

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL – DACOC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – PPGEC

TIAGO RADASKIEVICZ

**INFLUÊNCIA DO TIPO DE LIGAÇÃO NO DESEMPENHO ESTRUTURAL
DE TRELIÇAS DE BAMBU MOSÔ**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CURITIBA

2016

TIAGO RADASKIEVICZ

**INFLUÊNCIA DO TIPO DE LIGAÇÃO NO DESEMPENHO ESTRUTURAL
DE TRELIÇAS DE BAMBU MOSÔ**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de Concentração: Construção Civil. Linha de pesquisa: Estruturas e Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Francisco Küster Puppi

CURITIBA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

R124i
2016 Radaskievicz, Tiago
Influência do tipo de ligação no desempenho estrutural
de treliças de bambu Mosô / Tiago Radaskievicz. -- 2016.
83 f. : il. ; 30 cm.

Texto em português com resumo em inglês

Disponível também via World Wide Web

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do
Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil,
Curitiba, 2016

Bibliografia: f. 77-83

1. Bambu – Projetos e construção. 2. Estruturas de madeira
(Construção civil). 3. Construção de bambu – Brasil. 4. Construção
de bambu – Ensaios. 5. Treliças (Construção civil). 6. Engenharia
civil – Dissertações. I. Puppi, Rogério Francisco Küster. II.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-
graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD: Ed. 22 -- 624

Biblioteca Central da UTFPR, Campus Curitiba



TERMO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO Nº

**INFLUÊNCIA DO TIPO DE LIGAÇÃO NO DESEMPENHO ESTRUTURAL DE TRELIÇAS
DE BAMBU MOSÔ**

POR

TIAGO RADASKIEVICZ

Esta dissertação foi apresentada às 09:00 do dia 29 de julho de 2016, como requisito parcial para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL**, área de Construção Civil, Linha de pesquisa Estruturas e Geotecnia, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. O Candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho **APROVADO**.

Prof. Dr. Rogério Francisco Kuster Puppi
(Orientador – UTFPR)

Prof. Dr. Dornelles Vissotto Junior
(UFPR)

Profª Dra. Erica Fernanda Aiko Kimura
(UTFPR)

Prof. Dr. Ronaldo Luís dos Santos Izzo
Coordenador do PPGEC

“O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do PPGEC.”

À memória de meu avô Ludovico, pelo exemplo de ser humano em que procuro me espelhar.

Aos meus pais Marcelo e Nair, por todo o suporte que me possibilitou trilhar meu próprio caminho.

À minha esposa Iris por todo apoio ao longo desta jornada.

Ao meu filho Matheus por despertar o que há de melhor em mim.

*Não importa o que você sabe. O que importa
é aquilo que faz com o que sabe.*

RESUMO

RADASKIEVICZ, Tiago. **Influência do tipo de ligação no desempenho estrutural de treliças de bambu Mosô**. 2016. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

A aplicação do bambu como elemento estrutural é comum em muitos países da Ásia e da América do Sul, ainda que com diferentes metodologias construtivas. Apesar de algumas espécies, como a bambu Mosô (*Phyllostachys Pubescens*) utilizada neste trabalho, possuírem excelentes propriedades mecânicas, sua difusão como elemento construtivo esbarra na dificuldade de se conceber sistemas de ligação eficientes entre os elementos estruturais. Uma vez que as ligações são o ponto frágil da estrutura, o colapso da estrutura pode ocorrer com o elemento estrutural ainda intacto. Este trabalho buscou avaliar a influência do sistema de ligação no desempenho estrutural de treliças planas executadas com três diferentes sistemas de ligação, sujeitas a condições de carregamento semelhantes. Ao comparar as resistências obtidas em ensaios de caracterização: compressão (41 MPa), tração (146 MPa) e cisalhamento (10 MPa), com as tensões solicitantes nas barras das treliças no momento do colapso, verificou-se que as propriedades mecânicas do bambu foram subutilizadas, uma vez que o colapso das estruturas ensaiadas teve início invariavelmente nas ligações.

Palavras-chave: bambu, ligações em bambu, estruturas de bambu, propriedades do bambu

ABSTRACT

RADASKIEVICZ, Tiago. **Influence of connection systems on the structural performance of Moso bamboo trusses.** 2016. Dissertation (MSc. in Civil Engineering) - Graduate Program in Civil Engineering, Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2016.

The use of bamboo as structural element is a reality in many countries in Asia and South America, even with different building methodologies. Although some bamboo species, as Moso (*Phyllostachys Pubescens*) have excellent mechanical properties, its diffusion as a building element conflicts with the difficulty on conceiving efficient connection systems between structural elements. Given that joints are the weak point of the structure, collapse may occur even when the structural element is intact. This research aimed to evaluate the influence of connection systems on the structural performance of plan trusses built with three different connection systems subjected to similar load conditions. By comparing the strengths obtained on the characterization tests of compression (41 MPa), tension (146 MPa) and shear (10 MPa) to the acting stresses on the truss bars in the moment of collapse, it was noted that bamboo mechanical properties were underused, once the collapse of the tested structures always started by the connections.

Keywords: bamboo, bamboo connections, bamboo structures, bamboo properties

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva tensão x deformação típica: Compressão	64
Gráfico 2 - Curva tensão x deformação típica: Tração	66
Gráfico 3 - Curva força x deflexão típica: Flexão	69
Gráfico 4 - Tensão de tração (banzos inferiores)	73

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Partes do colmo	17
Figura 2 - Bambu do tipo leptomorfo/alastrante e seu respectivo rizoma	18
Figura 3 - Bambu entouceirante/paquimorfo e seu respectivo rizoma.....	19
Figura 4 - Seção transversal típica de um colmo de bambu	20
Figura 5 - Córtex com epiderme e hipoderme (200X).....	21
Figura 6 - Camada interna da parede do colmo	21
Figura 7 - Feixes vasculares imersos em tecido parenquimatoso	23
Figura 8 - Seção transversal de um feixe fibrovascular	23
Figura 9 - Concentração de feixes fibrovasculares na parede de colmo	24
Figura 10 - Bambuzal do tipo alastrante	26
Figura 11 - Métodos de tratamento dos colmos	28
Figura 12 - Aplicação estrutural do bambu em edificação	29
Figura 13 - Encaixes tradicionais para ligações	37
Figura 14 - Exemplo de ligações utilizando princípio do grupo 1	39
Figura 15 - Esquemas de ligação grupo 2	40
Figura 16 - Ligação com barra rosqueável fixada com resina	40
Figura 17 - Exemplos de conexões do grupo 3	41
Figura 18 - Protótipo de estrutura espacial com ligação em PVC	42
Figura 19 - Ligação proposta por Shoei Yoh (Grupo 4B).....	43
Figura 20 - Ligação em "T"	43
Figura 21 - Grelha de vigas com transmissão perpendicular de forças	44
Figura 22 - Ligação grupo 6.....	44
Figura 23 - Corpo de prova para ensaio nº1	47
Figura 24 - Realização do ensaio nº1	48
Figura 25 - Corpos de prova para o ensaio nº2	49
Figura 26 - Dimensões, em mm, do corpo de prova do ensaio nº3	51
Figura 27 - Realização do ensaio nº3.....	51
Figura 28 - Acessórios para realização do ensaio nº4.....	52
Figura 29 - Ensaio nº4: planos de cisalhamento.....	52
Figura 30 - Esquema para execução do ensaio nº5	53
Figura 31 - Realização do ensaio nº5.....	55

Figura 32 - Modelo estrutural treliça tipos 1 e 2.....	56
Figura 33 - Modelo estrutural treliça tipo 3	56
Figura 34 - Execução de ligação conhecida como “T” colombiano.....	57
Figura 35 - Ligação entre o banzo inferior e montante central	58
Figura 36 - Treliza com reforço de fibra de vidro na região da ligação	59
Figura 37 - Adequação entre o colmo e pino de madeira	60
Figura 38 - Pinos de madeira com cola e braçadeira metálica	61
Figura 39 - Treliza tipo 3 finalizada.....	61
Figura 40 - Treliza preparada para início do ensaio	62
Figura 41 - Deflexão vertical antes do colapso	68
Figura 42 - Ocorrência do colapso.....	69
Figura 43 - Colapso iniciado por cisalhamento junto a ligação.....	71
Figura 44 - Colapso iniciado nas proximidades da ligação	72
Figura 45 - Colapso típico da ligação do tipo 3.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Códigos e normas existentes sobre construção em bambu	34
Tabela 2 - Resultados ensaio nº 1	63
Tabela 3 - Propriedades do bambu Mosô com madeiras brasileiras	64
Tabela 4 - Resultados ensaio nº2.....	65
Tabela 5 - Resultados ensaio nº 3.....	66
Tabela 6 - Relação σ_T/γ bambu Mosô e aço CA-50.....	66
Tabela 7 - Resultados do ensaio nº4.....	67
Tabela 8 - Resultados ensaio nº5.....	68
Tabela 9 - Resumo dos resultados obtidos	74

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVO	14
1.1.1	Objetivo geral	14
1.1.2	Objetivos específicos	14
1.2	JUSTIFICATIVA	15
2.	REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1	BAMBU: GENERALIDADES	16
2.2	CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS	17
2.2.1	Colmo	17
2.2.2	Rizoma	18
2.3	CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS	19
2.3.1	Cortéx	20
2.3.2	Camada interna do colmo	21
2.3.3	Região fibro vascular	22
2.3.4	Parênquima	22
2.3.5	Feixes fibrovasculares	22
2.3.6	Fibras	24
2.4	CICLO E MANEJO DO BAMBU	25
2.4.1	Cultivo	25
2.4.2	Crescimento e propagação	26
2.4.3	Corte	27
2.4.4	Tratamento	27
2.5	CONSTRUÇÕES EM BAMBU	29
2.5.1	Características técnicas	30
2.5.2	Construções em bambu e sustentabilidade	32
2.6	NORMATIZAÇÃO EXISTENTE	33
2.7	PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COLMOS	35
2.8	SISTEMAS DE LIGAÇÃO	36
2.8.1	Grupo 1: Transferência por compressão da seção transversal	39
2.8.2	Grupo 2: Transferência por atrito à superfície interna do colmo	40
2.8.3	Grupo 3: Transferência por atrito à superfície externa do colmo	41

2.8.4	Grupo 4: Transferência por cisalhamento à parede do colmo por elementos perpendiculares às fibras fixados internamente (4A) ou externamente (4B).....	42
2.8.5	Grupo 5: Transferência perpendicularmente às fibras	43
2.8.6	Grupo 6: Transferência por compressão radial para o centro do colmo, cisalhamento e tensões perpendiculares às fibras.....	44
2.9	TRELIÇAS	45
3.	METODOLOGIA	46
3.1	PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS COLMOS	46
3.1.1	Ensaio nº 1 – Compressão axial, módulo de elasticidade.....	46
3.1.2	Ensaio nº2: Peso próprio e teor de umidade.....	49
3.1.3	Ensaio nº 3 – Tração.....	50
3.1.4	Ensaio nº 4 – Cisalhamento.....	52
3.1.5	Ensaio nº5 – Flexão	53
3.2	CONFECÇÃO DAS TRELIÇAS.....	55
3.2.1	Treliça tipo 1 – Ligação com barra rosqueável	57
3.2.2	Treliça tipo 2 – Ligação com barra rosqueável e fibra de vidro	58
3.2.3	Treliça tipo 3 – Ligação com pinos de madeira inseridos no colmo	60
3.3	REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS COM AS TRELIÇAS.....	62
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
4.1	PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS.....	63
4.2	TRELIÇAS	70
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	75
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	76
	REFERÊNCIAS.....	77

1. INTRODUÇÃO

Pertencente à família das gramíneas e conhecido como “a planta dos mil usos”, o bambu encontra vasta aplicabilidade no âmbito da construção civil, sobretudo como elemento estrutural. É um material renovável a curto prazo e amplamente disponível em regiões tropicais, subtropicais e temperadas. Em algumas regiões, principalmente na Ásia e Colômbia, sua aplicabilidade e importância como material de construção é similar ao da madeira no Brasil.

Além de ser um recurso renovável à curto prazo, de baixo custo e fácil trabalhabilidade, o bambu possui uma relação resistência à tração x peso próprio otimizada, devido a seu formato cilíndrico e oco, estrutura segmentada e a disposição predominantemente longitudinal de suas fibras.

Por tratar-se de um material que na maioria das vezes é aplicado em seu formato natural, uma das grandes preocupações que se deve ter no manejo diz respeito ao tratamento que o bambu deve receber para evitar o ataque de organismos xilófagos, que podem reduzir a vida útil dos colmos.

Uma vez que as metodologias para tratamento e preservação dos colmos encontram-se relativamente resolvidas, o maior problema na disseminação das estruturas em bambu consiste no sistema de ligação a ser adotado. As mesmas características físicas que conferem resistência como um todo, causam problemas de forma localizada no tocante à concepção de ligações eficazes entre os colmos ou com outros materiais.

A busca por sistemas de ligação eficientes e passíveis de padronização e industrialização visam disseminar o bambu como um material de construção competitivo principalmente para aplicação de colmos inteiros em estruturas reticuladas.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo estudar o desempenho estrutural dos colmos de bambu mosô quando associado a diferentes tipos de sistemas de ligação.

1.1.1 Objetivo geral

Estudar a influência dos diferentes tipos de ligações no desempenho estrutural de treliças plana com barras construídas com bambu mosô.

1.1.2 Objetivos específicos

- Obter valores das resistências mecânicas (compressão, tração, flexão e cisalhamento) dos colmos de bambu da espécie *Phyllostachys Pubescens* (bambu mosô);
- Verificar a solicitação dos elementos estruturais em treliças planas;
- Apontar diretrizes para o dimensionamento de estruturas em bambu, conforme características do elemento estrutural e ligação utilizada.

1.2 JUSTIFICATIVA

Há séculos o bambu tem sido empregado como elemento estrutural na construção civil, majoritariamente em habitações vernaculares, edificadas com base em conhecimentos tradicionais de determinados povos e culturas.

Com o avanço dos estudos acerca de suas propriedades físicas e mecânicas e a necessidade de materiais renováveis e de baixo impacto ambiental, tem aumentado as pesquisas sobre este material, bem como seu emprego por parte de alguns notórios construtores, sobretudo em países como Colômbia, China, Índia, Japão e Alemanha.

Em estruturas reticuladas, de modo geral, a ligação constitui o ponto mais frágil da estrutura e o processo de dimensionamento das ligações, assim como das barras, deve seguir procedimentos testados e normatizados, a partir dos esforços obtidos na análise estrutural, de forma a possibilitar o dimensionamento de estruturas seguras e com desempenho em serviço aceitáveis.

Atualmente o principal entrave para a disseminação da metodologia construtiva em bambu consiste na dificuldade de concepção de sistemas de ligação eficazes, devido às características anatômicas dos colmos (geometria tubular segmentada e orientação predominante longitudinal dos feixes de fibras), bem como a escassez de normatizações específicas.

Como o bambu é um material renovável a curto prazo, com propriedades físicas e mecânicas interessantes e presente em diversas regiões do mundo, inclusive no Brasil, o estudo e desenvolvimento de sistemas de ligação mais eficientes possibilitaria a utilização do bambu como elemento estrutural em larga escala, de modo similar à madeira.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 BAMBU: GENERALIDADES

O bambu é um material que tem sido utilizado pelo ser humano desde os tempos mais remotos, fornecendo alimento, abrigo, utensílios domésticos, ferramentas, papel, tecido, cordas e uma infinidade de outros objetos de uso cotidiano (BERALDO e PEREIRA, 2008). Farrely (1984) descreve, em ordem alfabética, mil diferentes aplicações.

Botanicamente o bambu é classificado como *Bambusae*, uma subfamília da *Gramineae*. Trata-se de uma planta lenhosa, monocotiledônea e angiosperma, com cerca de 1250 espécies distribuídas naturalmente dos trópicos às regiões temperadas, sendo a maior ocorrência nas zonas quentes e com chuvas abundantes das regiões tropicais e subtropicais da Ásia, África e América do Sul (OLIVEIRA, 2006).

A estrutura do bambu consiste em um sistema subterrâneo de rizomas e raízes, e em uma parte aérea denominada colmo, análogo ao tronco nas árvores, porém, diferentemente destas cujo crescimento acontece de maneira radial, o colmo já sai da terra com seu diâmetro definitivo (RECHT & WETTERWALD, 1992).

O bambu possui algumas particularidades que o destacam de imediato de outras plantas utilizadas para fins estruturais. É bastante conhecido pelo seu rápido crescimento vertical – em torno de 30 cm em um período de 24 horas – sendo que há registros de exemplares que apresentaram crescimento de até 100 cm no mesmo período. Desta forma atinge sua altura máxima em torno de 4 meses, período após o qual ocorre a maturação com o aumento de espessura da parede do colmo e cerca de 3 a 4 anos após o plantio o bambu está pronto para ser colhido, tratado e utilizado. Somam-se a essas características a baixa massa específica, e a geometria circular oca otimizada em termos da razão resistência/massa (LÓPEZ, 2003).

Outra característica interessante é quanto à perenidade e a resistência em ambientes inóspitos. Embora a vida útil dos colmos seja de cerca de 10 anos, há registros de touceiras (moitas) de bambu plantadas há mais de um século, com

constante renovação dos colmos. Após a devastação da cidade de Hiroshima pela bomba atômica, o bambu foi a primeira planta a reaparecer (PEREIRA, 2001).

2.2 CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS

2.2.1 Colmo

Os colmos do bambu são estruturas cilíndricas cujo diâmetro externo varia de 2 a 30 cm, podendo medir até aproximadamente 30 m de altura, de acordo com a espécie. O colmo é formado por uma série alternada de nós e internós, que dão origem a uma estrutura segmentada.

Os internós correspondem à parte oca do colmo e suas células são axialmente orientadas. Na parte denominada nó ocorrem interconexões destas células com uma mudança para direção transversal, criando um reforço estrutural localizado, bem como uma membrana interna ao colmo chamada diafragma (RECHT & WETTERWALD, 1992). Os diafragmas propiciam maior rigidez e resistência aos colmos, permitindo-lhes suportar a ação do vento e do peso próprio mesmo se tratando de estruturas bastante delgadas.

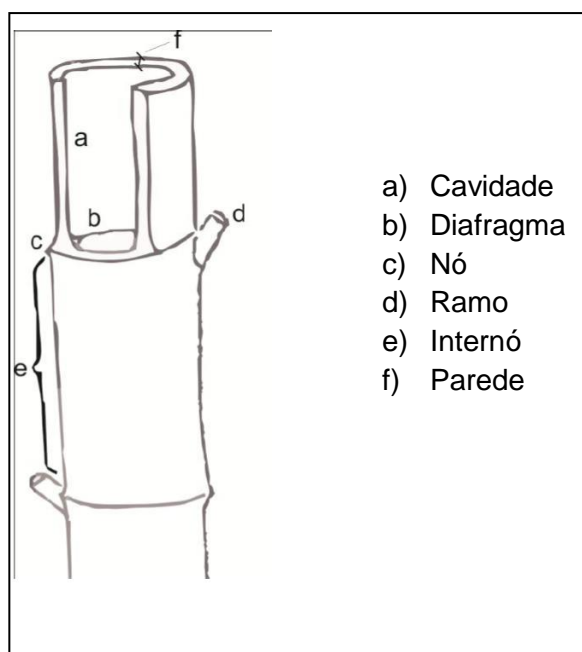


Figura 1 - Partes do colmo

Fonte: Janssen (1988)

2.2.2 Rizoma

O rizoma é um caule que se desenvolve entre o colmo e a raiz. Tem a função de armazenar nutrientes para distribuição posterior bem como garantir a propagação da planta.

De acordo com López (2003) o nascimento de novos colmos ocorre de forma assexuada através da multiplicação dos rizomas, sendo que a maneira com que se propagam permite a classificação das espécies de bambu em dois grupos principais: os alastrantes e os entouceirantes.

Os alastrantes, leptomorfos ou monopodiais ocupam grandes áreas, mantendo distância aproximada de 1 metro entre os colmos e dando origem a verdadeiros bosques. Os rizomas deste grupo são longos, delgados e de formato cilíndrico, podendo crescer entre 1 e 6 metros por ano, formando uma teia subterrânea de grande capacidade de propagação, chegando inclusive a cruzar estradas e muros. Este tipo de bambu apresenta ramos e folhas nas partes altas do colmo mesmo antes de atingir sua altura final.

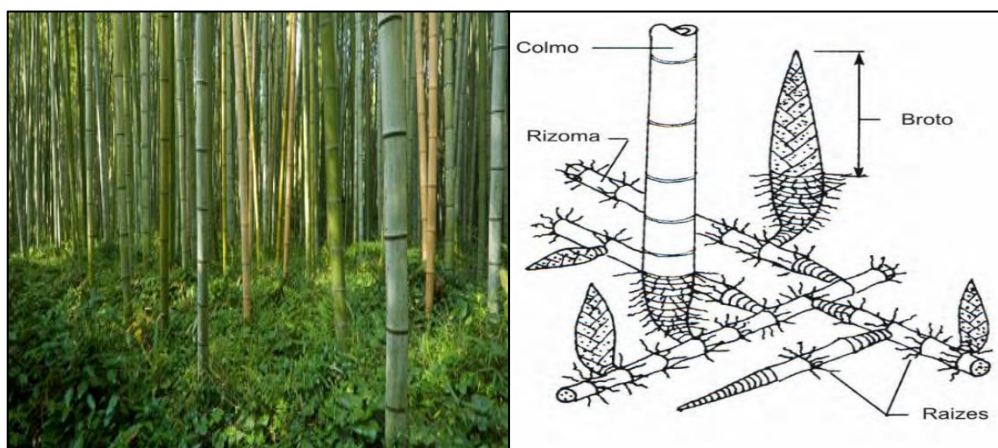


Figura 2 - Bambu do tipo leptomorfo/alastrante e seu respectivo rizoma

Fonte: Adaptado de López (2003)

Os entouceirantes, simpodiais ou paquimorfos caracterizam-se por seus colmos se desenvolverem muito próximos uns dos outros, gerando um agrupamento em forma de touceiras ou moitas. Os bambus deste grupo estão largamente distribuídos nas regiões quentes e tropicais. Seus rizomas são curtos, grossos e

sólidos, com entrenós assimétricos e raízes na parte inferior. Os rizomas possuem gemas laterais de onde se desenvolvem novos rizomas e novos colmos. Após o nascimento de novos rizomas seu ápice volta-se para cima para dar origem a um novo colmo. Assim, sucessivamente, novos rizomas vão se desenvolvendo periféricamente e se agrupando na forma de moitas que podem conter entre 30 a 100 colmos. (PEREIRA, 2001)

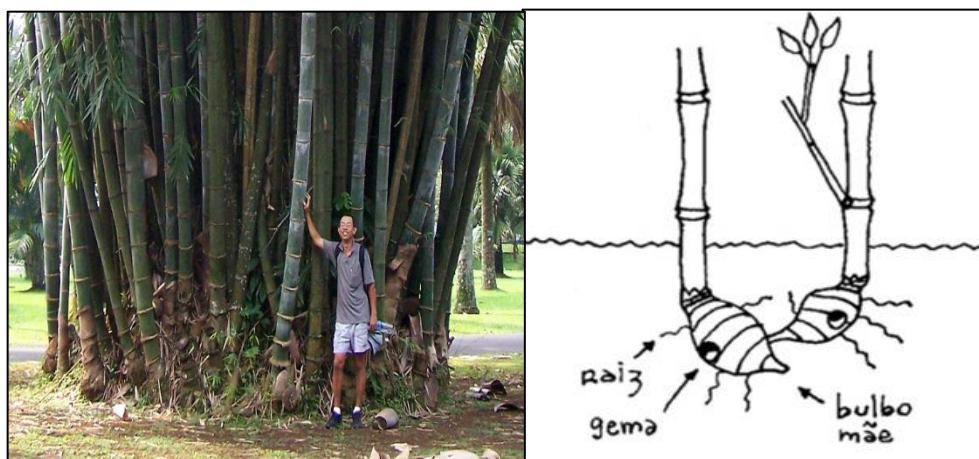


Figura 3 - Bambu entouceirante/paquimorfo e seu respectivo rizoma

Fonte: Adaptado de López (2003)

2.3 CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS

O estudo da estrutura anatômica do bambu fornece subsídios para compreensão das propriedades físicas e mecânicas do colmo e de seu desempenho estrutural (LÓPEZ, 2003).

A seção transversal de um colmo de bambu apresenta tipicamente três estruturas anatômicas principais: córtex, camada interna do colmo e região fibrovascular (figura 4).

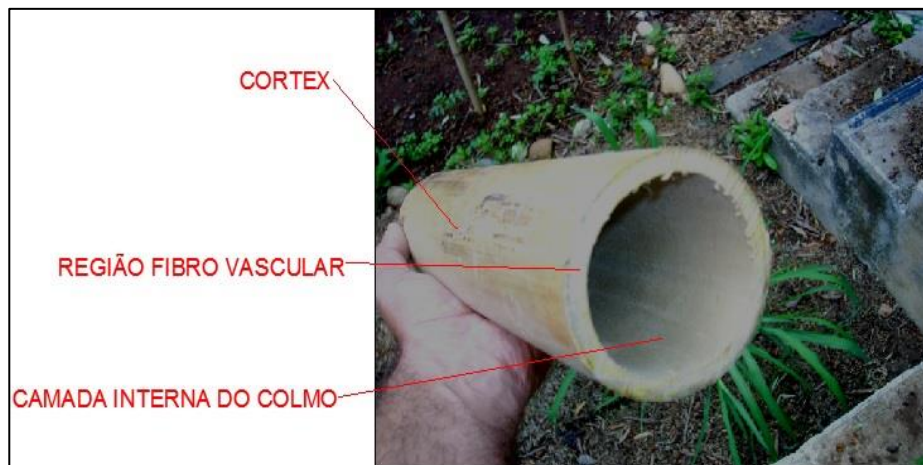


Figura 4 - Seção transversal típica de um colmo de bambu

Fonte: Autoria própria

2.3.1 Cortéx

É a parte externa do colmo, cujas principais funções são bloquear a água e proteger os tecidos internos. A camada mais externa do córtex chama-se epiderme e é constituída por camadas de células axialmente alongadas com alto teor de sílica, que fortalece esta camada. Estas células são recobertas por uma superfície brilhante, conhecida como cutícula, composta por celulose e pectina (LIESE, 1998).

Um revestimento de cera forma-se na superfície o qual microscopicamente mostra-se com formatos que variam de placas irregulares à grânulos. Esta camada confere ao bambu um aspecto de acabamento bastante apreciado para aplicações na construção civil (BERALDO e PEREIRA, 2008).

Logo abaixo da epiderme localiza-se a hipoderme, que consiste em várias camadas espessas de células esclerenquimáticas, como mostrado na figura 5 (LIESE, 1998).

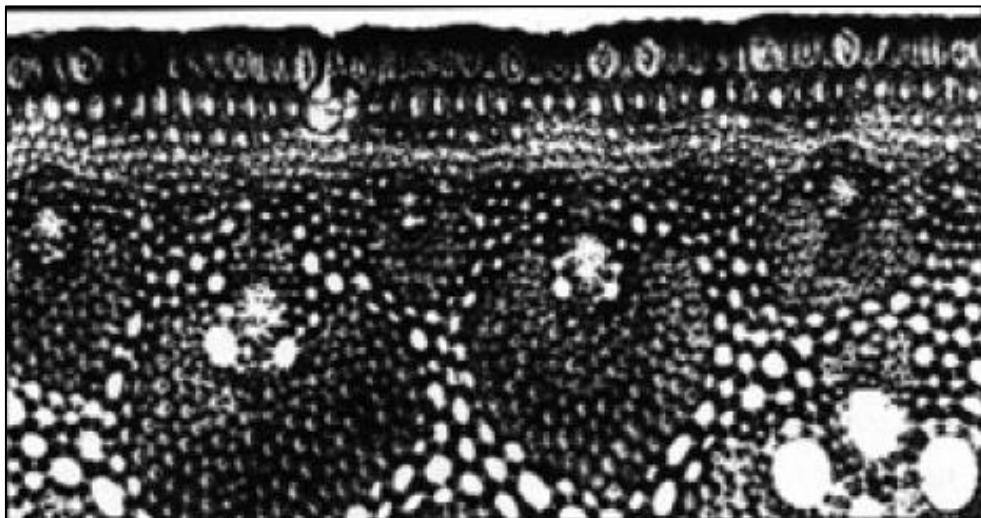


Figura 5 - Córtecx com epiderme e hipoderme (200X)

Fonte: Liese (1998)

2.3.2 Camada interna do colmo

Esta camada é composta por células que formam o tecido denominado parênquima. Essas células são geralmente espessas e altamente lignificadas e muitas vezes apresentam uma membrana com aspecto de cortiça, a qual torna a câmara formada pelo internó impermeável e hermética, como mostrado na figura 6 (LÓPEZ, 2003).

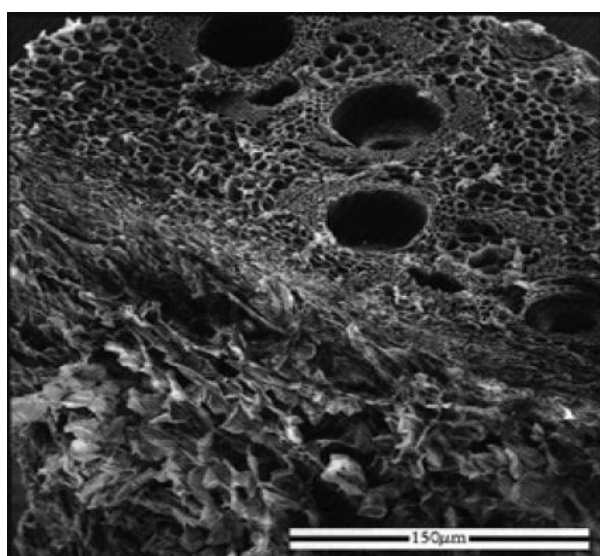


Figura 6 - Camada interna da parede do colmo

Fonte: LIESE (1998)

2.3.3 Região fibro vascular

Localizada entre o córtex e a camada interna do colmo, consiste em células de parênquima que formam um tecido base, feixes vasculares compostos de tecido condutor (vasos de metaxilema, protoxilema e floema) e tecido de sustentação composto por cordões de esclerênquima e fibras. Em média, a constituição de um colmo adulto é de 52% de parênquima, 40% de fibras e 8% de tecido condutor, valores estes que variam com a espécie (LÓPEZ, 2003).

2.3.4 Parênquima

Existem no bambu dois tipos de células de parênquima: as alongadas verticalmente (~ 100 x 20mm) e, intercalando-se à estas, outras células, menores, que se assemelham a pequenos cubos. As células alongadas são caracterizadas por suas espessas paredes com estrutura poli lamelar. A maior parte dessas células se torna lignificada logo nos primeiros estágios do crescimento do internó.

As paredes da maioria das pequenas células cúbicas mantêm-se não lignificadas ao longo da vida do colmo. Estas células possuem citoplasma mais denso e paredes mais delgadas que as células alongadas.

As células do parênquima podem conter significativa quantidade de amido (altamente atrativo a organismos xilófagos) e intercomunicar-se por meio de pontuações localizadas nas paredes longitudinais. O teor de parênquima decresce da base para o ápice dos colmos do bambu.

2.3.5 Feixes fibrovasculares

No corte transversal do internó de um colmo de bambu é possível visualizar diversos pontos de cor marrom na região fibro vascular, que variam em tamanho e forma de acordo com a altura do internó considerado. Cada um desses pontos é um feixe fibrovascular, os quais estão imersos em um tecido base composto por células de parênquima, conforme figura 7 (LÓPEZ, 2003). Esse tecido ao redor dos feixes

confere resiliência ao colmo, sem a qual estes seriam inflexíveis e quebradiços quando submetidos a esforços como a ação do vento (LIESE, 1998).

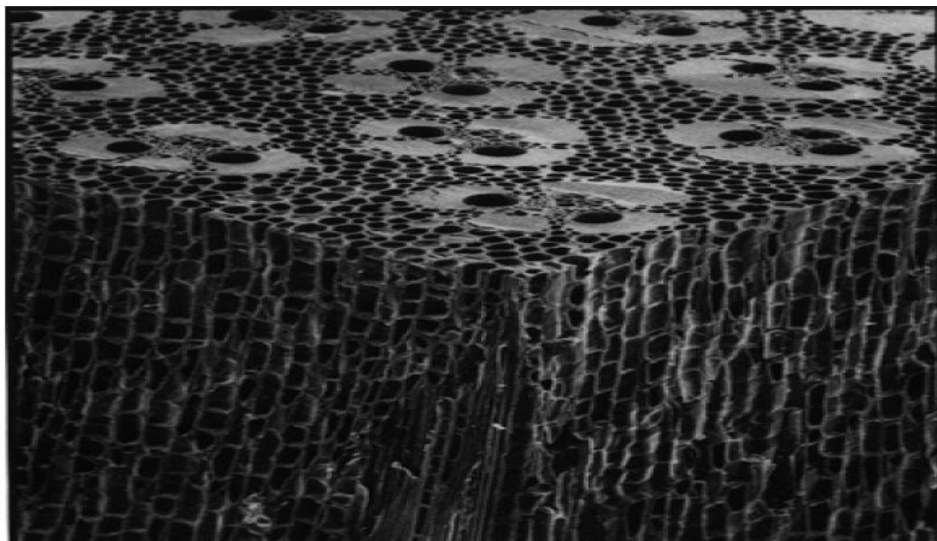


Figura 7 - Feixes vasculares imersos em tecido parenquimatoso

Fonte: LIESE (1998)

Cada feixe é constituído por cordões de esclerênquima e fibras, e um tecido condutor composto por (i) dois vasos largos de metaxilema (ii) um ou dois vasos estreitos de protoxilema localizados entre os vasos de metaxilema e (iii) floema que consiste em tubos crivados, de parede fina, não lignificada, conectados à várias células companheiras (FILHO & AZZINI, 1987).

Os vasos de metaxilema transportam a água das raízes até as folhas mais altas, já os tubos crivados transportam uma solução de nutrientes das folhas às células de parênquima do rizoma e do colmo. O protoxilema, por sua vez, tem a função de fornecer água ao colmo de bambu em crescimento (LÓPEZ, 2003).

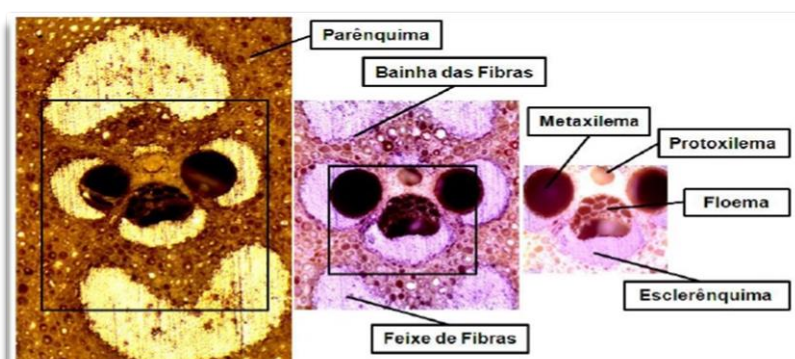


Figura 8 - Seção transversal de um feixe fibrovascular

Fonte: MARINHO (2012)

Os feixes fibrovasculares são menores e mais concentrados a medida que se situam mais próximos da parte externa do colmo, como pode ser visto na figura 9 (GHAVAMI e MARINHO, 2003). Segundo Lopez (2003), a densidade de vasos que formam estes feixes é duas vezes maior na parte externa do que na porção central, e cerca de 2,75 vezes maior do que na parte interna.

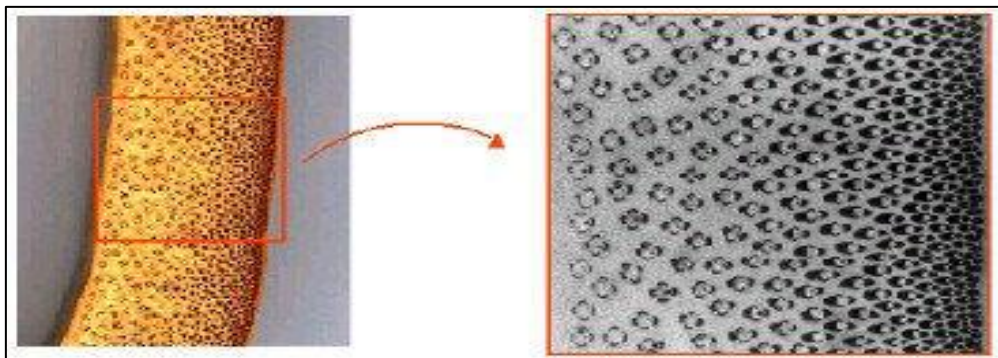


Figura 9 - Concentração de feixes fibrovasculares na parede de colmo

Fonte: GHAVAMI e MARINHO (2003)

2.3.6 Fibras

O tecido mecânico do bambu é constituído por fibras, isoladas ou envolvidas por bainhas de esclerênquima, e tem como principal função conferir resistência ao colmo, sendo responsáveis por aproximadamente 40% da composição deste (LÓPEZ, 2003).

As fibras do bambu são caracterizadas por seu formato esbelto, com estreitamento nas extremidades e, em alguns casos, bifurcações. A porcentagem de fibras decresce da camada mais externa para a camada mais interna, ao passo que a quantidade de tecido parenquimatoso aumenta na mesma direção. Dividindo-se a região fibrovascular em três porções (i) externa (ii) média (iii) interna, cerca de 50% do total de fibras encontra-se na porção externa.

Estudos realizados com 78 diferentes espécies de bambu obtiveram medidas de comprimento para as fibras que vão de 1,04 a 2,64 mm, sendo adotado um valor médio de 1,9 mm (LIESE, 1998).

As dimensões das fibras sofrem variações ao longo do colmo e em um mesmo internó. Ao longo da seção transversal o comprimento das fibras aumenta da periferia

até a região central e diminui do centro para a porção interna do colmo. Longitudinalmente, em um único internó, o comprimento das fibras pode variar em até 100%, sendo que as fibras mais curtas estão localizadas próximas aos nós e as mais longas na porção central do internó (LÓPEZ, 2003).

2.4 CICLO E MANEJO DO BAMBU

2.4.1 Cultivo

Ao redor do mundo, o bambu pode ser encontrado nas mais diferentes localizações, climas, topografia e solos. Geograficamente os bambus estão horizontalmente distribuídos nas zonas tropicais, subtropicais e temperadas de todos os continentes, com exceção da Europa, entre o norte da Ásia e o sul da Argentina.

Quanto à altitude, a distribuição ocorre desde o nível do mar até alturas de 4.000m (Himalaia) e 5.000m (cordilheira dos Andes). Fatores com a temperatura, precipitação e tipo do solo, não limitam, de maneira isolada, o desenvolvimento do bambu, uma vez que ao longo do tempo as espécies foram se adaptando às condições locais (LÓPEZ, 2003).

O plantio de bambu deve ser muito bem planejado, pois em função de suas características de reprodução e alastramento, um bambuzal pode facilmente exceder as áreas destinadas ao plantio, vindo a invadir outras propriedades e sendo uma planta de difícil erradicação.

Por tratar-se de uma planta perene, o bambu dispensa replantios, uma vez que o nascimento de novos colmos de bambu ocorre anualmente e de maneira assexuada através da ramificação dos rizomas.

Para o plantio do bambu é comum fazer uma cova de dimensões aproximadas de 50 cm x 50 cm x 50 cm, proceder a adubação e regar constantemente até que ocorra a pega. Também é preciso combater o ataque de formigas e também eliminar o mato ao redor das mudas, pois o início do desenvolvimento da planta pode ser prejudicado pela competição por luz solar e nutrientes.

O espaçamento varia de acordo com o tipo de bambu (entouceirante ou alastrante) e com a finalidade do plantio. Espécies de menor porte admitem um espaçamento de cerca de 5m x 5m, enquanto as maiores, ou gigantes, devem ser plantadas com distâncias aproximadas de 8m x 7m, visando facilitar a posterior colheita dos colmos. Para outras finalidades, tal como barreiras acústicas, visuais ou contra o vento, podem ser adotados espaçamentos menores de acordo com a necessidade, uma vez que não há intenção de colher os colmos futuramente (BERALDO e PEREIRA, 2008).



Figura 10 - Bambuzal do tipo alastrante

Fonte: NMBA (2006)

2.4.2 Crescimento e propagação

A floração nos bambus, e por consequência a produção de sementes, é um fenômeno raro e ainda pouco compreendido. Desta forma, a propagação assexuada ou vegetativa é a mais utilizada no cultivo da planta, utilizando-se para tal um dos seguintes métodos: transplante total ou parcial de colmos, pedaços do rizoma (método pouco estudado), pedaços do colmo (internó) e por ramos laterais.

A escolha do método se dá principalmente de acordo com o tipo de rizoma e as dimensões dos colmos da espécie em questão. Independentemente da parte escolhida para o plantio esta deve conter três estruturas básicas: parte aérea, raízes e rizomas.

2.4.3 Corte

Apesar do broto do bambu deixar o solo já com seu diâmetro definitivo, os colmos atingem suas características físicas definitivas por volta dos 3 anos de idade. Como em um bambuzal ocorre a brotação de novos colmos anualmente, faz-se necessário identificar as diferentes gerações ali presentes, de forma a permitir um manejo que não comprometa a sustentabilidade da plantação.

A época de corte deve ser preferencialmente a estação mais seca do ano, o que torna o processo de secagem mais fácil além de coincidir com o período no qual os insetos xilófagos estão menos ativos.

Usualmente são utilizadas ferramentas manuais na colheita, como serras e serrotes de dentes finos, devido à geometria oca do bambu. Deve-se tomar cuidado para evitar o fendilhamento do colmo na região do corte, bem como efetuar o seccionamento rente ao nó mais próximo da base, de modo a evitar o acúmulo de água e conseqüente apodrecimento da parte restante do colmo (BERALDO e PEREIRA, 2008).

2.4.4 Tratamento

A maioria das espécies de bambu possui baixa resistência ao ataque de organismos xilófagos, que se alimentam do amido depositado nas células parenquimatosas dos colmos maduros.

Enquanto o ataque por fungos pode ser prevenido por detalhes arquitetônicos e construtivos que mantêm o bambu seco, o ataque por insetos deve ser evitado através de técnicas, preferencialmente aplicáveis em escala industrial, que permitam

aumentar a durabilidade dos colmos, visando tornar o bambu competitivo em relação aos materiais convencionais (ESPELHO & BERALDO, 2008).

De acordo com Ubidia (2002), os métodos de tratamento e preservação dos colmos de bambu estão divididos em dois grandes grupos (figura 11):

- Os que utilizam componentes químicos e são aplicados por equipamentos, seja de modo artesanal ou industrial;
- Os que se baseiam em conhecimentos tradicionais de determinados grupos étnicos, adquiridos ao longo do tempo;

Segundo a NMBA (2006), a metodologia a ser empregada para o tratamento pode ainda levar em consideração fatores como: idade do colmo, formato, aplicação final, escala e potenciais agentes de degradação.

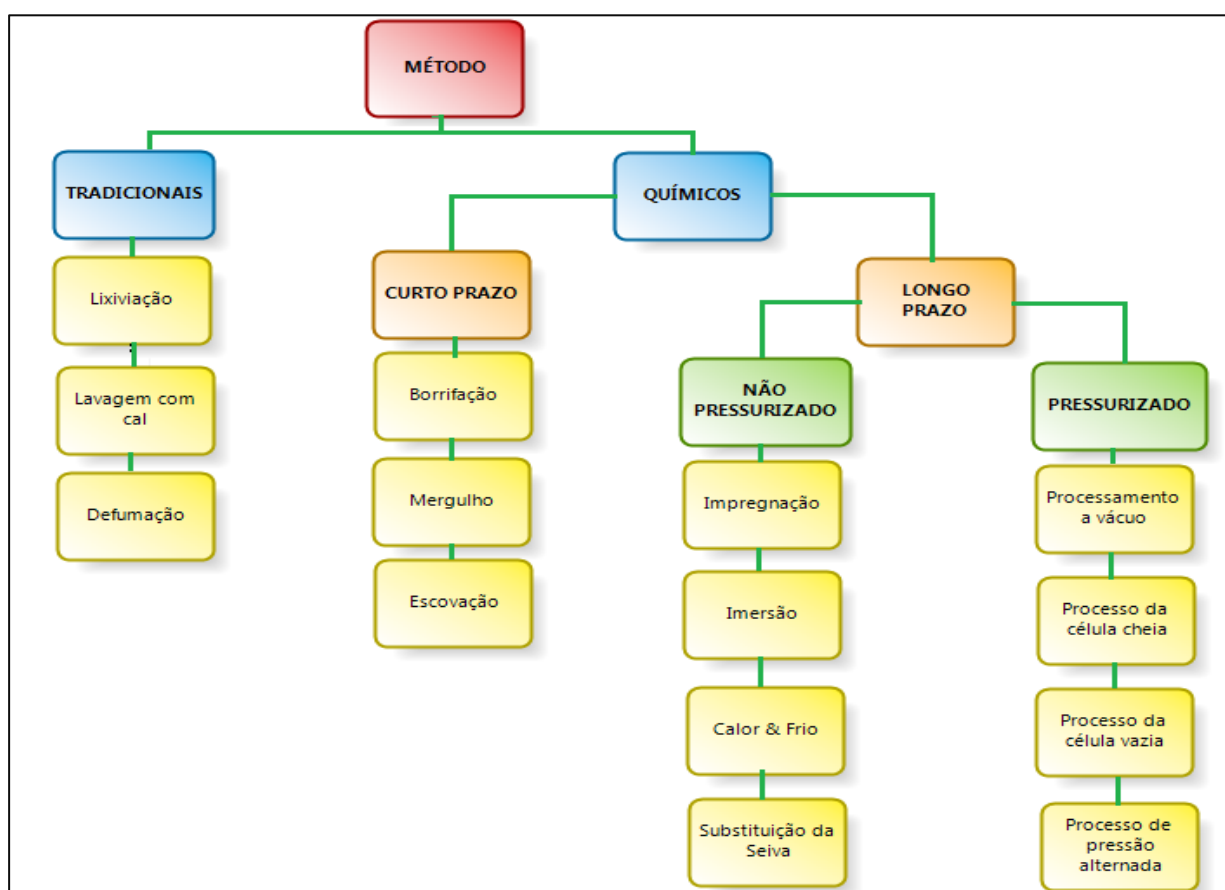


Figura 11 - Métodos de tratamento dos colmos

Fonte: Adaptado de NMBA (2006)

2.5 CONSTRUÇÕES EM BAMBU

O emprego do bambu na construção civil é bastante difundido em países asiáticos, com destaque para China e Indonésia, e na América Latina se faz presente no Equador, Peru, Costa Rica e, principalmente, na Colômbia. Sua utilização, ainda que de forma predominantemente empírica, se dá como material de fechamento (paredes, coberturas) e principalmente como elemento estrutural na forma de elementos pilares, vigas e treliças, como mostrado na figura 12. Sua aplicação em grande escala, como material de construção técnica e economicamente viável, depende do aprimoramento nos estudos científicos para análise dos processos de plantação, colheita, cura e tratamento, além da caracterização das propriedades físicas, mecânicas e microestruturais dos colmos de diferentes espécies (GHAVAMI & MARINHO, 2003).



Figura 12 - Aplicação estrutural do bambu em edificação

Fonte: Marçal (2008)

Estima-se que 75% das cerca de 1250 espécies de bambu tenham algum uso local, e que cerca de 50 dessas espécies são utilizadas e exploradas de forma intensa. O INBAR – International Network for Bamboo e Rattan – recomenda a introdução e

experimentação de 19 espécies consideradas prioritárias, levando em consideração critérios referentes à sua utilização, cultivo, processamento e produtos, recursos genéticos e edafoclimáticos, sendo que muitas destas espécies foram introduzidas no Brasil e atualmente encontram-se adaptadas às condições locais de clima e solo (BERALDO e PEREIRA, 2008).

Ensaio realizados na UNESP mostram que no Brasil há 3 espécies de bambus que apresentam melhores propriedades físicas e mecânicas, sendo, portanto, as mais indicadas para uso estrutural. São elas: bambu Guadua (*Guadua Angustifolia*), bastante presente na região norte do país, em especial no estado do Acre; bambu Gigante (*Dendrocalamus Giganteus*), também conhecida como bambu-balde devido a seu diâmetro externo da ordem de 20 cm e o bambu Mosô (*Phyllostachys Pubescens*), espécie nativa da China introduzida no país por imigrantes asiáticos e muito bem adaptada às condições locais (CAPELLO, 2006). Características físicas destas espécies, como seção tubular circular, diâmetro, orientação retilínea dos colmos e peso específico, influenciam diretamente propriedades mecânicas relevantes para a aplicação estrutural, como momento de inércia, resistência a solicitações axiais, índice de esbeltez e peso próprio da estrutura.

2.5.1 Características técnicas

Da mesma forma que os materiais de construção convencionais, o bambu apresenta uma série de aspectos favoráveis e outros limitantes, que devem ser conhecidos para que o mesmo seja empregado sob condições favoráveis ao seu melhor desempenho.

Pesquisadores de diversas partes do mundo, como Widyowijatnoko (2012) e Minke (2010) tem apontado estas características. Dentre os aspectos favoráveis que fazem do bambu um material com grande potencial de aplicação como elemento estrutural, podem ser listados:

- Geometria oca que confere aos colmos leveza, flexibilidade e capacidade de absorver energia, características que fazem do bambu um material ideal para construções sismo resistentes;

- Composição da camada externa dos colmos (cortéx) com alta resistência à tração, devido à concentração dos feixes de fibras aumentar de dentro para fora. Esta propriedade é importante para aplicações que solicitem o elemento estrutural à flexão, por exemplo, vigas;

- A disposição longitudinal bem como o comprimento de suas fibras confere ao bambu resistências à tração e compressão consideráveis quando comparado a materiais de construção convencionais;

- Excelente relação “resistência a tração x peso específico”, sendo em média 4 vezes superior ao aço CA-50;

- Baixo consumo de energia para produção/transformação, face aos índices de produção de concreto e aço, por exemplo;

- O tempo entre o plantio e o aproveitamento para construção varia entre 3 e 5 anos, bastante inferior à maioria das madeiras. Além disso, o bambu não exige replantio por tratar-se de uma planta perene;

- Uma obra utilizando bambu como material prioritário é uma construção limpa, seca e cuja mão de obra utiliza ferramental leve e de fácil operação.

Alguns aspectos, no entanto, dificultam a disseminação do bambu como elemento estrutural na construção civil, sendo os principais:

- Variabilidade das propriedades mecânicas em função da espécie, idade, teor de umidade e parte do colmo utilizada;

- Vulnerabilidade do material perante exposição aos raios ultravioletas e principalmente à água, características que tornam essencial um projeto arquitetônico que contemple aspectos como beirais e isolamento dos pilares do solo;

- Sensibilidade ao ataque de organismos xilófagos, necessitando de tratamento antes da aplicação como elemento construtivo;

- Normatização específica regionalizada, conflitante ou ausente;

- Dificuldade na concepção de ligações entre as peças e demais elementos construtivos (fundações, telhas, etc) devido à geometria circular oca que dificulta a transmissão de esforços e disposição longitudinal das fibras que conferem baixa

resistência ao cisalhamento, tornando inviável a utilização, por exemplo, de ligação pregadas diretamente no bambu.

2.5.2 Construções em bambu e sustentabilidade

Os materiais de construção são, de modo geral, escolhidos através de critérios funcionais, técnicos e financeiros, porém nas últimas décadas o impacto ambiental destes materiais vem se tornando um importante critério para sua adoção e/ou restrição nas edificações (LUGT; DOBBELSTEEN; JANSSEN, 2005).

Ainda de forma mais abrangente, a sustentabilidade no âmbito da construção civil vai além da máxima “atender as necessidades das gerações presentes sem comprometer as gerações futuras”, de modo a buscar o ponto de equilíbrio entre o socialmente desejável, o economicamente viável e o ecologicamente sustentável, a chamada “*triple bottom line*” (PEREIRA, 2013).

Do ponto de vista da sustentabilidade ecológica o bambu possui características que o distinguem da maioria dos materiais de construção convencionais. Além do seu rápido crescimento, que permite que os colmos sejam colhidos 3 ou 4 anos após o plantio, o bambu atua como um excelente sequestrador de carbono da atmosfera. Pesquisas realizadas na China, de onde a espécie *Phyllostachys Pubescens* é nativa, mostraram que, em um período de 10 anos, a quantidade de carbono sequestrado por uma floresta de bambu Mosô variou entre 25 e 91 ton/ha, enquanto neste mesmo intervalo de tempo uma floresta da espécie Chinesa Fir (*Cunninghamia lanceolata*) removeu da atmosfera entre 17 e 48 ton/ha (INBAR, 2010).

O uso ainda bastante limitado do bambu na construção civil fornece poucos dados para o estudo de sua viabilidade econômica como material de construção. No entanto, um estudo realizado por pesquisadores holandeses buscou comparar, através de indicadores econômicos, estruturas feitas de bambu com outras concebidas com materiais de construção convencionais (madeira, aço e concreto). Comparando-se o custo de aquisição o bambu demonstrou ser a alternativa de menor custo, porém sua vida útil e custos com mão de obra especializada escassa, fizeram com que o aço fosse considerado, nesta pesquisa, ainda mais viável economicamente

como material estrutural. No entanto, comparado a madeiras utilizadas na construção o bambu mostrou-se bastante competitivo (LUGT; DOBBELSTEEN; JANSSEN, 2005).

2.6 NORMATIZAÇÃO EXISTENTE

As propriedades estruturais de algumas espécies de bambu apresentam grande potencial para atender às demandas nas construções contemporâneas. No entanto, a falta de normas e códigos de construção apropriados é uma barreira para que engenheiros e arquitetos possam adotar o bambu como elemento estrutural em seus projetos de maneira mais ostensiva (GATÓO *et al*, 2014). Apesar de existirem algumas normas que versam sobre a determinação de propriedades físicas e mecânicas dos colmos de bambu, ou até mesmo de princípios de projeto de estruturas, elas não propiciam fundamentos sólidos e essenciais para que se possa projetar e construir em bambu, assim como ocorre com a madeira (HARRIES, 2012).

Países que há tempos utilizam o bambu como elemento construtivo, ainda que de maneira tradicional e empírica, tais como China e Colômbia, vem se destacando nas pesquisas e conseqüentemente na elaboração de códigos de construção (obrigatoriedade de adoção) e normas (recomendações; adoção facultativa). Este fato, no entanto, origina documentos em sua maioria com validade local, contribuindo de maneira pouco significativa para a disseminação do bambu como material de construção em escala global. A tabela 1 mostra os códigos e normas atualmente vigentes.

Tabela 1 - Códigos e normas existentes sobre construção em bambu

País	Códigos	Normas
China		JG/T 1999: Testing method for physical and mechanical properties of bamboo used in building
Colômbia	Reglamento Colombiano de Construccion Sismoresistente – capitulo G12 Estructuras de Guadua	NTC 5407: Uniones de Estructuras con Guadua angustifolia Kunth
		NTC 5525: Métodos de Ensayo para Determinar las Propiedades Físicas y Mecanicas de la Guadua angustifolia Kunth
Equador	Norma Ecuatoriana de la Construccion – capitulo 17 Utilizacion de la Guadua angustifolia Kunth en la Construccion	INEN 42: Bamboo Caña Guadua
Índia	National Building Code of India, section 3 Timber and bamboo	IS 6874: Method of tests for round bamboos
		IS 15912: Structural design using bamboo – code of practice
Peru	Reglamento Nacional de Edificaciones, Section III. Code E100 – Diseño y Construccion con Bamboo	
International		ISO 22156:2004 - Bamboo structural design
		ISO 22157:2004 – Bamboo Determination of physical and mechanical properties

Fonte: Adaptado de GATÓO *et al* (2004)

2.7 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COLMOS

Na análise estrutural são determinados os esforços externos que agem sobre os elementos estruturais bem como os esforços internos, resultantes destes. A geometria dos elementos, sua deflexão e estabilidade dependem não somente dos esforços, mas também do material do qual são constituídos. Assim, é preciso compreender o comportamento do material sob a ação dos diversos tipos de esforços, bem como os fatores que influenciam este comportamento (HIBBELER, 2010).

Segundo DIXON e GIBSON (2014), embora classificada botanicamente como pertencente à família das gramíneas, o bambu apresenta algumas propriedades físicas e mecânicas similares a algumas madeiras usualmente empregadas na construção civil com finalidade estrutural.

A geometria tubular dos colmos, considerada de maneira ideal como simétrica, implica em momentos de inércia similares em relação aos eixos x e y, característica que favorece a aplicação como barra sujeita à compressão.

A orientação predominantemente longitudinal dos feixes fibrovasculares que compõe a camada intermediária da parede do colmo proporciona ao bambu elevada resistência à tração.

A resistência ao cisalhamento é uma importante propriedade dos colmos de bambu, uma vez que pode ser considerada seu ponto fraco (JANSSEN, 1981). A disposição paralela dos feixes de fibras, característica anatômica que confere aos colmos elevada resistência a solicitações axiais, é a mesma razão da baixa resistência ao cisalhamento, sendo que esta corresponde a cerca de 25% do valor da resistência à compressão longitudinal (YU, 2007).

. A estrutura tubular oca e segmentada, aliada a composição fibrovascular das paredes do colmo proporciona ao bambu grande resistência à flexão desde antes de sua colheita, quando ainda está sujeito aos esforços causados pelo vento, dada sua altura que no caso da espécie *Pyllostachys Pubescens* atinge cerca de 20 m (CAPELLO, 2006).

2.8 SISTEMAS DE LIGAÇÃO

A integridade de uma estrutura depende diretamente da eficiência das ligações entre os elementos que a constituem. Desta forma, até mesmo um material com propriedades mecânicas promissoras, como o bambu, pode ser subutilizado na ausência de um sistema que possibilite a correta transmissão dos esforços atuantes na estrutura (SOARES, 2013).

As características anatômicas que conferem ao bambu notáveis propriedades físicas e mecânicas e que, portanto, viabilizariam sua utilização como elemento estrutural, são ao mesmo tempo a causa do principal entrave à disseminação do uso do bambu na construção civil: a dificuldade em se conceber juntas entre os elementos e apoios. O desenvolvimento de sistemas de ligação eficazes tem sido um dos principais temas de pesquisa no âmbito da aplicação do bambu em estruturas (WIDYOWIJATNOKO, 2012). A madeira e o aço tornaram-se materiais de construção viáveis em larga escala apenas após a questão das ligações estar resolvida, e o bambu deve trilhar um caminho similar (JANSSEN, 2000).

Inicialmente a aplicação estrutural dos colmos de bambu ficou restrita a construções rurais e andaimes, principalmente no sudeste da Ásia e América do Sul. Em ambos os casos, as ligações entre os colmos eram realizadas com técnicas de amarração, principalmente com cordas de materiais naturais como cisal e ratan, dadas sua simplicidade e baixo custo. Entretanto, este sistema é pouco prático e confiável do ponto de vista normativo e até mesmo industrial (ALBERMANI, GOH, CHAN, 2007).

Com o passar do tempo estudos foram demonstrando as características físico-mecânicas dos bambus de diversas espécies, gerando maior interesse para o uso estrutural dos colmos. Ocorreu então o desenvolvimento de novos sistemas de ligação, buscando normatizar parâmetros para dimensionamento bem como propiciar a produção em série dos componentes de tais sistemas. Estas ligações incluem pinos de madeira, cabos de aço, chapas, conectores metálicos e parafusos (SOARES, 2013).

Segundo CAEIRO (2010), independente do sistema utilizado, a experiência adquirida ao longo do desenvolvimento destas novas formas de união entre os colmos mostrou que existem alguns princípios básicos a serem considerados, tais como:

- Executar as ligações próximas aos nós;
- Evitar carregamentos pontuais perpendiculares à região do internó;
- Evitar a fixação de elementos transversais ao colmo, sem furação prévia (devido ao cisalhamento);
- Adaptar as extremidades para melhor encaixe aumentando a área de contato, conforme figura 13.

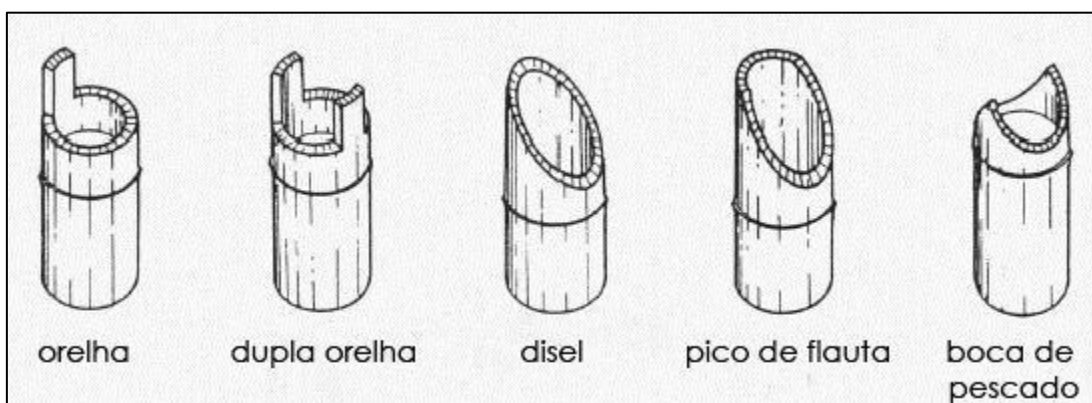


Figura 13 - Encaixes tradicionais para ligações

Fonte: Lopez, 2003

Para uma melhor aproximação a resolução das limitações dos sistemas existentes bem quando da proposta de novas soluções, JANSSEN (2000) propôs uma classificação dos tipos de ligação baseada na maneira como ocorrem as ligações, dividindo-as inicialmente em 8 grupos:

- Grupo A: contato total da seção transversal. Exemplo: encaixes;
- Grupo B: da parte interna para um elemento paralelo. Exemplo: preenchimento com argamassa e pino metálico; pinos de madeira parcialmente inseridos no colmo;
- Grupo C: da parte interna para um elemento perpendicular;
- Grupo D: da seção transversal para um elemento paralelo. Exemplo: elementos do tipo abraçadeira;
- Grupo E: da seção transversal para um elemento perpendicular. Exemplo: ligações parafusadas;

- Grupo F: da parte externa para um elemento paralelo. Exemplo: variações das amarrações tradicionais, utilizando outros materiais e técnicas;
- Grupo G: da parte externa para um elemento perpendicular;
- Grupo H: ligações para bambu utilizado em tiras ou ripas.

Embora os grupos C e G possuam algum significado teórico, não encontram aplicabilidade prática. Já o grupo H não se aplica à construção com colmos inteiros (SOARES, 2013).

WIDYOWIJATNOKO (2012) partindo destes grupos, propôs um outro sistema de classificação para as ligações, baseado nos seguintes princípios:

- Modo de transferência dos esforços: compressão, tração ou atrito;
- Localização do conector: interior ou exterior do colmo, paralelo ou perpendicular às fibras;

Esta classificação resultou em 6 grupos, a saber:

- Grupo 1: A força é transferida por compressão resultante do contato da seção transversal;
- Grupo 2: A força é transferida por atrito à superfície interna do colmo;
- Grupo 3: A força é transferida por atrito à superfície externa do colmo;
- Grupo 4: A força é transferida por cisalhamento à parede do colmo por elementos perpendiculares às fibras fixados internamente (4A) ou externamente (4B);
- Grupo 5: A força é transferida perpendicularmente às fibras;
- Grupo 6: A força é transferida por compressão radial para o centro do colmo, através de cisalhamento e tensões perpendiculares às fibras.

Este sistema de abordagem da ligação conforme a transferência de esforços do bambu para o conector ou para outro colmo, ao invés da forma da ligação, possibilita um melhor enquadramento dos sistemas de ligação existentes em um ou mais grupos, bem como auxilia no desenvolvimento de novos sistemas de ligação,

uma vez que percebendo-se os princípios envolvidos é possível aprimorar ligações existentes ou inovar baseando-se nestes princípios associados às propriedades físico-mecânicas do bambu, aproveitando melhor o potencial oferecido pelo material (SOARES, 2013).

2.8.1 Grupo 1: Transferência por compressão da seção transversal

Este grupo é considerado o mais eficiente na transmissão de esforços de compressão e utilizado isoladamente ou em conjunto com outros grupos. Pode-se optar em utilizar cola na seção transversal para auxiliar na fixação dos elementos, porém sem levar em consideração qualquer acréscimo à resistência. Muitas vezes, para ligação de colunas com elementos de fundação - uma das principais aplicações deste grupo - é utilizada uma barra de aço fixada ao bloco juntamente com a injeção de argamassa no internó inferior, servindo apenas como artifício para fixação da posição do pilar. Geralmente, de modo a aumentar a superfície de contato, é feita a adaptação da extremidade do colmo, sendo o encaixe mais popular a “boca de pescado”, conforme figura 14 (WIDYOWIJATNOKO, 2012).



Figura 14 - Exemplo de ligações utilizando princípio do grupo 1

Fonte: WIDYOWIJATNOKO, 2012

2.8.2 Grupo 2: Transferência por atrito à superfície interna do colmo

Uma vez que o bambu é naturalmente oco, as ligações baseadas no princípio deste grupo aproveitam esta característica para inserir elementos conectores, tais como pinos em madeira ou tubos metálicos. Alguns projetistas trabalham ainda com a injeção de argamassa ou resina para posterior fixação de barras rosqueáveis (WIDYOWIJATNOKO, 2012) (PADOVAN, 2010).

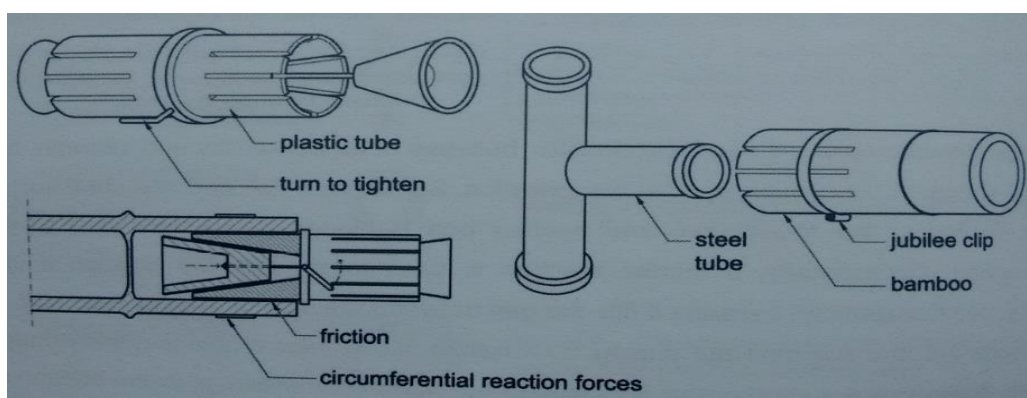


Figura 15 - Esquemas de ligação grupo 2

Fonte: WIDYOWIJATNOKO , 2012

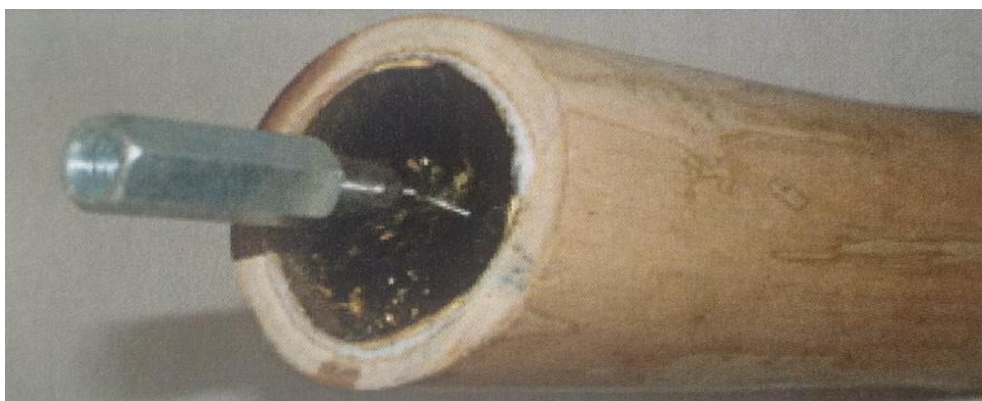


Figura 16 - Ligação com barra rosqueável fixada com resina

Fonte: WIDYOWIJATNOKO ,2012

2.8.3 Grupo 3: Transferência por atrito à superfície externa do colmo

O bambu possui seção transversal circular, camada externa com grande dureza e a concentração dos feixes de fibras aumenta do interior para o exterior (LIESE, 1998). As ligações deste grupo apoiam-se nestas características, uma vez que esta maior concentração de fibras torna esta região do colmo mais “competente” para transmissão dos esforços (SOARES,2013). A ligação por meio de cordas, amplamente utilizada nos primórdios das construções com bambu ou ainda para estruturas temporárias, é a principal representante deste grupo. A geometria circular possibilita a distribuição igualitária das tensões no colmo, o que não ocorreria no caso de uma seção prismática, devido à concentração de tensões nos cantos (WIDYOWIJATNOKO, 2012).

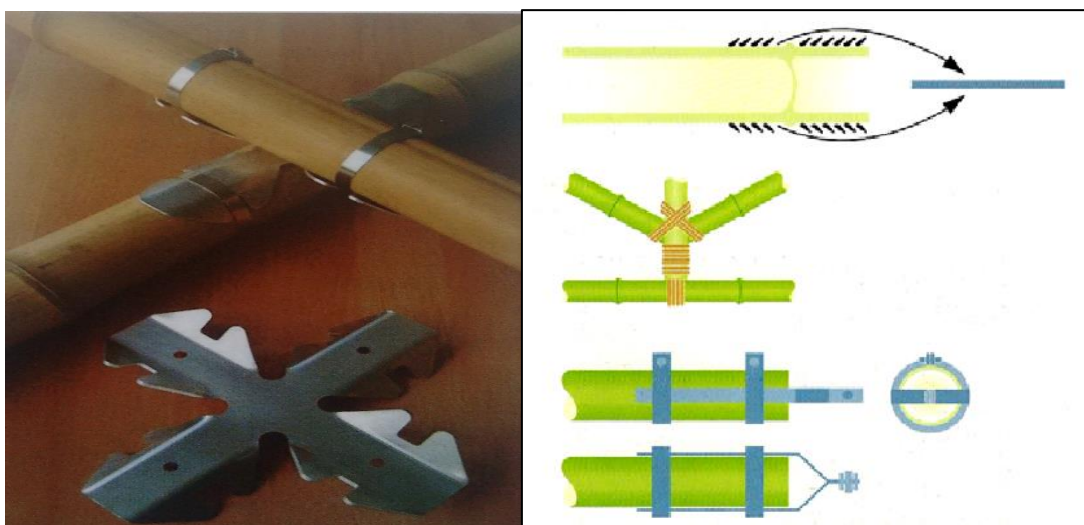


Figura 17 - Exemplos de conexões do grupo 3

Fonte: PADOVAN,2012

Na direção oposta ao modo manual e empírico de execução das ligações amarradas, ALBERMANI, GOH e CHAN (2007) propuseram um sistema baseado no grupo 3, passível de industrialização e que permite a aplicação em estruturas planas e espaciais. Foram utilizados conectores ajustáveis em PVC envolvendo parte da extremidade dos colmos e posteriormente travados com parafusos junto a esperas também confeccionadas em PVC.



Figura 18 - Protótipo de estrutura espacial com ligação em PVC

Fonte: ALBERMANI, GOH e CHAN, 2007

2.8.4 Grupo 4: Transferência por cisalhamento à parede do colmo por elementos perpendiculares às fibras fixados internamente (4A) ou externamente (4B)

Neste grupo as forças são transferidas através de um elemento, geralmente metálico, que fura o colmo perpendicularmente às fibras, sendo fixado no interior (4A) ou exterior (4B) do mesmo. Estes elementos induzem esforços cisalhantes na parede do colmo, e como o bambu possui baixa resistência ao cisalhamento este torna-se um ponto frágil de estrutura, devendo ser tomadas medidas para atenuar este fato, tais como execução inserção dos elementos próximos aos nós e/ou presença de pelo menos um nó entre o elemento e a extremidade. Outra medida é adotar barras ou parafusos de grandes diâmetros, de modo a aumentar a área de contato com a parede. Do ponto de vista estético o sistema 4A é preferível uma vez que a ligação fica com aspecto visual mais agradável (SOARES, 2013).



Figura 19 - Ligação proposta por Shoei Yoh (Grupo 4B)

Fonte: Obermann e Laude, 2004

2.8.5 Grupo 5: Transferência perpendicularmente às fibras

Este tipo de transmissão ocorre quando um colmo se apoia em outro, como em uma ligação em “T” (figura 20) ou em uma grelha de vigas (figura 21), induzindo flexão no colmo que atua como elemento de suporte. Deve-se procurar efetuar este tipo de ligação próximos aos nós, devido ao incremento de rigidez neste local causado pelo diafragma. Atenção especial deve ser dada à área de contato entre os colmos, procurando maximizá-la, pois caso a área seja muito pequena ($A \sim 0$) a tensão tende a atingir valores altos. Na ligação “T” a área de contato é aumentada pela confecção de encaixe do tipo “boca de pescada” (WIDYOWIJATNOKO, 2012).



Figura 20 - Ligação em "T"

Fonte: Autoria própria



Figura 21 - Grelha de vigas com transmissão perpendicular de forças

Fonte: WIDYOWIJATNOKO, 2012

2.8.6 Grupo 6: Transferência por compressão radial para o centro do colmo, cisalhamento e tensões perpendiculares às fibras

WIDYOWIJATNOKO (2012) criou este grupo durante o desenvolvimento de um novo tipo de ligação, baseando-se em algumas características das ligações amarradas, porém utilizando cabos de aço em vez de cordas. Ao apertar o cabo ao redor do colmo induz-se forças radiais perpendiculares às fibras. Este aperto é um trabalho temporário que aumenta o esforço normal. Uma vez que o atrito é igual a um coeficiente de atrito multiplicado pelo esforço normal, o aumento do esforço normal faz com que aumente o atrito. Assim, quando o aperto cessa, uma força normal permanece enquanto a tensão interna do cabo é mantida.

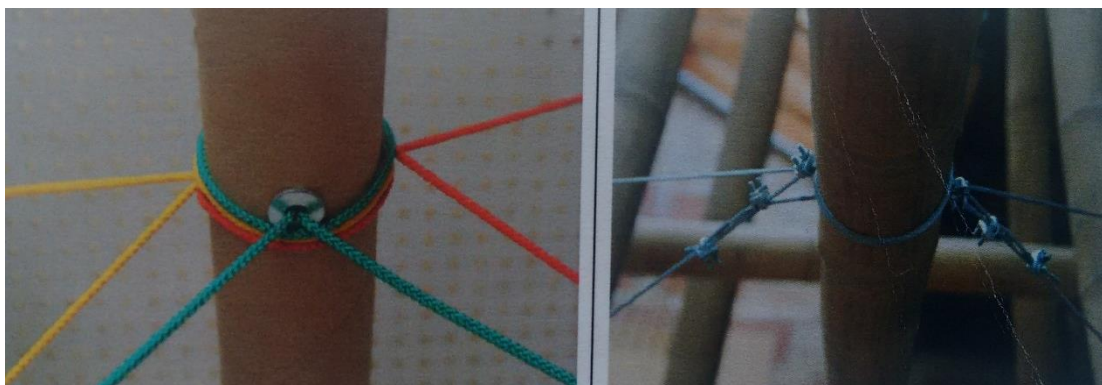


Figura 22 - Ligação grupo 6

Fonte: WIDYOWIJATNOKO, 2012

2.9 TRELIÇAS

Materiais naturais são notadamente eficientes, pois atendem satisfatoriamente as complexas imposições da natureza aos seres vivos, fazendo isto com o mínimo de material possível. A maior parte dos materiais naturais é intrinsicamente sustentável, reciclável e quando necessário seu descarte, biodegradável (KRAUSE, 2009).

A treliça é um elemento estrutural composto por um arranjo estável de barras que formam padrões triangulares, interligados de forma que, idealmente, sob carregamento, estas barras sejam solicitadas apenas axialmente (tração ou compressão). Atendendo-se as particularidades de carregamento de uma treliça (carregamento nodal), este elemento estrutural tende a ser bastante eficiente para vencer grandes vãos com menor peso próprio e seções transversais relativamente pequenas (LEET, UANG e GILBERT, 2009).

Uma vez que o bambu possui a geometria de barra com seção tubular, baixo peso próprio e elevada resistência à tração e compressão paralela às fibras ele torna-se um material apropriado para confecção de treliças, planas ou espaciais (FABIANI,2014).

Desta forma, o aproveitamento do grande potencial destas características depende diretamente de sistemas de ligações entre os colmos bem como com os apoios, que garanta que a transmissão dos esforços ocorra de maneira eficiente, evitando assim que o material bambu seja subutilizado.

Segundo Padovan (2010), as dificuldades para se efetuar ligações decorrentes das características anatômicas dos colmos de bambu não constituem grande obstáculo nas construções vernaculares, haja visto que estas geralmente são edificações térreas cujas cargas principais são oriundas do peso próprio da estrutura e elementos de cobertura e fechamento que originam solicitações relativamente baixas. Já em construções mais modernas, devido à ocorrência de carregamentos de maior magnitude, maiores vãos, interface com materiais de construção convencionais e maior exigência em aspectos de acabamento e durabilidade, as conexões são elementos primordiais para a estabilidade estrutural.

3. METODOLOGIA

3.1 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS COLMOS

Baseado nas metodologias de ensaio dispostas na ISO 22157:2004, foram conduzidos ensaios para a determinação de propriedades físicas e mecânicas de exemplares de bambu Mosô (*Phyllostachys Pubescens*), espécie nativa da China, porém bem adaptada ao clima brasileiro e que apresenta colmos retilíneos bem como diâmetros usuais em construções em bambu (entre 8 e 15 cm). Estes ensaios, em um total de 5, possibilitaram a obtenção da resistência à compressão axial, módulo de elasticidade, massa específica, teor de umidade, resistência à tração, resistência ao cisalhamento e resistência à flexão. O rompimento das amostras foi realizado em uma máquina universal para ensaios, marca EMIC, modelo DL 30000 monitorada pelo software aquisitor de dados TESC.

Todos os exemplares de bambu Mosô utilizados na confecção de corpos de prova são provenientes de uma fazenda localizada no município de Wenceslau Braz-PR e tratados pelo método de imersão.

3.1.1 Ensaio nº 1 – Compressão axial, módulo de elasticidade

Por tratar-se de um material utilizado em seu estado natural, o bambu pode apresentar algumas variações nas suas propriedades físico-mecânicas decorrentes de fatores como: idade do colmo, presença/ausência de nó, região do colmo (base, meio ou topo). Oka et al (2014) concluíram que para a resistência à compressão a posição no colmo é relevante, aumentando da base para o topo. No mesmo estudo, observa-se que para esta propriedade a presença ou ausência de nó possui baixa significância.

Foram confeccionados 12 corpos de prova, sendo 4 de cada região do colmo, todos provenientes do internó e com altura igual ao diâmetro externo (figura 23). A área da seção transversal de cada corpo de prova foi obtida conforme a equação (1).

$$A = \frac{\pi}{4} * [D^2 - (D - 2t)^2] \quad (1)$$

Onde:

A é a área da seção transversal, em mm²;

D é o diâmetro externo do corpo de prova, em mm, resultante da média de duas medidas diametralmente opostas;

t é a espessura da parede do colmo, em mm, resultante da média de quatro medidas tomadas nos pontos de obtenção do diâmetro.



Figura 23 - Corpo de prova para ensaio nº1

Fonte: Autoria própria

De modo a diminuir a interferência do atrito nos resultados obtidos para a resistência à compressão, introduziu-se chapas com espessura de 2mm de politetrafluoretileno – PTFE, comercialmente conhecido como *teflon*, entre o corpo de prova e a interface da máquina de ensaios, em ambas extremidades (figura 24).

Para medição das deformações e posterior determinação do módulo de elasticidade longitudinal, fixou-se dois *strain gauges* diametralmente opostos em cada corpo de prova. Foram utilizados *strain gauges* da marca Omega, modelo: KFH-10-120-C1-11L3M3R, com resistência de 121,2 Ω +/- 0,35% e *gage factor* de 2.06 +/- 1.0%. Estes sensores foram conectados a um aquisitor de dados da marca LYNX, modelo AD52000, equipado com o software AQDados.

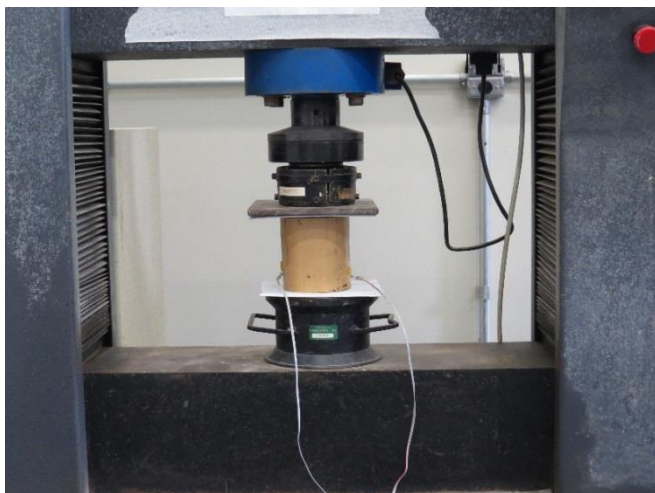


Figura 24 - Realização do ensaio nº1

Fonte: Autoria própria

Foram registrados as deformações e o carregamento até a ruptura do corpo de prova. A carga aplicada no momento da ruptura foi utilizada para obtenção da máxima tensão de compressão, conforme equação (2).

$$\sigma_C = \frac{F_{ult}}{A} \quad (2)$$

Onde:

σ_C é a máxima tensão de compressão, em MPa;

F_{ult} é a carga aplicada no momento da ruptura do corpo de prova, em N;

A é a área da seção transversal, em mm².

O módulo de elasticidade longitudinal foi obtido por meio da relação linear entre tensão e deformação (média dos valores obtidos com os strain gauges diametralmente opostos) no trecho compreendido entre 20% e 80% da força de ruptura, conforme equação (3).

$$E = \frac{\sigma_{80\%} - \sigma_{20\%}}{\varepsilon_{80\%} - \varepsilon_{20\%}} * 1000 \quad (3)$$

Onde:

E é o módulo de elasticidade longitudinal ou módulo de Young, em GPa;

$\sigma_{80\%}$ é a tensão no instante referente a 80% da força de ruptura, em MPa;

$\sigma_{20\%}$ é a tensão no instante referente a 20% da força de ruptura, em MPa;

$\varepsilon_{80\%}$ é a deformação no instante referente a 80% da força de ruptura;

$\varepsilon_{20\%}$ é a deformação no instante referente a 20% da força de ruptura.

3.1.2 Ensaio nº2: Peso próprio e teor de umidade

Após a ruptura dos corpos de prova do ensaio nº1 foram extraídas amostras com dimensões 25x25mm e espessura igual à da parede do colmo (figura 25). Em seguida estas amostras foram pesadas em balança digital com precisão de 0,01g e secas em um forno com temperatura média de 103°C durante 48 horas, sendo novamente pesadas após a secagem.



Figura 25 - Corpos de prova para o ensaio nº2

Fonte: Autoria própria

Desta forma obteve-se o teor de umidade conforme equação (4) e o peso próprio por meio da equação (5).

$$h = \frac{m - m_0}{m_0} * 100 \quad (4)$$

Onde:

h é o teor de umidade, em %;

m é a massa antes do processo de secagem, em g;

m_0 é a massa após do processo de secagem, em g.

$$\rho = \frac{m}{V} * 10^6 \quad (5)$$

Onde:

ρ é a massa específica, em kg/m³;

m é a massa, em g, após o processo de secagem;

V é o volume da amostra, em mm³.

3.1.3 Ensaio nº 3 – Tração

A presença de um nó na região de estreitamento/ruptura, segundo ARCE (1993) e SHAO *et al* (2010), diminui a resistência à tração em aproximadamente 30%, quando comparada à região do internó, provavelmente devido à descontinuidade dos tecidos fibrovasculares ao cruzar o nó dos colmos.

Desta forma, a ISO 22157-1:2004 orienta que os corpos de prova para ensaios de resistência à tração possuam um nó na região de ruptura, de modo que a resistência obtida reflita o caso mais crítico. Foram confeccionados 12 corpos de prova com espessura igual à da parede do colmo e demais medidas conforme figura 26:

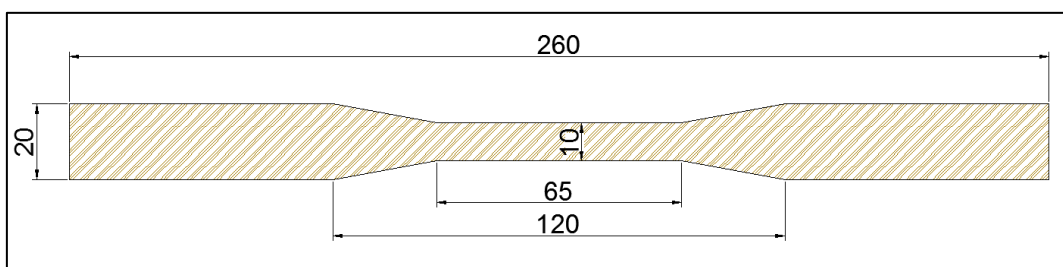


Figura 26 - Dimensões, em mm, do corpo de prova do ensaio nº3

Fonte: Autoria própria

Para este ensaio uma modificação foi feita em relação ao disposto em norma: a velocidade de aplicação da carga de tração foi alterada de 0,01 mm/s para 0,1 mm/s, de modo a garantir a aderência entre o corpo de prova e as garras da máquina, o que não ocorreu quando utilizada a velocidade originalmente sugerida. A carga aplicada no momento da ruptura do corpo de prova foi utilizada para obtenção da máxima tensão de tração, conforme equação (6).

$$\sigma_T = \frac{F_{ult}}{A} \quad (6)$$

Onde:

σ_T é a máxima tensão de tração, em MPa;

F_{ult} é a carga aplicada no momento da ruptura do corpo de prova, em N;

A é área da seção transversal da região de estreitamento, em mm².



Figura 27 - Realização do ensaio nº3

Fonte: Autoria própria

3.1.4 Ensaio nº 4 – Cisalhamento

Para realização deste ensaio foram confeccionados 12 corpos de prova com dimensões similares aos utilizados no ensaio nº1 (altura igual ao diâmetro externo), sendo 6 da região do internó e 6 com a presença de um nó intermediário, de modo a verificar a influência de tal característica na resistência ao cisalhamento.

De modo a induzir o esforço cisalhante, foram confeccionadas duas peças metálicas, conforme características e dimensões constantes na figura 28, posicionadas em ambas extremidades do corpo de prova durante o ensaio, criando assim quatro planos de cisalhamento (figura 29). Nos pontos de contato entre as peças e o corpo de prova foram tomadas as medidas da altura do corpo de prova e da espessura da parede do colmo.

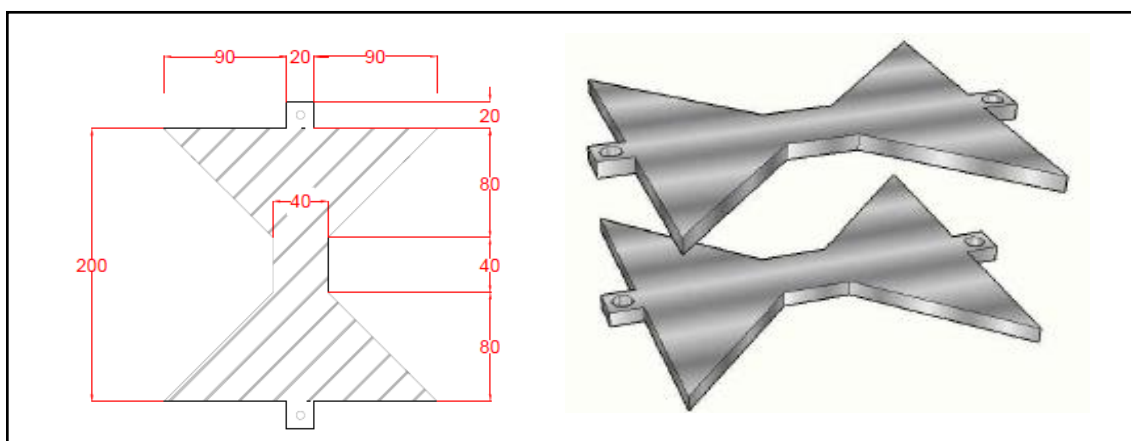


Figura 28 - Acessórios para realização do ensaio nº4

Fonte: Autoria própria



Figura 29 - Ensaio nº4: planos de cisalhamento

Fonte: Autoria própria

Os ensaios foram conduzidos até a ruptura do corpo de prova, sendo que o carregamento neste momento foi utilizado para determinação da resistência ao cisalhamento, conforme equação (7).

$$\tau_{ult} = \frac{F_{ult}}{\Sigma(t*L)} \quad (7)$$

Onde:

τ_{ult} é a máxima tensão de cisalhamento, em MPa;

F_{ult} é a carga aplicada no momento da ruptura do corpo de prova, em N;

t é a espessura do colmo, em mm;

L é a altura do corpo de prova, em mm;

$\Sigma(t * L)$ é soma dos quatro produtos “t” e “L”, em mm².

3.1.5 Ensaio nº5 – Flexão

A ISO 22157-2:2004 estabelece procedimentos para obtenção da resistência à flexão de colmos inteiros através de um ensaio de flexão à quatro pontos, conforme esquema demonstrado na figura 30.

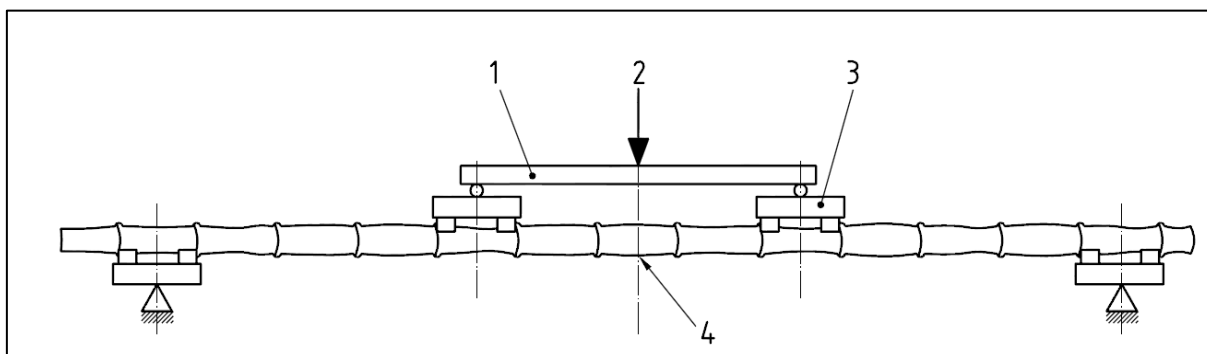


Figura 30 - Esquema para execução do ensaio nº5

Fonte: 22157-2:2004

Para o preparo dos corpos de prova é necessária a determinação de um vão livre mínimo, de modo a evitar a falha por esforços transversais. Se o vão for curto demais o colmo se comporta como um arco, ocultando assim o real valor da resistência à flexão do mesmo (VAESSEN e JANSSEN, 1997). O comprimento mínimo do vão é determinado pela equação (8):

$$L = \left(\frac{1,76 * \varepsilon_{ult} * E_R * R}{\tau_{ult}} \right) \quad (8)$$

Onde:

L é o comprimento do vão livre, em mm;

ε_{ult} é a máxima deformação longitudinal para o bambu;

E_R é o módulo de elasticidade da camada externa do colmo;

R é o raio externo, em mm;

τ_{ult} é máxima tensão tangencial.

Como os valores para ε_{ult} e τ_{ult} eram desconhecidos, foram utilizados, respectivamente 0,0032 e 2,6 N/mm², conforme recomendado na ISO 22157-2: 2004.

Para E_R foi utilizado 1,5 vezes o valor do módulo de elasticidade obtido no ensaio nº1. Já para R foram realizadas medições individuais em cada colmo ensaiado. Antes da realização dos ensaios foi ainda determinado o momento de inércia de cada um dos colmos.

Uma vez obtidos os valores dos vãos livres mínimos e dos momentos de inércia, os colmos foram posicionados sobre e sob apoios côncavos confeccionados em madeira, de modo a adequar sua geometria cilíndrica (figura 31). Os corpos de prova foram então carregados até a ruptura.

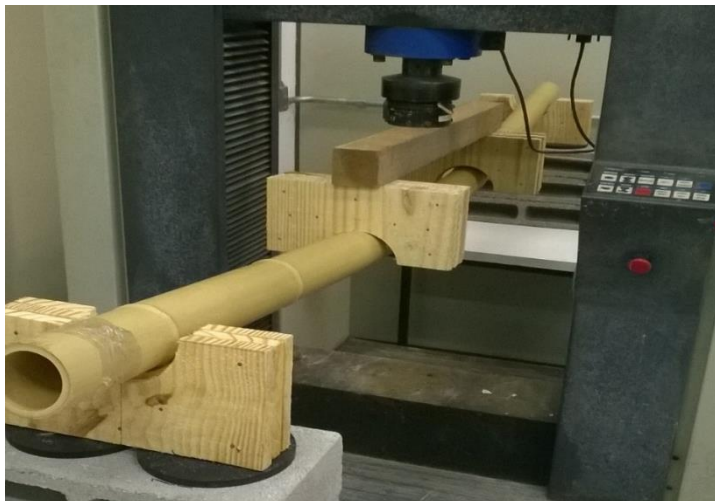


Figura 31 - Realização do ensaio nº5

Fonte: Autoria própria

A máxima resistência à flexão foi então obtida através da equação (9):

$$\sigma_{ult} = F * L * \frac{D/2}{6} * I_B \quad (9)$$

Onde:

F é a carga máxima aplicada, em N (carga total aplicada nos dois pontos);

L é o vão livre, em mm;

D é o diâmetro externo do colmo, em mm;

I_B é o momento de inércia da seção, em mm⁴.

3.2 CONFECÇÃO DAS TRELIÇAS

De modo a verificar a influência do sistema de ligação no desempenho estrutural de treliças, foram analisados 03 diferentes tipos de ligação, explorando diferentes formas de transmissão de esforços, sendo 03 modelos experimentais para ensaios de cada tipologia, totalizando assim 09 treliças construídas com bambu mosô (*Phyllostachys Pubescens*).

O modelo desenvolvido para os ensaios consistiu em uma treliça plana, bi apoiada, com vão livre de 2 metros, com a aplicação de um carregamento concentrado no nó superior. De acordo com o valor médio obtido para resistência à compressão, resistência à tração, média da área da seção transversal dos colmos utilizados na confecção, módulo de elasticidade longitudinal, bem como admitindo-se comportamento ideal das ligações (rótulas), o colapso da estrutura ocorreria, teoricamente, com o rompimento das diagonais submetidas à esforços de compressão, enquanto o banzo inferior, sujeito à tração, permaneceria intacto e o montante central atuaria como barra “zero”. Para melhor aproximação do modelo teórico das características de cada tipo de ligação, dois diferentes modelos estruturais foram considerados, conforme figuras 32 e 33.

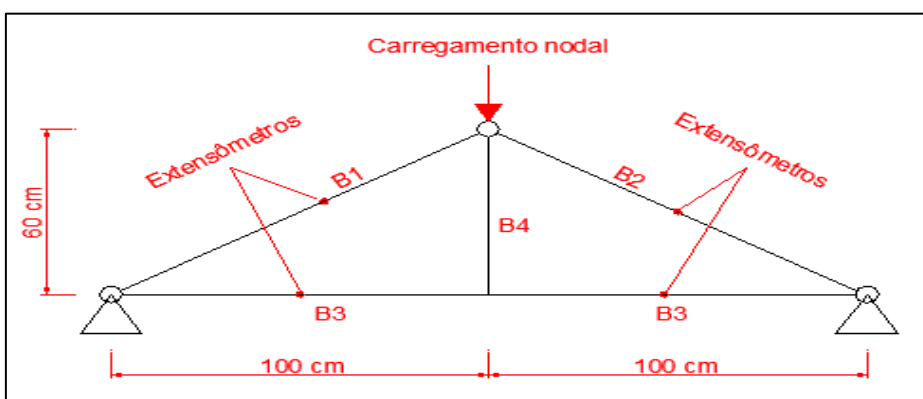


Figura 32 - Modelo estrutural treliça tipos 1 e 2

Fonte: Autoria própria

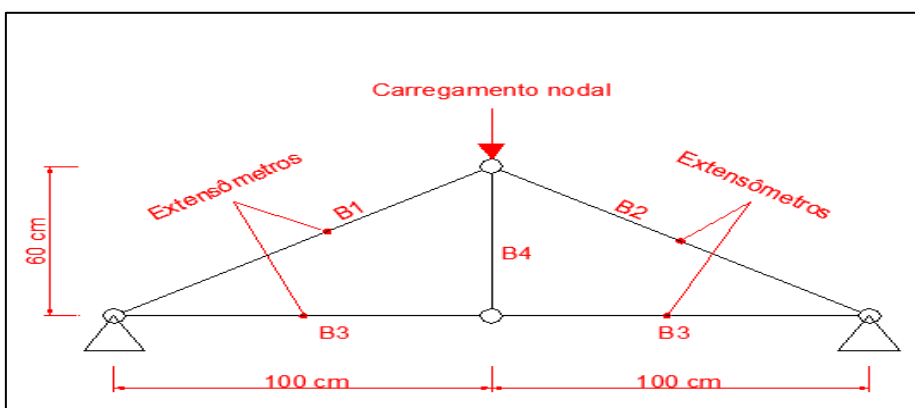


Figura 33 - Modelo estrutural treliça tipo 3

Fonte: Autoria própria

3.2.1 Treliça tipo 1 – Ligação com barra rosqueável

O primeiro modelo de ligação utilizado foi baseado em uma adaptação de uma tipologia bastante difundida pelo arquiteto colombiano Simon Velez. Este sistema de ligação consiste no uso de barras rosqueáveis que unem dois ou mais colmos, geralmente transpassadas próximas à região do nó do colmo. Geralmente o entrenó desta união é preenchido com concreto, visando um incremento na capacidade da ligação em resistir a esforços de cisalhamento, esmagamento ou fendilhamento oriundos da introdução dos parafusos (CUSACK,1999).

Ainda que conhecida a baixa resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (10 MPa), na montagem das treliças do tipo 1 optou-se pela não utilização do preenchimento dos entrenós com concreto. Desta forma, a transmissão dos esforços ocorreu pelo contato entre os colmos proporcionados por encaixes nas extremidades dos colmos e pelas barras rosqueáveis com diâmetro 3/8" transpassadas transversalmente às seções. As barras utilizadas foram confeccionadas em aço SAE 1010, com $E=145$ GPa, $f_y=180$ MPa e $f_u=325$ MPa. As características desta ligação, segundo proposto por Widyowijatnoko (2012), a enquadram nos grupos 1 e 4B, respectivamente.



Figura 34 - Execução de ligação conhecida como “T” colombiano

Fonte: Autoria própria



Figura 35 - Ligação entre o banzo inferior e montante central

Fonte: Autoria própria

A opção em não utilizar medidas auxiliares no combate ao cisalhamento, tais como preenchimento do internó ou aumento do diâmetro da barra rosqueável, se deu em função da possibilidade de verificar o desempenho da estrutura sem tais artifícios, para poder compará-lo, futuramente, a resultados obtidos em estruturas que utilizem tais medidas.

3.2.2 Treliça tipo 2 – Ligação com barra rosqueável e fibra de vidro

Nesta ligação foi adotada a mesma tipologia utilizada na treliça tipo 1, acrescida de um reforço com um compósito de fibra de vidro e resina polimérica envolvendo a região da ligação. Moré (2003) demonstrou que a utilização de compósito de fibra de vidro com resina a base de epóxi nas ligações em treliças proporcionou significativo aumento na resistência à tração nos colmos e na resistência ao cisalhamento na região da furação para transpasse das barras rosqueáveis, além de conferir maior rigidez na estrutura como um todo.

O acréscimo deste compósito, disposto de modo a formar três camadas em cada ligação, possibilitou uma maneira adicional de transmissão dos esforços, aquela que ocorre por atrito na camada externa do colmo, ou grupo 3, segundo a classificação de Widyowijatnoko (2012).

A utilização de compósitos à base de fibra de vidro e resinas poliméricas tem sido objeto de estudo no reforço de elementos estruturais em madeira, de modo a agregar tecnologia às construções, ampliando assim as possibilidades de utilização desta metodologia construtiva. Um estudo conduzido por pesquisadores do Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras – LaMEM da Escola de Engenharia de São Carlos – EESC-USP comparou a utilização de compósitos utilizando fibra de vidro e fibra de carbono, associados a resinas poliméricas, no reforço de vigas de madeira. Observou-se que o uso de três camadas de fibra de vidro obteve desempenho similar ao de uma camada de fibra de carbono, esta última de custo mais elevado. O aumento da rigidez dos elementos estruturais reforçados é diretamente proporcional ao número de camadas utilizadas no reforço, sendo necessária, então, uma análise da viabilidade econômica do uso destes compósitos conforme a estrutura em questão (LaMEM, 2002).



Figura 36 - Treliza com reforço de fibra de vidro na região da ligação

Fonte: Autoria própria

3.2.3 Treliça tipo 3 – Ligação com pinos de madeira inseridos no colmo

A confecção desta treliça utilizou o sistema de ligação proposto por Arce (1993), o qual consiste basicamente na inserção de pinos de madeira nas extremidades dos colmos e na ligação destes pinos entre si, através de técnicas convencionais aplicáveis a estruturas de madeira. Esta técnica apresenta algumas vantagens, como a não inserção de parafusos e o aumento da seção transversal decorrente da presença do pino de madeira na cavidade do internó, o que auxilia no combate ao colapso por cisalhamento e esmagamento, respectivamente.

Uma vez que o bambu possui geometria cônica e a confecção dos pinos de madeira, em escala, deve seguir um diâmetro uniforme e preestabelecido, para a correta adaptação do pino ao colmo se faz necessário a utilização de cortes longitudinais na extremidade do bambu, de modo a possibilitar a adequação do diâmetro interno do colmo ao diâmetro do pino.

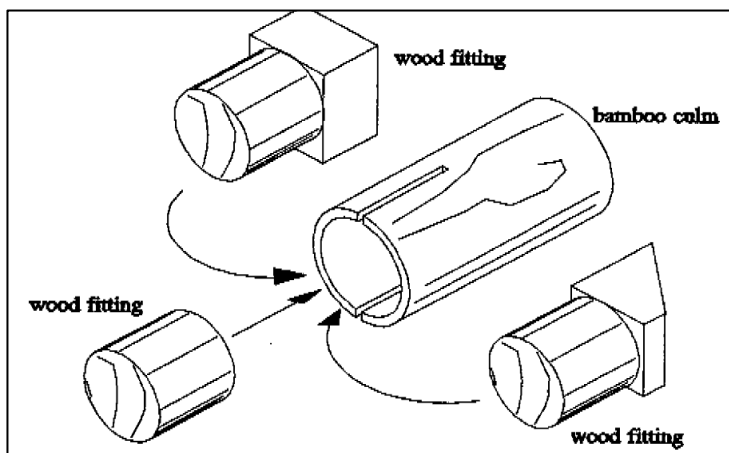


Figura 37 - Adequação entre o colmo e pino de madeira

Fonte: Arce, 1993

Como essa ligação, de acordo com o sistema proposto por Widyowijatnoko (2012), enquadra-se no grupo 2 – transferência de esforços por atrito à superfície interna do colmo – algumas medidas foram tomadas de modo a garantir o atrito entre a parede interna do colmo e a superfície do pino de madeira. Para tal, utilizou-se cola especial para madeira em toda a superfície do pino, além de um reforço com braçadeiras metálicas fixadas ao redor da extremidade de colmo.



Figura 38 - Pinos de madeira com cola e braçadeira metálica

Fonte: Autoria própria

Os pinos utilizados foram confeccionados em madeira da espécie *pinus elliottii* ($f_{co}=31,5 \text{ Mpa}$; $E=8846 \text{ MPa}$), os quais após inseridos nos colmos foram conectados entre si com o emprego de chapas metálicas com espessura de 3 mm e parafusos com diâmetro 3/8". Esta tipologia de ligação utilizou quatro parafusos por pino de madeira (dois em cada face) como parâmetro inicial.

Para o uso desta metodologia de ligação foi necessário dividir o banzo inferior em duas barras, diferentemente dos outros dois modelos de treliças nos quais este elemento era constituído por um único colmo.



Figura 39 - Treliça tipo 3 finalizada

Fonte: Autoria própria

3.3 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS COM AS TRELIÇAS

Foram realizados nove ensaios, destrutivos, sendo três ensaios com cada tipo de ligação. As treliças foram posicionadas no interior de um pórtico de reação metálico fechado, com apoios metálicos rotulados e carga aplicada no nó superior, de modo a simular as condições propostas pelos modelos estruturais adotados.

Nas diagonais e no banzo inferior foram acoplados extensômetros de modo a medir a deformação nas barras desde o início do carregamento até o momento do colapso. Os extensômetros, bem como a célula de carga foram ligados à um aquisitor de dados modelo da marca LYNX, modelo AD52000, equipado com o software AQDados.

Inicialmente foi posicionado um relógio comparador para registro da deflexão vertical máxima no meio do vão, uma vez que o valor esperado, segundo o modelo teórico, era da ordem de 15 mm. No entanto, após o primeiro ensaio verificou-se que a deflexão ocorrida foi superior ao curso total do instrumento, sendo então as medidas tomadas com auxílio de uma trena eletrônica.



Figura 40 - Treliça preparada para início do ensaio

Fonte: Autoria própria

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

A tabela 2 apresenta os valores obtidos para a máxima tensão de compressão e o gráfico 1 mostra a curva tensão x deformação típica de compressão dos corpos de prova ensaiados.

Tabela 2 - Resultados ensaio nº 1

<i>CP</i>	<i>A (mm²)</i>	<i>F_{ult} (kN)</i>	<i>σ_c (Mpa)</i>	<i>E (GPa)</i>
1	3549	145,6	41,0	9,20
2	3683	138,3	37,6	8,20
3	4202	153,1	36,4	8,30
4	3142	141,9	45,2	8,80
5	2847	137,5	48,3	9,80
6	2774	132,5	47,8	8,70
7	3024	135,1	44,7	9,50
8	3348	143,4	42,8	9,30
9	3386	135,8	40,1	9,60
10	2772	99,3	35,8	10,00
11	2623	99,7	38,0	9,30
12	2621	96,9	37,0	8,40
<i>Média</i>	3164	129,9	41	9
<i>Desvio Padrão</i>	485,5	19,6	4,5	0,6

Fonte: Autoria própria

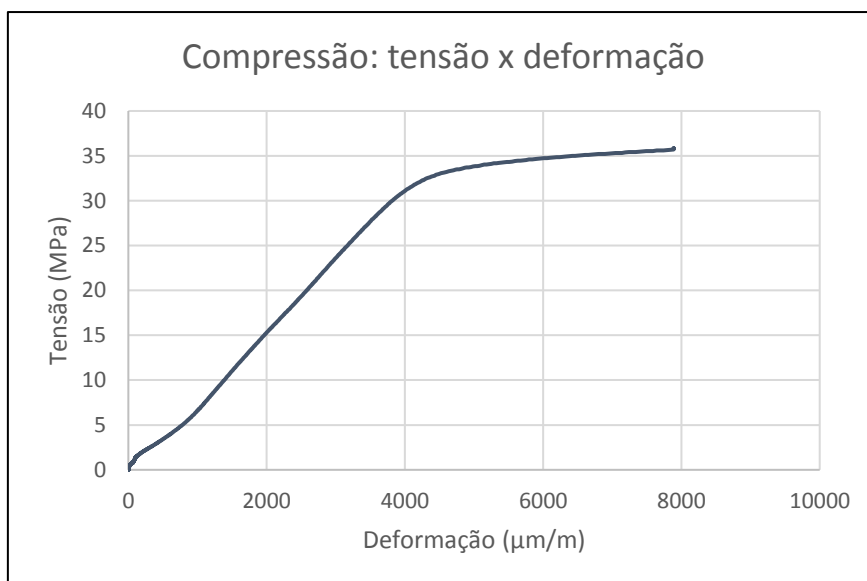


Gráfico 1 - Curva tensão x deformação típica: Compressão

Fonte: Autoria própria

A tabela 3 compara as propriedades de algumas madeiras brasileiras, conforme IPT (2015), com os resultados obtidos nos ensaios com os corpos de prova de bambu Mosô, evidenciando a semelhança dos valores de suas resistências à compressão, bem como a ordem de grandeza dos módulos de elasticidade longitudinal.

Tabela 3 - Propriedades do bambu Mosô com madeiras brasileiras

Material	Resistência à compressão – σ_c (MPa)	Módulo de elasticidade – E (GPa)
Bambu Mosô (Phyllostachys Pubescens)	41	9,0
Eucalipto Saligna (Eucalyptus saligna Sm)	49,2	13,2
Angelim Pedra (Hymenolobium petraeum Ducke)	52,3	11,5
Itaúba (Mezilaurus itauba)	68,4	16,3

Fonte: Autoria própria

No ensaio 2 a massa específica média obtida foi de 573 kg/m³ e o teor de umidade médio foi de 11,44%, bastante próximo ao valor de 12% que segundo LOGSDON e CALIL JUNIOR (2002) e NBR 7190/1997, é o teor de umidade de referência para o qual devem ser reportados os resultados de ensaios com madeiras. A tabela 4 mostra os resultados obtidos para os 12 corpos de prova ensaiados:

Tabela 4 - Resultados ensaio nº2

CP	m _o (g)	m (g)	h (%)	V(mm ³)	ρ (kg/m ³)
1	5,32	4,70	11,65	9778,8	481
2	4,70	4,16	11,49	8400,0	495
3	7,30	6,47	11,37	13496,9	479
4	3,84	3,41	11,20	6228,7	547
5	4,60	4,08	11,30	5786,8	705
6	5,26	4,67	11,22	6588,7	709
7	6,30	5,58	11,43	9560,4	584
8	6,20	5,47	11,77	9668,9	566
9	5,17	4,58	11,41	8542,2	536
10	4,77	4,22	11,53	7845,1	538
11	3,32	2,94	11,45	4853,5	606
12	3,91	3,46	11,51	5507,1	628
Média	5,06	4,48	11,44	8021,4	573
Desvio Padrão	0,87	0,77	0,12	1886,5	61,2

Fonte: Autoria própria

No ensaio nº 3 o valor médio obtido para a máxima tensão de tração foi de 146,5 MPa, conforme mostrado na tabela 5. Esta elevada resistência à tração aliada ao peso específico faz com que alguns autores atribuam ao bambu o título de “aço verde”. Segundo MAHZUZ (2013), quando comparado ao aço utilizado como armadura nas estruturas de concreto, a relação “R” - resistência à tração/peso próprio - do bambu Mosô é cerca de 4 vezes maior (tabela 6). A curva tensão x deformação do ensaio de tração é mostrada no gráfico 2.

Tabela 5 - Resultados ensaio nº 3

CP	A (mm ²)	F _{ult} (N)	σ_{ult} (Mpa)
1	93,12	13425	144,2
2	87,45	9619	110,0
3	99,05	13325	134,5
4	80,46	13937	173,2
5	92,74	12903	139,1
6	107,43	12983	120,9
7	84,14	14178	168,5
8	93,53	13736	146,9
9	105,54	17854	169,2
10	86,05	11196	130,1
11	86,81	14449	166,4
12	105,08	16247	154,6
Média	93,45	13654	146,5
Desvio Padrão	7,2	1412,5	16,7

Fonte: Autoria própria

Tabela 6 - Relação $\sigma T/\gamma$ bambu Mosô e aço CA-50

Material	Resistência à tração, σT (MPa)	Peso próprio, γ (kN/m ³)	R = $\sigma T/\gamma$ (MPa/kN/m ³)
Bambu Mosô	146	5,73	25,61
Aço CA-50	500	78,7	6,35

Fonte: Autoria própria e Gerdau (2012)



Gráfico 2 - Curva tensão x deformação típica: Tração

Fonte: Autoria própria

Já para a resistência ao cisalhamento os valores obtidos para os corpos de prova com e sem nó, respectivamente, 11,4 e 10,9 MPa (tabela 7), corroboram a hipótese de SHAO *et al* (2010) que a única propriedade mecânica afetada significativamente pela presença de nós nos colmos é a resistência à tração. A resistência ao cisalhamento média (11,1 MPa) corresponde à 27,1% do valor da resistência à compressão, indo em direção ao exposto por YU (2007).

Devido à esta baixa resistência devem ser evitados carregamentos transversais à seção do colmo, bem como a utilização de ligações com pregos que tendem a afastar as fibras dando origem ao fendilhamento (FABIANI, 2014).

Tabela 7 - Resultados do ensaio nº4

CP (com nó)	Σ [txL] (mm ²)	F _{ult} (N)	τ_{ult} (MPa)
1	7343,7	88426,6	12,0
2	4426,4	51925,3	11,7
3	5355,3	60149,4	11,2
5	4573,8	51573,8	11,3
6	6040,7	75161,6	12,4
8	4749,8	45609,1	9,6
Média	5415,0	62140,9	11,4
Desvio Padrão	851,5	13102,1	0,7
CP (sem nó)	Σ [txL] (mm ²)	F _{ult} (N)	τ_{ult} (MPa)
1	3631,7915	57699	15,9
2	3171,108	30346	9,6
4	3552,1224	47617	13,4
5	4013,6452	33780	8,4
6	3088,0996	24351	7,9
8	3962,7225	39534	10,0
Média	3569,9	38887,8	10,9
Desvio Padrão	299,5	9395,6	2,5

Fonte: Autoria própria

No ensaio de resistência à flexão, para os 12 corpos de prova foi adotado um vão livre médio de 190 cm, sendo que a resistência à flexão média obtida foi de 98,7 MPa, conforme tabela 8. Observou-se que o rompimento ocorreu após grandes deflexões verticais (figura 41), o que pode ser explicado em parte pela composição da parede dos colmos: a camada mais externa, com maior concentração de fibras,

suporta os esforços de tração, enquanto a camada mais interna, com menor concentração de fibras e maior presença de parênquima, permite a deformação por compressão (OBATAYA, KITIN e YAMAUCHI, 2007). Observou-se que o colapso ocorreu pela separação longitudinal das fibras (cisalhamento), conforme mostrado na figura 42. SHARMA et al (2015) reforça a necessidade de pesquisas adicionais para compreensão do modo de ruptura do bambu à flexão, em particular a respeito da influência da resistência ao cisalhamento.

Tabela 8 - Resultados ensaio nº5

CP	F ult (N)	L adotado (mm)	D (mm)	I (mm ⁴)	σ_{ult} (MPa)
1	5091	1920	70,4	644493,012	89,0
2	8806	2140	79,7	1289762,51	97,0
3	5633	2100	65	500478,491	128,0
4	2781	2410	67,85	641176,76	59,1
5	7932	1880	65,8	532858,368	153,5
6	5191	1890	69,75	758188,487	75,2
7	8123	1750	75,6	1042190,07	85,9
8	6667	1910	65,25	620427,787	111,6
9	8515	2090	75,8	956300,162	117,6
10	6587	1860	73,7	922760,339	81,5
11	9660	1550	72,25	885128,797	101,8
12	4438	1560	62,5	431023,238	83,7
Média	6618,7	1921,7	70,3	768732,3	98,7
Desvio Padrão	1665,2	175,6	4,3	208746,7	19,9

Fonte: Autoria própria

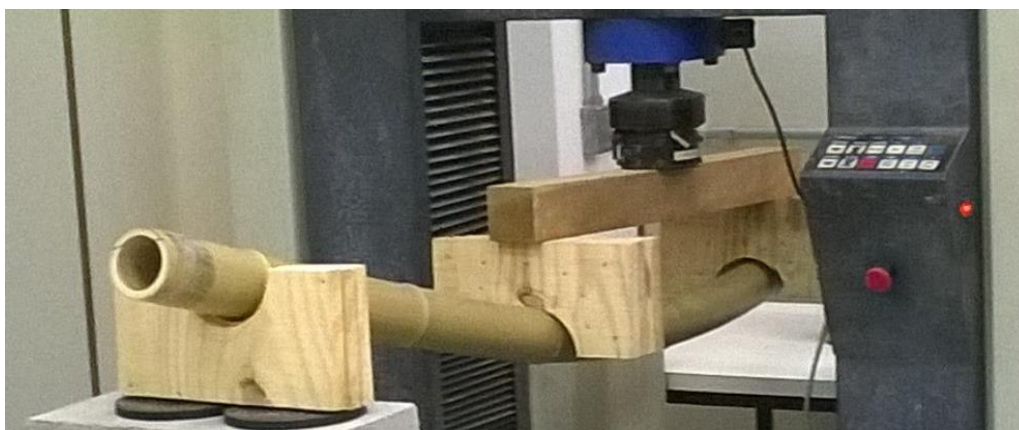


Figura 41 - Deflexão vertical antes do colapso

Fonte: Autoria própria



Figura 42 - Ocorrência do colapso

Fonte: Autoria própria

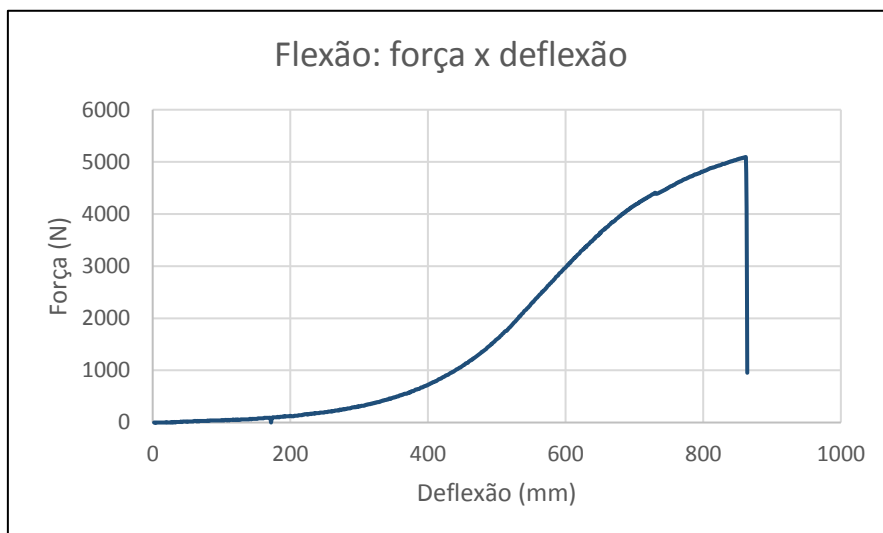


Gráfico 3 - Curva força x deflexão típica: Flexão

Fonte: Autoria própria

4.2 TRELIÇAS

As treliças do tipo 1 – ligações com barras rosqueável – foram as primeiras a serem ensaiadas. Devido a característica anatômica do bambu de possuir feixes de fibras paralelos entre si e sua conseqüente baixa resistência à esforços cisalhantes (~10 MPa), o colapso nestas treliças deu-se pelo cisalhamento do colmo na região onde as barras foram transpassadas, alastrando-se pelo restante do colmo com o aumento da intensidade do carregamento nodal.

As principais medidas atenuantes a serem adotadas na utilização desta ligação seriam o uso de barras com diâmetros maiores (aumentando a área de contato com a parede do colmo), bem como o preenchimento dos internós na região da ligação com argamassa ou concreto de agregados miúdos, de modo a solidarizar a barra aos colmos, acrescentando a transmissão de esforços através do atrito à superfície interna do colmo, característica do grupo 2 segundo a classificação de Widyowijatnoko (2012).

Um comportamento observado nos ensaios que merece destaque diz respeito ao elevado deslocamento vertical do nó formado pelo montante central e o banzo inferior. Inicialmente o modelo de ensaio foi instrumentado com relógio comparador para aferição deste deslocamento, no entanto o curso do equipamento foi insuficiente para a medição, a qual foi tomada com o auxílio de uma trena eletrônica, atingindo o valor médio de 78 mm.

O valor do carregamento nodal para este modelo no momento da ruína foi em média 8,2 kN, sendo que no momento de ocorrência do colapso a tensão média nas barras comprimidas era de 2,9 MPa e no banzo tracionado de 38,2 MPa, demonstrando que o colapso ocorreu em virtude da ligação e não do esgotamento da capacidade resistente das barras. Ressalta-se ainda que tal valor corresponde ao estado limite último, sendo que a carga de projeto mediante combinações adequadas seria ainda menor. De qualquer forma, ainda que um carregamento de menor intensidade, o deslocamento vertical do centro do vão pode ser um fator limitante na concepção de estruturas desta natureza.



Figura 43 - Colapso iniciado por cisalhamento junto a ligação

Fonte: Autoria própria

O ensaio seguinte, com treliças do tipo 2 avaliou a influência da adoção de uma medida complementar na metodologia de confecção da ligação descrita na treliça do tipo 1. No entanto em vez de adotar-se barras de maior diâmetro ou optar pelo preenchimento dos internós, utilizou-se um compósito de fibra de vidro e resina polimérica ao redor dos colmos na região da ligação. O carregamento nodal último foi de aproximadamente 4,1 kN, com diminuição do deslocamento vertical do ponto central, que foi de 54,7 mm em média. Assim como nas treliças tipo 1, o colapso ocorreu por cisalhamento junto às barras passantes. Mesmo que no modelo teórico o montante central tenha comportamento de barra zero (sem carregamento), na situação real, em que as ligações não atuam como rótulas perfeitas, ocorre esforço de compressão nesta barra, o qual é transferido como carga pontual no centro do banzo inferior. A ocorrência de um valor menor para o deslocamento vertical neste ponto, em relação ao ocorrido nas treliças tipo 1 pode ser explicado pelo fato do reforço com o compósito aumentar a rigidez local à tração e, conseqüentemente, à flexão.



Figura 44 - Colapso iniciado nas proximidades da ligação

Fonte: Autoria própria

Os ensaios realizados com as treliças do tipo 3 demonstraram que a ligação em questão é de confecção complexa e artesanal, simultaneamente, uma vez que envolve vários componentes: pino de madeira, cola, chapa metálica, parafusos e braçadeira metálica. O aumento na quantidade de insumos utilizados insere variáveis que certamente interferem na rigidez da ligação, e dificultam uma padronização/industrialização de tal sistema. Nestes ensaios foram verificadas as deflexões verticais excessivas ($\sim 98,3$ mm) sob carregamentos da ordem de 8,3 kN (carga no momento do colapso). Esta situação levou a ocorrência de um tipo diferente de colapso, que aconteceu com a rotação na região dos apoios e posterior rompimento do colmo nesta região.

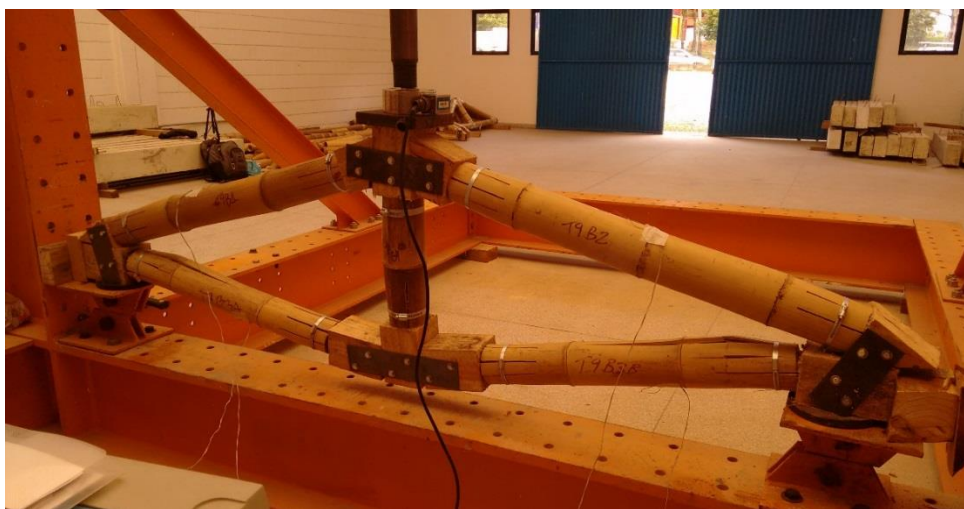


Figura 45 - Colapso típico da ligação do tipo 3

Fonte: Autoria própria

Em todas os ensaios conduzidos o banzo inferior - sujeito à tração – foi a barra mais solicitada, ainda que bastante aquém do limite de resistência obtido no ensaio de caracterização (146 MPa). A tensão de tração atingiu desde aproximadamente 1/3 da tensão última no modelo 1 até valores muito menores no modelo 3, conforme demonstrado no gráfico 4.

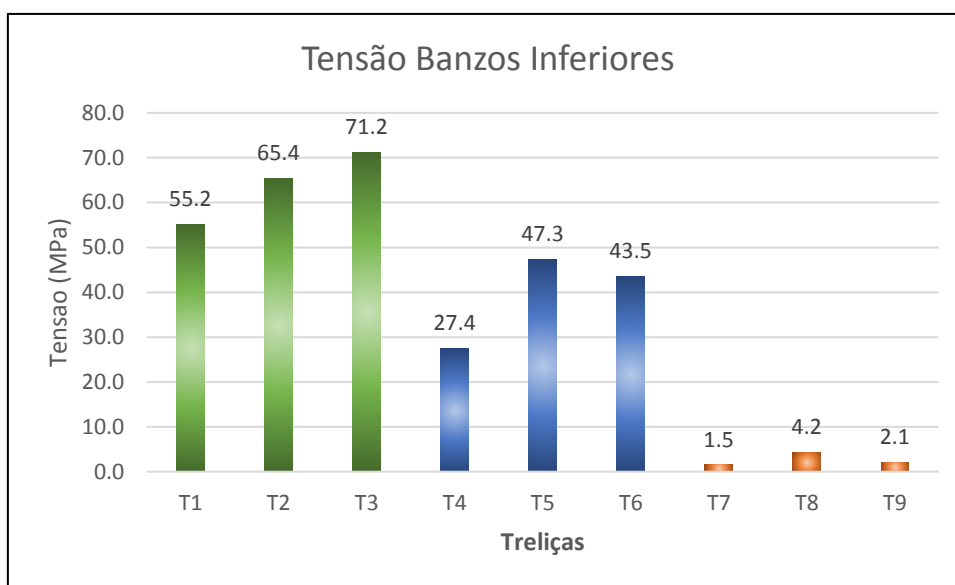


Gráfico 4 - Tensão de tração (banzos inferiores)

Fonte: Autoria própria

Nas diagonais – sujeitas à compressão – as tensões solicitantes foram muito abaixo do limite de resistência (41 MPa) sendo em média cerca de 10% deste valor, provavelmente devido à pouca rigidez oferecida pelas ligações. O carregamento nodal atuante no momento do colapso da estrutura, que variou entre 4,1 kN (treliças tipo 2) e 8,2 kN (treliças tipo 1) é uma consequência direta desta baixa rigidez.

Um panorama geral das máximas tensões de compressão e tração, carregamento nodal e deslocamento vertical pode ser melhor visualizado na tabela 9.

Tabela 9 - Resumo dos resultados obtidos

Ligação	Barra Roscável					Compósito Fibra de Vidro					Pino de Madeira				
Treliça	T1	T2	T3	μ	σ	T4	T5	T6	μ	σ	T7	T8	T9	μ	σ
σ_{B1} (MPa)	3,84	0,70	2,22	2,25	1,28	0,20	0,25	0,15	0,20	0,04	0,51	0,33	0,27	0,37	0,10
σ_{B2} (MPa)	2,70	4,40	3,16	3,42	0,72	2,80	4,10	2,83	3,24	0,61	6,03	10,49	10,70	9,07	2,15
σ_{B3} (MPa)	55,20	65,40	71,20	63,93	6,61	27,40	47,26	43,50	39,39	8,61	1,51	4,24	2,10	2,62	1,17
δ (mm)	91,00	79,00	65,00	78,33	10,62	49,00	52,00	63,00	54,67	6,02	115,00	89,00	95,00	99,67	11,12
F (kN)	7,40	9,80	7,50	8,23	1,11	3,60	3,40	5,30	4,10	0,85	7,60	5,40	7,00	6,67	0,93

Fonte: Autoria própria

Onde:

σ_{B1} = tensão de compressão na barra 1;

σ_{B2} = tensão de compressão na barra 2;

σ_{B3} = tensão de tração na barra 3;

δ = deflexão vertical do nó inferior central no momento do colapso;

F = força nodal aplicada no momento do colapso;

T1 a T9 = Identificação da treliça ensaiada;

μ = média;

σ = desvio padrão.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os ensaios de caracterização demonstraram que o bambu possui excelentes propriedades físicas e mecânicas que, aliadas às suas características sustentáveis, o tornam um material com grande potencial de emprego como elemento estrutural.

Já os experimentos realizados com as treliças possibilitaram constatar que os esforços axiais nas barras no momento do colapso apresentaram valores muito abaixo dos limites de resistência dos elementos estruturais em bambu, demonstrando assim uma subutilização deste material, uma vez que o colapso das estruturas teve início invariavelmente nos sistemas de ligação entre os colmos.

Em face dos resultados obtidos e limitações de ordem construtivas, a ligação utilizando barra rosqueável demonstrou ser a mais viável, dentre as três tipologias ensaiadas, para replicação em escala. Ainda que passível de considerável mão de obra “artesanal”, este sistema de ligação possibilita a adoção de medidas para aumento da rigidez.

Uma vez constatados tais resultados, pode-se concluir que o aprimoramento das ligações a serem utilizadas no bambu deve aproveitar suas características anatômicas (geometria tubular e feixes de fibras paralelos) e mecânicas (elevada resistência à esforços axiais), possibilitando assim que tais propriedades sejam exploradas de maneira otimizada. Este melhor aproveitamento permite a concepção de estruturas sujeitas a carregamentos mais elevados com uso de menos material.

A obtenção de uma solução para uniões que além do uso das características supracitadas possibilite uma padronização e/ou industrialização levaria o uso do bambu como elemento estrutural a um patamar semelhante ao da madeira, consolidando-o como um material ecológico, econômico e eficiente.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com os resultados obtidos neste trabalho e as demais pesquisas sobre o uso estrutural do bambu, pode-se sugerir o desenvolvimento dos seguintes trabalhos:

- Critérios de dimensionamento de ligações com barras rosqueáveis, em função da carga atuante e material e diâmetro da barra.
- Reforço localizado nas regiões de ligação dos colmos com compósito de fibra de vidro previamente à execução da ligação.
- Simulação computacional de diferentes tipos de ligação antes da confecção de corpos de prova e ensaios destrutivos
- Desenvolvimento de nova metodologia de ligação aproveitando as propriedades mecânicas axiais do bambu.

REFERÊNCIAS

ALBERMANI, F.; GOH, G.Y.; CHAN, S.L. Lightweight bamboo double layer grid system. **Engineering Structures**, 29, p. 1499-1506, 2007.

ARCE, Oscar Antonio. **Fundamentals of the design of bamboo structures**. 1993. 260 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Eindhoven University, Eindhoven, 1993.

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

BERALDO, Antônio L.; PEREIRA, Marco A. **Bambu de Corpo e Alma**. Bauru: Canal6, 2008.

CAEIRO, João Gabriel Boto de Matos. **Construção em bambu**. 2010. 157 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010.

CAPELLO, Giuliana. Construções de Bambu. **Téchne**. São Paulo: Techne, mar.2006. Edição 108.

CUSACK, Victor. **Bamboo world: the growing and use of clumping bamboos**. Sidney: Kangaroo Press, 1999.

DIXON, P.G.; GIBSON, L. J. The structure and mechanics of Mosô bamboo material. **J. R. Soc. Interface**, 11, 2014.

ESPELHO, Jean C.C.; BERALDO, Antônio L. Avaliação físico-mecânica de colmos de bambu tratados. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 12, pp. 645-652, 2008.

FABIANI, Marco. **Bamboo structures: Italian culms as likely resource for green buildings**. Università Politecnica delle Marche, 2014.

FARRELY, David. **The book of bamboo**. Vol. 2, San Francisco: Sierra Club Books, 1984.

FILHO, Mário T.; AZZINI, Anisio. Estrutura anatômica, dimensões das fibras e densidade básica de colmos de bambusa vulgaris schrad. **IPEF**, pp. 43-50, 1987.

GATÓO, A *et al.* Sustainable structures: bamboo standards and building codes. **Engineering Sustainability**. Vol. 167. Issue ES5. P.189-196, 2014.

GERDAU. **Aço para construção civil**. São Paulo: Gerdau, 2012. 8p.

GHAVAMI, K.; MARINHO, A. B. Propriedades geométricas e mecânicas de colmos dos bambus para aplicação em construções. **Engenharia Agrícola**, 23, p. 415-424, 2003.

HARRIES, Kent A.; SHARMA, Bhavna; RICHARD, Michael. Structural use of full culm bamboo: the path to standardization. **International Journal of Architecture, Engineering and Construction**, vol 1, n. 2, p.66–75, 2012.

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

INBAR - International Network for Bamboo and Rattan. **Bamboo and Climate Change Mitigation - Technical Report No.32**. Beijing: INBAR, 2010.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Informações sobre madeiras. Disponível em http://www.ipt.br/consultas_online/informacoes_sobre_madeira. Acesso em 08/06/2015

ISO 22157-1: Bamboo – Determination of physical and mechanical properties – Part 1: Requirements. ISO, 2004.

ISO 22157-2. Bamboo – Determination of physical and mechanical properties – Part 2: Laboratory manual. ISO, 2004.

JANSSEN, Julius Joseph Antonius. **Bamboo in building structures**. 1981. 238 f. Tese (Doutorado em Tecnologia) – Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 1981.

JANSSEN, Julius Joseph Antonius. **Designing and Building with Bamboo**. Eindhoven : Technical University of Eindhoven, 2000.

KRAUSE, João Queiroz. **Desenvolvimento de elementos especiais de bambu para treliças espaciais**. 2009. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2009.

LABORATÓRIO DE MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRAS DA ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS – LAMEM-EESC. Reforço de estruturas de madeira com fibra de vidro e com fibra de carbono. **Revista da Madeira**, n. 64, ano 11, 2002.

LEET, Kenneth M.; UANG, Chia-Ming; GILBERT, Anne M. **Fundamentos da análise estrutural**. São Paulo: McGraw Hill, 2009.

LIESE, Walter. **The anatomy of bamboo culms**. Beijing: INBAR, 1998.

LOGSDON, N. B.; CALIL JUNIOR, C. Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**. São Carlos, n.18, p. 77-107, 2002.

LÓPEZ, Oscar Hidalgo. **Bamboo, The gift of the Gods**. Bogotá: Lopez Editor, 2003.

LUGT, P. van der, DOBBELSTEEN, A.A.J.F. van der, JANSSEN, J.J.A. An environmental, economic and practical assessment of bamboo as a building material for supporting structures. **Construction and Building Materials**, Holanda, v.20, p. 648-656, 2005.

MAHZUZ, H.M.A. Determination of Several Properties of a Bamboo of Bangladesh. **Journal of Civil Engineering Research**. p. 16-21, 2013.

MARÇAL, Vitor Hugo Silva. **Uso do bambu na construção civil**. 2008. 60 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

MARINHO, Nelson Potenciano. **Características das fibras do bambu (*Dendrocalamus giganteus*) e potencial de aplicação em painéis de fibra de média densidade (MDF)**. 2012. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e Materiais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

MINKE, Gernot. **Manual de construccion con bambu**. Cali: Merlin, 2010.

MORÉ, Telmo Norberto Moreira. **Estrutura treliçada em bambu para utilização em telhados residenciais**. 2003. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

NMBA - National Mission on Bamboo Applications. **Preservation of Bamboo**. New Delhi: NMBA, 2006.

OBATAYA, Eiichi; KITIN, Peter; YAMAUCHI, Hidefumi. Bending characteristics of bamboo (*Phyllostachys pubescens*) with respect to its fiber-foam composite structure. **Wood Sci Technol**, 41, p. 385-400, 2007.

OBERMANN, Tim M; LAUDE, Ronald. **Bambú: recurso sostenible para estructuras espaciales**. Universidad Nacional de Colombia. Medellin, 2004.

OKA, Gusti Made *et al.* Effects of node, internode and height position on the mechanical properties of *gigantochloa atroviolacea* bamboo. **Procedia Engineering**, 95, p. 31-37, 2014.

OLIVEIRA, Thaisa Francis César Sampaio de. **Sustentabilidade e Arquitetura: Uma reflexão sobre o uso do bambu na Construção Civil**. 2006. 136 f. Dissertação (Mestrado em Dinâmicas do Espaço Habitado) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, 2006.

PADOVAN, Roberval Bráz. **O bambu na arquitetura: design de conexões estruturais**. 2010. 184 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Bauru, 2010.

PEREIRA, B. P. Sustentabilidade: um desafio para engenharia. **TecHoje**. Belo Horizonte, 2013.

PEREIRA, Marco Antonio dos Reis. **Bambu: espécies, características e aplicações**. Bauru: UNESP, 2001.

RECHT, C; WETTERWALD, M. F. **Bamboos**. Portland: Hardcover, 1992.

SHAO, ZP et al. Differences in structure and strength between internode and node sections of Mosô bamboo. **Journal of tropical forest science**, Malaysia, v.22, p. 133-138, abr. 2010.

SHARMA, Bhavna *et al.* Engineered bamboo for structural applications. **Construction and Building Materials**, 81, p. 66-73, 2015.

SOARES, Sebastião Fróes Brandão de Sousa. **Estruturas em bambu**. 2013. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2013.

UBIDIA, Jorge A. Morán. **Traditional bamboo preservation methods in Latin America**. Ecuador: INBAR, 2002.

VAESSEN, Maarten J.; JANSSEN Jules J.A. Analysis of the critical length of culms of bamboo in fourpoint bending tests. **Heron**, vol. 42 No. 2, pp. 113-124, 1997.

WIDYOWIJATNOKO, Andry. **Traditional and Innovative Joints in Bamboo Construction**. Aachen, Alemanha: RWTH Aachen University, 2012.

YU, Xiaobing. **Bamboo: Structure and Culture**. 2007. 188 pp. Tese – Universität Duisburg-Essen, Essen, 2007.