade de elementos interpostos (divisões) possíveis de acordo com a esbeltez máxima do comprimento livre. Analisou-se também a flexão dos parafusos, que pelos cálculos apresentados, não se registrou escoamento do parafuso. Para este experimento, constatou-se também que o modelo numérico se ajustou perfeitamente ao experimento, validando os resultados para generalização dos resultados.

A seguir, desenvolveu-se o projeto e execução dos mastros de feixe, com dimensões distintas das barras laterais de coroamento com comprimentos de 3600 mm e 5400 mm, e alma contínua de seis metros. Este mastro se mostrou como um processo de fabricação com relativa facilidade, embora seja um mastro que consuma mais barras de bambu. Posto em ensaio de compressão axial assim como os outros mastros, observou-se que o mesmo teve seu funcionamento bastante previsível. Outra grande vantagem desta solução é o fato de que este tipo de mastro não necessita de perfurações das paredes dos bambus para a passagem de parafusos, evitando a concentração de tensões que ocorre nos furos, como se observou no mastro composto. Para este tipo de mastro, observou-se a necessidade especial que se deve ter na escolha da barra de bambu que ficará como alma do mastro, permitindo que a extremidade de menor diâmetro tenha a maior espessura possível. Outro aspecto possível é o enchimento local com resina poliuretana expansiva, que aumentará a resistência ao esmagamento provocado pelas cintas metálicas não interferindo no peso final do mastro, como apontam Moreira e Ribeiro (2013).

Conclui-se também que a opção pelo tipo de mastro, seja ele composto, híbrido ou de feixe dependerá das cargas de utilização e relação custo benefício, além do ponto de vista estético-arquitetônico que não deixa de ser um aspecto subjetivo, mas que faz parte das escolhas e opções arquitetônicas.

Complementando o conhecimento sobre o bambu como elemento estrutural, foram realizados ensaios de compressão axial nas barras isoladas com cinco e com seis metros de comprimento, que serviram para construção do mastro composto e do mastro de feixe. Estes

ensaios permitiram determinar o módulo de elasticidade médio do lote de bambus disponíveis para os experimentos.

Como conclusão final desta tese, observou-se que o uso em potencial dos bambus *Phyllostachys pubescens* viabiliza nova possibilidade de aplicação dos bambus na estruturas propostas nesta tese, tornando as conquistas mais recentes da engenharia, que se expressam nas estruturas tensionadas acessíveis às populações em geral e às populações rurais em particular. Em termos práticos, observou-se que o bambu é um elemento estrutural contemporâneo por atender aos requisitos da produção sustentável, além de ser muito eficiente dentro de seu domínio de capacidade de carga, numa análise comparativa de custo-benefício. Percebeu-se também que o desempenho dos bambus isolados e de mastros sob flexo-compressão tem surpreendido positivamente pesquisadores experientes em estruturas. A flexibilidade deste material, pela sua distribuição anatômica dos tecidos resistentes, conjugadas a razões do diâmetro por espessura de parede D/t específicas, permitem deflexões elevadas sem ocorrência de instabilidade localizada, se o bambu contém umidade interna de equilíbrio da ordem de 10 % e não contém rachaduras.

Essas constatações favoráveis são estímulos para a utilização dos bambus como mastros de estruturas, ainda que de pequeno porte, conseguindo-se uma estética coerente com a proposta de leveza, facilidade construtiva, manutenção e reposição de elementos, utilização de recursos renováveis e sustentabilidade dos biomas.

Soluções ecologicamente corretas como estas se apresentam como uma conquista social relativa às alternativas construtivas, pois sendo de fácil fabricação, leves e sistêmicas, favorecem a biodiversidade, a conscientização de seus benefícios socioambientais e condições de adaptabilidade à população em geral.

Neste âmbito, todo projeto que venha a ser realizado com base no sistema estrutural aqui apresentado deve também favorecer o uso adequado do espaço construído, reduzindo aqueles usos inadequados que permitem acidentes e problemas sociais.

Assim sendo, o aproveitamento do bambu enquanto material de construção surge como nova possibilidade junto às construções metálicas, construções de madeira ou de concreto, que são os grandes detentores do mercado.

Conclui-se assim que a presente tese, inserida no Grupamento B do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, fez uma interação entre as áreas de Design e Engenharia, observando que o design é hoje uma ferramenta indispensável de desenvolvimento e inovação tecnológica, aumentando o valor agregado do produto

desenvolvido, melhorando seu processo produtivo e identificando novas aplicações estruturais voltadas ao meio ambiente.

5.2 – Sugestões para trabalhos futuros

Considerando a quantidade e diversidade das análises e ensaios realizados, existem ainda diversas questões que merecem ser pesquisadas e analisadas em estudos futuros, como se pode listar:

- a) Avaliar corpos de prova de bambu para se obter módulo de elasticidade e grau de umidade com maior precisão.
- b) Avaliar diferentes pré-tensões em cabo de aço em mastros híbridos.
- c) Avaliar comportamento do mastro composto, durante a descarga no ensaio de compressão axial.
- d) Investigações adicionais para se aumentar o atrito entre as barras de bambu no mastro de feixe.
- e) Investigar enchimentos poliméricos e cimentícios adicionais nos mastros composto e de feixe, de modo a aumentar capacidade de resistência ao esmagamento das fibras.
- f) Estudos sobre fluência e quantificação de viscosidade elástica do bambu.
- g) Por meio de ensaios e análises numéricas, propor uma curva de dimensionamento de barras de bambu submetidas a força axial de compressão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AMADA, Shigeyasu; UNTAO, Sun. **Fracture properties of bamboo**. Composites: Part B 32, p.451-459, ELSEVIER, 2001.
- [2] ARCE-VILLALOBOS, Oscar Antonio. **Fundamentals of the design of bamboo structures**. Eindhoven: Faculteit Bouwkunde, Technische Universiteit Eindhoven, Holanda, 1986.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190 Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro: ABNT, Agosto 1997. 107p.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800 Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios**. Rio de Janeiro: ABNT, Setembro 2008. 237p.
- [5] BACHELARD, Gaston. **A Terra e os devaneios da vontade**. São Paulo: Martins Fontes, 2001.
- [6] **BAMBOOS Current Research**. Proceedings of the International Bamboo Workshop. ANAIS. Cochim, Índia, 14-18 Novembro 1988.
- [7] BAPTISTA, Maria Elisa. **Fronteiras Urbanas Contemporâneas: espaço público e cidadania**. Dissertação. Belo Horizonte: EA-UFMG, 2000.
- [8] BAXTER, Mike. **Projeto de produto: guia prático para o desenvolvimento de novos produtos**. São Paulo: Edgard Blücher, 1998.
- [9] BECHTHOLD, Martin. **Innovative Surface Structures – Technologies and Applications**. 2008.
- [10] BERALDO, Antonio Ludovico, AZZINI, Anísio, GHAVAMI, Khosrow, PEREIRA, Marco Antonio dos Reis. **Bambu: características e aplicações**. (in: FREIRE, Wesley Jorge; BERALDO, Antonio Ludovico (org.). *Tecnologias e materiais alternativos de construção*). Capítulo 9. Campinas, UNICAMP, 2003.
- [11] BERNDSEN, Rodrigo Strzelecki, et al. **Propriedades físicas do bambu-mossô (*Phyllostachys pubescens* Mazel ex H. de Lehaie) em diferentes idades e posições do colmo**. FLORESTA, Curitiba, PR, v. 40, n. 1, p. 183-192, jan./mar. 2010. Disponível em: <http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/floresta/article/view/17109/11270> Acesso em 26/06/2011.
- [12] BFI, Buckminster Fuller Institute. **About Bucky**. 2010. Disponível em <http://www.bfi.org/about-bucky>, acesso em 19/01/2012.
- [13] BOURRIAND, Nicolas. **Estética relacional**. São Paulo: Martins, 2009.
- [14] BRANDÃO, Zeca. **Millennium Dome: um projeto nacional de poucos**. Revista Vitruvius. Ano 1, Março 2001. Disponível em: <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/01.010/912> Acesso em: 16/12/2011.
- [15] BRASIL. Lei 12.484, de 08 de Setembro de 2011. “Política Nacional de Incentivo ao Manejo Sustentado e ao Cultivo do Bambu”. **Diário Oficial (da) República Federativa do Brasil**. Poder Executivo, Brasília, DF, disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2011/lei/12484.htm Acesso em 03/12/2011.
- [16] BRESCANSIN, Janaína. **Comportamento à fratura de compósitos de matriz cimentícia reforçada com polpa de bambu**. Dissertação de Mestrado. PUC-Rio, 2003. Disponível em: http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/3720/3720_1.PDF
- [17] CASTRO, Adriana Petito de Almeida Silva; LABAKI, Lucila Chebel; CARAM, Rosana M.; BASSO, Admir; FERNANDES, Mauro Roberto. **Medidas de refletância de cores de tintas através de análise**

- espectral**. Revista da ANTAC, Ambiente Construído. Porto Alegre, v.3, n.2, p.69-76, Abril/Junho 2003. Disponível em: <http://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/3452/1871> Acesso em 15/12/2011.
- [18] CHAJES, Alexander. **Principles of structural stability theory**. New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1974.
- [19] CIMAF. **Manual Técnico Cabos de Aço**. Osasco SP: CIMAF, 2009.
- [20] CONEJERO, Marco Antônio; NEVES, Marcos Fava. **Gestão de créditos de carbono: um estudo multicasos**. R.Adm. São Paulo, v.42, n.2, p.113-127, Abr/mai/jun.2007. Disponível em: http://www.revistasusp.sibi.usp.br/scielo.php?pid=S0080-21072007000200001&script=sci_arttext Acesso em 05/10/2011.
- [21] CORBIOLI, Nanci. **Tendas para ficar**. Revista Projetodesign, n.267, Maio 2002. Disponível em: <http://www.arcoweb.com.br/tecnologia/tensoestruturas-tendas-para-07-05-2002.html> acesso em 08/10/2011.
- [22] COSTA, Flávia Nacif. **O Design como reativador da experiência**. Dissertação. Belo Horizonte: EA-UFMG, 2002.
- [23] Croll e Walker. **Elementos de Estabilidad Estructural**. Barcelona: Reverte, 1975.
- [24] CRUZ, Martha Lissette Sánchez. **Caracterização física e mecânica de colmos inteiros do bambu da espécie Phyllostachys aurea: Comportamento à flambagem**. Dissertação. Rio de Janeiro: PUC-RIO, 2002. Disponível em: http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/3846/3846_5.PDF.
- [25] DEIFELD, Telmo Egmar Camilo; PAULETTI, Ruy Marcelo de Oliveira. **Sobre o projeto e a construção de estruturas tensegrity**. XXXI Jornada Sud-Americanas de Ingeniería Estructural. Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina, 2004.
- [26] DE MORAES, D. **Limites do Design**. 2ed. São Paulo: Studio Nobel, 1999.
- [27] DREW, Philip. **New tent architecture**. New York: Thames & Hudson, 2008.
- [28] DUNKELBERG, Klaus. **Bamboos as a Building Material**. University of Stuttgart, 1985.
- [29] ESPELHO, Jean C.C.; BERALDO, Antônio L. **Avaliação físico-mecânica de colmos de bambu tratados**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. V.12, n.6, p.645-652, 2008. Disponível em: http://bambusc.org.br/wp-content/uploads/2009/05/avaliacao_colmos_de_bambu_beraldo.pdf
- [30] FARBIARZ F. Josef, MOGOLLÓN S. Jaime, PRIETO R, Samuel Dario. **Manual de construcción sismo resistente de viviendas em Bahareque encementado**. Asociacion Colombiana de Ingeniería Sísmica. 2001.
- [31] FERREIRA, Luciano Maldonado. **Passarela pênsil protendida formada por elementos pré-moldados de concreto**. Dissertação de Mestrado. São Carlos: Escola de Engenharia - USP, 2001.
- [32] FIEDLER, Nelson. **Tendas coloridas e alta tecnologia**. Revista Finestra, n. 47, Outubro 2006, Disponível em: <http://www.arcoweb.com.br/arquitetura/nelson-fiedler-mtv-video-05-12-2006.html> Acesso em 02/09/2011.
- [33] FREIRE, Wesley Jorge; BERALDO, Antonio Ludovico. **Tecnologias e materiais alternativos de construção**. Campinas, UNICAMP, 2003.
- [34] GELINSKI, Gilmar. **Feira de Ananindeua, Pará**. 2007. Revista Finestra, nº 49, Junho 2007. Disponível em: <http://www.arcoweb.com.br/tecnologia/tecno-staff-engenharia-e-estruturas-feira-de-06-07-2007.html> Acesso em 16/10/2011.
- [35] GHAVAMI, Khosrow, MARINHO, Albanise B. **Propriedades geométricas e mecânicas de colmos dos bambus para aplicação em construções**. Engenharia Agrícola. Jaboticabal, v.23, n.3, p.415-424, 2003.

Disponível em: <http://xa.yimg.com/kq/groups/1853519/1965653330/name/Ghavami-Resist.bambu.pdf>
Acesso em 12/02/2011.

- [36] GHAVAMI, Khosrow, ALLAMEH, S.M., SÁNCHEZ, M.L., SOBOYEJO, W.O. **Multiscale study of Bamboo Phyllostachys Edulis**. 2003, Disponível em:
<http://www.nku.edu/~allamehs1/Ghavami%20Multiscale%20Bamboo%20%20Phyll%20Edulis.pdf> e
http://www.abmtenc.civ.puc-rio.br/pdfs/artigo/Ghavami_K.pdf
- [37] GUT, F. O Mercado e o sequestro do carbono. **Revista Silvicultura**. São Paulo, 1998. V.R. Comunicações, p.42-45.
- [38] GUTIÉRREZ, Jorge A. **Structural adequacy of traditional Bamboo housing in Latin America**. National Laboratory for materials and structural models, Civil Engineering Department, Universidade de Costa Rica, 2000.
- [39] HIBBELER, R.C. **Resistência dos materiais**. 5ed. São Paulo: Prentice Hall, 2004.
- [40] INBAR International Network for Bamboo and Ratan. **Normas Técnicas para la utilización de la Guadua angustifolia kunth en la construcción**. Oficina Latinoamerica y El Caribe. Quito, 2011.
- [41] JACOBS, Jane. **Morte e vida de grandes cidades**. São Paulo: Martins Fontes, 2007.
- [42] JANSSEN, Jules J. A. **Bamboo Research at Eindhoven University of Techonology**. Holanda, 1983.
- [43] JANSSEN, Jules J. A. **Mechanical Properties of Bamboo**. Eindhoven (Holanda): Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [44] JOTA, Fabiano de Oliveira; PORTO, Cláudia Estrela. **Evolução das estruturas tensionadas**. (2006) Disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAEqWAAH/evolucao-das-estruturas-tensionadas>
Acesso em 21/08/2011.
- [45] JUDZIEWICZ, Emmet J. **American bamboos**. Washington DC: Smithsonian Institution Press, 1999.
- [46] KOHLSDORF, Maria Elaine. **A apreensão da forma da cidade**. Brasília: UnB, 1996.
- [47] LIESE, Water. **The anatomy of Bamboo Culms**. International Network for Bamboo and Rattan. China, 1998.
- [48] LIMA, C. R.; BAJAY, S. V. **A reposição florestal obrigatória e o planejamento energético regional**. (2008). Disponível em: <http://www.agrisustentavel.com/doc/repobriga.htm> Acesso em 20/08/2010.
- [49] LIMA, Luciano. **Flambagem de colunas**. (Resistência dos Materiais). Rio de Janeiro, UERJ, FEN, ESTR, s.d., disponível em http://www.labciv.eng.uerj.br/rm4/cap1_1.pdf Acesso em: 13/09/2010.
- [50] LÖBACH, Bernd. **Design Industrial: bases para configuração dos produtos industriais**. São Paulo: Edgard Blucher, 2001.
- [51] LOPEZ, Oscar Hidalgo. **Bamboo: the gift of the Gods**. Colômbia, Bogotá: D´Vinni. 2003.
- [52] LUGT, P. Van der; DOBBELSTEEN, A.A.J.F.van den; JANSSEN, J.J.A. **An environmental economic and pratical assessment of bamboo as a building material for supporting structures**. *Construction and Building Materials* 20 ELSEVIER, (2006) p.648-656.
- [53] MANZINI, Ezio. **A Matéria da Invenção**. Lisboa: Centro Português de Design, 1993.
- [54] MANZINI, Ezio; VEZZOLI, Carlo. **Desenvolvimento de produtos sustentáveis: os requisitos ambientais dos produtos industriais**. São Paulo: EDUSP, 2002.

- [55] MARANDOLA JUNIOR, Eduardo; HOGAN, Daniel Joseph. **Vulnerabilidade e riscos: entre a Geografia e a Demografia**. In: XIV Encontro Nacional de Estudos Populacionais. Caxambu (MG). Anais. ABEP, 2004 (Disponível em CD-ROM)
- [56] MARANDOLA JUNIOR, Eduardo; HOGAN, Daniel Joseph. Vulnerabilidade do lugar vs. vulnerabilidade sociodemográfica: implicações metodológicas de uma velha questão. **Revista Brasileira de Estudos Populacionais**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 2, p.161-181, jul. 2009.
- [57] MARCONI, Marina de A.; LAKATOS, Eva Maria. **Técnicas de Pesquisa**. 2ed. São Paulo: Atlas, 1990.
- [58] McCLURE, Floyd Alonzo. **Genera of Bamboos native to the new world**. Washington DC: Smithsonian Institution Press, 1973.
- [59] MELENDEZ, Adilson. **Arquitetura na favela**. Revista Projetodesign, n. 201, Março 2005. Disponível em: <http://arcoweb.com.br/projetodesign/arquitetura/aaa-azevedo-arquitetos-associados-mercado-popular-13-04-2005.html> acesso em 08/10/2011.
- [60] MERLEAU-PONTY, M. **O visível e o invisível**. São Paulo: Perspectiva. 1984.
- [61] MOREIRA, Luis Eustáquio. **Desenvolvimento de estruturas treliçadas espaciais de bambu**. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: PUC-RJ, Departamento de Engenharia Civil, 1991.
- [62] MOREIRA, Luis Eustáquio e GHAVAMI, Khosrow. **Dimensionamento de estruturas de bambu**. XXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA: “Materiais não convencionais para construções rurais”. ANAIS. Campina Grande PB, 1997.
- [63] MOREIRA, Luis Eustáquio. **Aspectos singulares das treliças de bambu: flambagem e conexões**. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: PUC-RJ, Departamento de Engenharia Civil, 1998.
- [64] MOREIRA, Luis Eustáquio; GHAVAMI, Khosrow. **The influence of initial imperfections on the buckling of bamboo columns**. Proceedings of the International Workshop on the role of Bamboo in Disaster avoidance. Guayaquil. Equador, 2001.
- [65] MOREIRA, L.E.; MELO, B. S.; RIPPER, J. L. M. **Mastros compostos de bambu reforçados com cabos de aço**. IX EBRAMEM IX ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2004, CUIABÁ. Universidade Federal do Mato Grosso, 2004. v. 1. p. 1-1.
- [66] MOREIRA, Luis Eustáquio; GHAVAMI, Khosrow. **Treliças espaciais de dupla camada de bambu – um estudo de caso**. NOCMAT - Non Conventional Materials and Technologies, Rio de Janeiro, 2005.
- [67] MOREIRA, L.E.; RIPPER, J. L. M, MELO, B. S.; GHAVAMI, K. **Design and Mechanical Test of Bamboo Masts**. NOCMAT - XI Non Conventional Materials and Technologies, Bath, Reino Unido, 2009.
- [68] MOREIRA, Luis Eustáquio; SILVA, Fernando José; RODRIGUES, Francisco C. **Bamboo Mast for Lightweight Architecture**. XIV Non Conventional Materials and Sustainable Technologies – NOCMAT – João Pessoa, PB, 2013.
- [69] MOREIRA, Luis Eustáquio; RIBEIRO, Bruno Elord. **Bamboo tubes – resistance to transversal kneading**. XIV Non Conventional Materials and Sustainable Technologies – NOCMAT – João Pessoa, PB, 2013.
- [70] MOREIRA, Luis Eustáquio; SILVA, Fernando José; RODRIGUES, Francisco C. **Bamboo Mast for Lightweight Architecture**. Revista Key Engineering Materials, v.600, Chapter 1, p.3-9, 2014.
- [71] MOREIRA, L.E; SANTOS, T.S; SILVA; M.F. **Design de Membranas e Cascas com Tecido de Algodão**. Anais do 1º Congresso Luso Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis – CLB - MCS; Guimarães, Portugal, 2014.

- [72] MOREIRA, Luís Eustáquio; RIPPER, José Luiz Mendes. **Jogo das Formas: lógica do objeto natural**. Rio de Janeiro: NAU, 2014.
- [73] MORRILLAS, Leandro José. NASCIMENTO, Paulo Trombini de Souza. **A construção de um modelo de desenvolvimento de produto com a variável ambiental**. XIV SIMPEP (Simpósio de Engenharia de Produção). Bauru, UNESP, 2007. Artigo digital Simpep_Art_1045.pdf.
- [74] NAVARRO, Eduardo Humberto Achá. **Bamboo: High Tech Material for Concrete Reinforcement**. Tese em Ciência da Engenharia Civil: estruturas. Orientação Prof. Dr. Khosrow Ghavami. Rio de Janeiro: PUC-Rio, 2011. Disponível também em: http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/biblioteca/php/mostrateses.php?open=1&arqtese=0621272_2011_Indice.html
- [75] NAVEIRO, Ricardo Manfredi e OLIVEIRA, Vamderlí (Organizadores). **O Projeto de Engenharia, Arquitetura e Desenho Industrial: conceitos, reflexões, Aplicações e Formação Profissional**. Juiz de Fora MG: Ed. UFJF, 2001.
- [76] **Normas Técnicas para la utilización de la Guadua Angustifolia Kunth em la construcción**, Equador, 2011.
- [77] NSR-10 Capítulo G.1 **Estructuras de Madera y Estructuras de Guadua**, Colômbia, 2010.
- [78] ORTEGA Y GASSET, José. **Meditação sobre a técnica**. Rio de Janeiro: Instituto Liberal, 1991.
- [79] OTTO, Frei. **Complete Works Lightweight Construction Natural Design**. Berlin: Birkhauser, 2005.
- [80] OTTO, Frei. **Basic Concepts and Survey of Tensile Structures**. Vol.2. Massachusetts: MIT, 1969.
- [81] PAULETTI, Ruy Marcelo de Oliveira. **A sofisticação das estruturas de membranas**. In: O Portal da Arquitetura, Engenharia e Construção. (2010). Disponível em: <http://www.aecweb.com.br/aec-news/materia/4807/a-sofisticacao-das-estruturas-de-membranas.html>. Acesso, 06/06/2012.
- [82] PAULETTI, Ruy Marcelo de Oliveira. **História, Análise e Projeto das Estruturas Retesadas**. Tese para concurso de Livre-Docência. São Paulo: USP, 2003. Disponível em: http://www.lmc.ep.usp.br/people/pauletti/Publicacoes_arquivos/RMOP-Cap-2.pdf Acesso em 13/02/2012.
- [83] PELZ Arquitetura Têxtil. **Mercado Municipal Ver o Peso, Belém do Pará**. Disponível em <http://www.arquiteturatextil.com.br/?act=5&projetoID=30> Acesso em 20/08/2011.
- [84] PEREIRA, Marco A. R., BERALDO, Antônio L. **Bambu de corpo e alma**. Bauru SP: Canal6, 2008.
- [85] PICARELLI, Marlene. **Alternativas tecnológicas: sistemas construtivos**. São Paulo: FAUUSP, 1985.
- [86] PINTO, Maria Clarisse Silva de Paula. **Revitalização da paisagem da Vila Côco/Moeda MG**, Dissertação. Belo Horizonte: UFMG-EA, 2007.
- [87] **Proyecto Normativo Diseño y construcción con Bambú**, Peru, 2011.
- [88] RHODE-BARBARIGOS, Landolf, BEL HADJ ALI, Nizar, MOTRO, René, SMITH, Ian F.C. **Designing tensegrity modules for pedestrian bridges**. Engineering Structures, Vol.32, No.4, 2010, p. 1158-1167.
- [89] RIBEIRO, Cláudia Regina Vial. **A dimensão simbólica da arquitetura: parâmetros intangíveis do espaço concreto**. Belo Horizonte: FUMEC-FACE, C/Arte, 2003.
- [90] RILEY, William F., STURGES, Leroy D., MORRIS, Don. H. **Mecânica dos Materiais**. 5ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999.
- [91] RIPPER, Lucas Alves. **Por políticas habitacionais sustentáveis no Rio de Janeiro: materiais não-convencionais em interatividade com as particularidades socioespaciais do território carioca**. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: PUC-RJ, 2008.

- [92] RODRIGUES, Francisco Carlos. **Notas de aula da disciplina de Análise Experimental de Tensões**. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Estruturas da EE-UFMG. Belo Horizonte, 2009.
- [93] ROLAND, Conrad. **Frei Otto: Estructuras**, Gustavo Gili, 1973.
- [94] ROMEIRO FILHO, Eduardo (organizador). **Projeto do Produto**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.
- [95] SAVI, Antonio Francisco; GONÇALVES FILHO, Eduardo Vila, e SAVI, Erika Monteiro de Souza. **Engenharia apoiando o desenvolvimento sustentável**. XIII SIMPEP Simpósio de Engenharia de Produção. Bauru (SP), 2006, Disponível em: http://www.simpep.feb.unesp.br/anais/anais_13/artigos/316.pdf
- [96] **Seminário Nacional do Bambu: Consolidação da Rede Brasileira do Bambu**. Rio Branco, AC, 2010. Anais do II Seminário Nacional do Bambu. Org. por Ana Cristina Tinôco V. de Magalhães e Jaime Gonçalves de Almeida, Brasília: CPAB, Universidade de Brasília, 2011.
- [97] SNELSON, Kenneth. **Forces made visible**. Essay by Eleanos Heartney. In Association with Hudson Hills Press de Manchester, VT and New York, NY, 2009.
- [98] SEGRE, Roberto. **Agência bancária e edifícios de escritórios, Costa Rica**. Revista Projetodesign, n.323, Janeiro 2007, Disponível em: <http://www.arcoweb.com.br/arquitetura/bruno-stagno-agencia-bancaria-13-02-2007.html> acesso em 19/10/2011.
- [99] SHAMES, Irving H. **Introdução à mecânica dos sólidos**. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1983.
- [100] SHIGEMATSU, Mizuki, TANAKA, Masato, NOGUCHI, Hirohisa. **Form finding analysis of tensegrity membrane structures based on variational method**. Proceedings of the 6th International Conference on Computation of Shell and Spatial Structures IASS-IACM 2008: "Spanning Nano to Mega" 28-31 May 2008, Cornell University, Ithaca, NY, EUA John F. ABEL and J. Robert COOKE (eds.)
- [101] SILVA, Arabella Natal Galvão e CASAGRANDE JR., Eloy Fassi. **Perspectivas do design social para estratégias brasileiras de desenvolvimento local sustentável**. P&D Design 2006.
- [102] SILVA, F.A., GHAVAMI, K, ALMEIDA, J.R.M. **Comportamento ao impacto de materiais compósitos cimentícios reforçados com polpa de bambu**. 2003. Disponível em: http://www.abmtenc.civ.puc-rio.br/pdfs/artigo/Silva_F_A.pdf
- [103] SILVA, Fernando José. **Forma: uma experiência tridimensional**. Birigui SP: Boreal, 2005.
- [104] SILVA, Fernando José. MOREIRA, Luis Eustáquio; RODRIGUES, Francisco Carlos. **Design and Mechanical Tests of Bamboo Masts**. XIII NOCMAT Non-Conventional Materials and Technologies for Sustainability. Changsha (China): Setembro, 2011.
- [105] SILVA, Fernando José; RODRIGUES, Francisco Carlos; MOREIRA, Luis Eustáquio. **Flambagem de Mastros de Feixe de Bambus**. Anais do 1º Congresso Luso Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis – CLB - MCS; Guimarães, Portugal, 2014.
- [106] SILVA, Fernando José; LANA, Bernardo F.S.; RODRIGUES, Francisco C.; MOREIRA, Luís Eustáquio. **Flambagem de Mastros de Bambu com espaçadores interpostos**. Anais do 1º Congresso Luso Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis – CLB - MCS; Guimarães, Portugal, 2014.
- [107] SILVA, Jaime. **Estrutura tensionada no Clube A Hebraica**. Revista Finestra, n. 54, Setembro 2008. Disponível em: <http://www.arcoweb.com.br/tecnologia/marcelo-barbosa-e-jupira-corbucci-estrutura-tensionada-14-11-2008.html> Acesso em 16/09/2011.
- [108] SILVA JR, Jayme Ferreira. **Resistência dos materiais**. 4ed. Belo Horizonte, 1974.
- [109] SILVA, Pedro Cordeiro. **O crédito de carbono, sua natureza jurídica e o tratamento tributário no Brasil**. (2009). ISSN 2176-9648 - IV Mostra de Produção Científica da Pós-Graduação Lato Sensu – PUC-Goiás, Sessão Direito. Disponível em:

<http://www.cpgls.ucg.br/ArquivosUpload/1/File/CPGLS/IV%20MOSTRA/DIREITO/O%20Credito%20de%20Carbono.pdf> Acesso em 28/06/2011.

- [110] SIMÕES, Flávio Maya. **Utilização de Têxteis na Arquitetura e Acústica - Origens**. 1º Simpósio Nacional Sobre Tensoestruturas, São Paulo. 2002.
- [111] SOUZA, Paulo Fernandes de Almeida. **Design orientado ao ambiente: uma questão de prioridade**. Brasília: UNB, 2002. In p.40 de LIMA, Flávio Lúcio Nunes de. *Proposição de Metodologia de Avaliação do Impacto Ambiental no Desenvolvimento de Projetos Arquitetônicos*. BH: Dissertação, EA-UFGM, 2006.
- [112] STRUNCK, Gilberto. **Viver de Design**. Rio de Janeiro: 2AB, 2001.
- [113] SZÜCS, Carlos Alberto. SOARES, Mariana. OLIVEIRA, Rodrigo Caelesso de, PORATH, João Filipe. **Resistência Mecânica de Bambu Laminado Colado Utilizado em Empresa Moveleira de Santa Catarina**. In: II Seminário Nacional do Bambu. Rio Branco, AC, 2010. Organizado por Ana C. T. Magalhães, Jaime G. Almeida. Brasília: CPAB, Universidade de Brasília. ANAIS. p.155-170.
- [114] TAN, T. et al. **Mechanical properties of functionally graded hierarchical bamboo structures**. *Acta Biomaterialia* 7: p.3796-3803, ELSEVIER, 2001.
- [115] TASCHNER, Suzana Pasternak. Degradação ambiental em favelas de São Paulo. In TORRES, Haroldo; COSTA, Heloísa Soares de Moura (Orgs.). **População e meio ambiente: debates e desafios**. 2ed. São Paulo: SENAC São Paulo, 2006. p. 271-297.
- [116] TEIXEIRA, E.M.L.C.; SUZUKI, E.; VIEIRA, S.S; MORAES de, J.E.; LUCENA, M.A.C. de; OLIVEIRA, E.A.; CANOVA, E.B.; ARANTES, A.M.; CONCEIÇÃO, M.R.G ; OUTRAMARI, C.E.; ZOTTI, C.A.; PAULINO, V.T. **Mercado de crédito de Carbono**. 2010. Artigo Disponível em: http://www.infobibos.com/Artigos/2010_2/CreditoCarbono/index.htm Acesso em 26/04/2011.
- [117] TIMOSHENKO, Stephen P., GERE, James M. **Theory of elastic stability**. 2ed. New York: Mcgraw-Hill Book Company, EUA, 1963.
- [118] TIMOSHENKO, Stephen P. **Resistência dos materiais**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979.
- [119] TIMOSHENKO, Stephen P., GERE, James M. **Mecânica dos Sólidos**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1994.
- [120] TORRES, Haroldo. A demografia do risco ambiental. In TORRES, Haroldo; COSTA, Heloísa Soares de Moura (Orgs.). **População e meio ambiente: debates e desafios**. 2ed. São Paulo: SENAC São Paulo, 2006. p. 53-73.
- [121] TRIGO, Paulo. **Aplicação prática: instalação do piso de bambu no escritório TETO-Arquitetura Sustentável**. (2012). Disponível em: <http://www.revistalinhaecologica.com.br/site/?p=929> Acesso em 23/03/2012.
- [122] TUNG, S. **Study of Mechanical Properties of Bamboo**, Dissertação de Mestrado, Universidade de Tokio, 2010.
- [123] VERSCHLEISSER, Roberto. **Aplicação de Estruturas Tensegrity de Bambu no Design de Objetos. Como construir objetos leves, resistentes ecológicos de baixo custo**. Tese. Pos-Graduação em Design no Dep. De Artes e Design da PUC-Rio, sob. Orientação prof. Dr. Jose Luiz Mendes Ripper. Rio de Janeiro: PUC-Rio, Fevereiro 2008.
- [124] VILLEGAS, Marcelo. **New Bamboo Architecture and Design**. Bogotá: Villegas, Colombia, 2003
- [125] VLASOV, Vasilii Zakharovich. **Thin-Walled Elastic Beams**. 2ed. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, Israel, 1961.
- [126] WINDOW, A. L. **Strain Gauge Technology**. 2ed. Hardcover, Springer, 1992. 358p.