

# Bambu como Material de Engenharia

# 12

**Khosrow Ghavami**  
**Normando Perazzo Barbosa**  
**Luis Eustáquio Moreira**

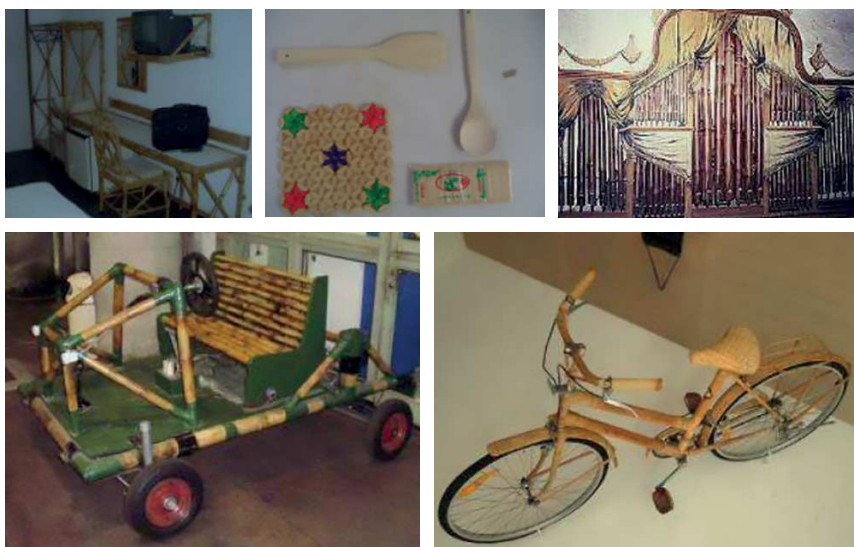
## 1. Introdução

Pelo fato de ser um material renovável, que absorve gás carbônico e usa energia solar, ser facilmente reincorporado à natureza após seu ciclo de vida, crescer com facilidade e rapidamente e possuir espécies que apresentam excelentes propriedades de engenharia, o bambu, planta milenar, pode ser chamado, nessa época de preocupações com a sustentabilidade, de um material para o século XXI. Sua versatilidade é tamanha que levou o arquiteto colombiano Oscar Hidalgo a publicar seu último livro com o título: *Bamboo, The Gift of the Gods!*

A utilização do bambu é bastante disseminada em todo o mundo, principalmente nos países asiáticos. Japoneses, chineses e indianos utilizam essa extraordinária planta há milhares de anos. Em certas regiões, o bambu é considerado uma planta sagrada, tais são os benefícios que ela proporciona. Na América do Sul, a Colômbia destaca-se como o país que mais investe na utilização desse material em construções. No Brasil, só recentemente essa espécie vegetal recebeu a atenção já merecida com a criação da Rede Brasileira do Bambu. Isto se justifica pelas grandes reservas existentes no estado do Acre e pela facilidade de crescimento em significativa parte do território brasileiro. Entretanto, como ainda existe uma ideologia de associar essa planta à pobreza, um esforço para se divulgar suas características agrônômicas e tecnológicas se faz necessário.

O bambu já é utilizado no meio rural como tutor para plantas, demarcação de curvas de nível, cercas, estrados, comedouros, esteiras, cestos,

forros, proteção de terrenos, quebra-vento, controle de erosão, carvão, drenagem, condução de água, alimentação, vara de pescar. O potencial da planta na fabricação de móveis, artefatos domésticos, instrumentos musicais e mesmo na engenharia mecânica é inegável. Na Figura 1, é possível ver algumas aplicações gerais. Dentre elas, destaca-se o veículo de bambu, que foi desenvolvido na PUC-Rio.



**Figura 1.** Aplicações do bambu no design (fabricação de móveis), utensílios de cozinha, instrumentos musicais, engenharia mecânica.

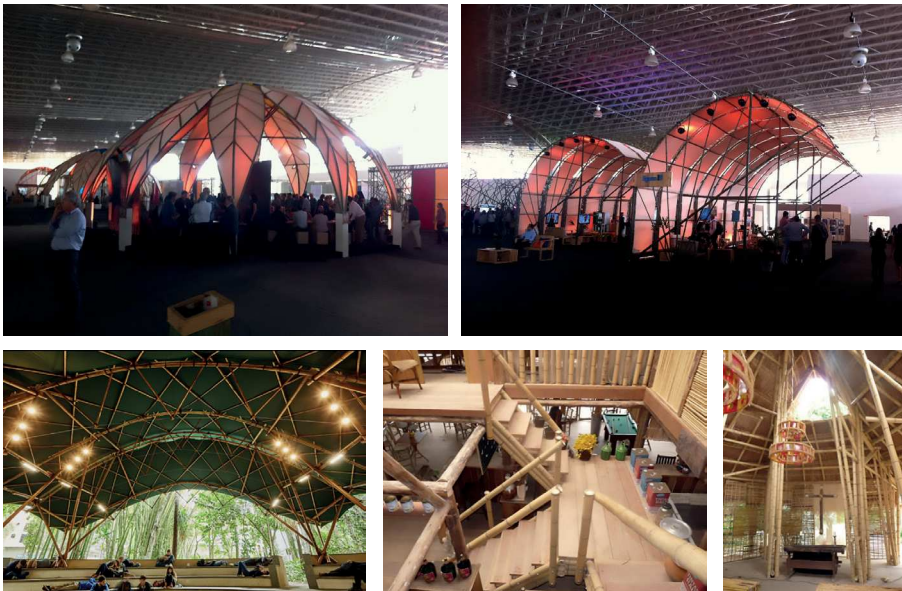
Muitas vezes, faz-se um uso inadequado do bambu, com os colmos expostos diretamente às intempéries. Nesses casos, o material se deteriora rapidamente, fica com aspecto estético comprometido, devendo ser substituído em poucos anos. Na Figura 2, apresentam-se exemplos de utilização não conveniente para o nobre material vegetal: à esquerda cancela e cerca com o bambu diretamente exposto ao sol e à chuva; à direita, o colmo em contato direto com a umidade do solo.

Tais usos inadequados são um empecilho a mais na tentativa de aplicação em larga escala do bambu. Como nessas situações ele tem baixa durabilidade, a população encara-o como material de segunda categoria, associando-o muitas vezes à pobreza. Soma-se a isso o desconhecimento do potencial do material, fato que acarreta o seu mau uso, resultando em construções efêmeras e de aspecto estético discutível.



**Figura 2.** Uso inadequado do bambu: exposto às intempéries e em contato direto com o solo: curta vida útil.

No entanto, com o bambu, pode-se fazer obras de engenharia de qualidade e de beleza arquitetônica ímpar. A Figura 3 mostra exemplos dessa característica. Nela, é possível ver, acima, uma obra da Ebiobambu, feita para a feira do Centro de Convenções em João Pessoa, em agosto de 2017; abaixo, à esquerda, o anfiteatro para a PUC-Rio, obra da Bambutec – Rio; e ao centro e à direita, o cenário para a novela Araguaia, veiculada pela rede Globo de Televisão, obra da Arte-Desenho – Rio.



**Figura 3.** Arquiteturas contemporâneas com o bambu – empresas brasileiras – acima: Ebiobambu; abaixo à esquerda: Bambutec – Rio, ao centro e à direita: ArteDesenho-Rio.

Algumas regiões da América Latina já usam o bambu em uma escala relativamente grande, como ocorre em certas partes da Colômbia, porém, na maioria dos casos, seu emprego é feito de forma empírica, poucas vezes fazendo-se uso das suas reais propriedades de engenharia no projeto das estruturas. Apenas recentemente foram publicadas, naquele país, informações sistemáticas sobre a espécie *Guadua angustifolia* (PEÑA, 2010), e finalmente foi inserido, na norma técnica sobre estruturas de madeira, um capítulo sobre o projeto estrutural com *Guadua* (ICONTEC, 2010). Apesar de ser um documento novo, utiliza ainda o método das tensões admissíveis. Equador e Peru também já dispõem de normas para as estruturas de bambu, assim como Índia e China. No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas instituiu, em julho de 2017, a Comissão de Estudos *CE-002:126.012 – Comissão de Estudo de Estruturas de Bambu*, que está elaborando um texto de norma nacional, tendo como referência a norma *ISO 22156-Bamboo Structural Design* (ISO, 2004). No final deste capítulo, apresentam-se algumas considerações sobre esse documento.

Não se sabe ao certo o número de espécies de bambu, se 1200 ou mais, que se espalham pelo globo. A diversidade dessa planta é tal que sua altura varia de poucos centímetros a mais de 30 metros de altura (Figura 4).



**Figura 4.** Espécies de bambu de alguns centímetros e com cerca de 30 m de altura.

Evidentemente, para emprego na Arquitetura e na Engenharia, existem espécies apropriadas. Para se aplicar o bambu nas construções, é necessário que os colmos passem por diversas etapas, como: seleção; corte; cura; secagem; e tratamentos imunizantes. No presente capítulo, não se dão

detalhes sobre essas etapas por limitação de espaço, passando-se diretamente à análise da estrutura do bambu.

## 2. Estrutura do Bambu

Pode-se dizer que *fases* são as diferentes partes que compõem um material. Já a *estrutura* do material corresponde à forma, dimensão e maneira como se distribuem as diversas fases no seu interior. É importante se conhecer a estrutura de um material porque suas propriedades podem ser modificadas, quando há intervenções sobre ela.

O olho humano consegue discernir partículas com dimensões da ordem de 0,2 mm. Assim, chama-se *macroestrutura* a parte da estrutura visível ao olho nu, e *microestrutura* a parte da estrutura visível ao microscópio. Há também a mesoestrutura, ou seja, aquela entre as duas citadas.

### 2.1. Macroestrutura do Bambu

Os colmos de bambu são tubos tronco-cônicos com saliências onde se situam os nós. O diâmetro é maior na base que no topo (Figura 5). É justo que a Natureza tenha assim criado os colmos: na parte basal, é que ocorrem as maiores as solicitações devido à ação do vento, havendo necessidade de maior inércia.



**Figura 5.** Forma tronco-cônica do colmo de bambu.

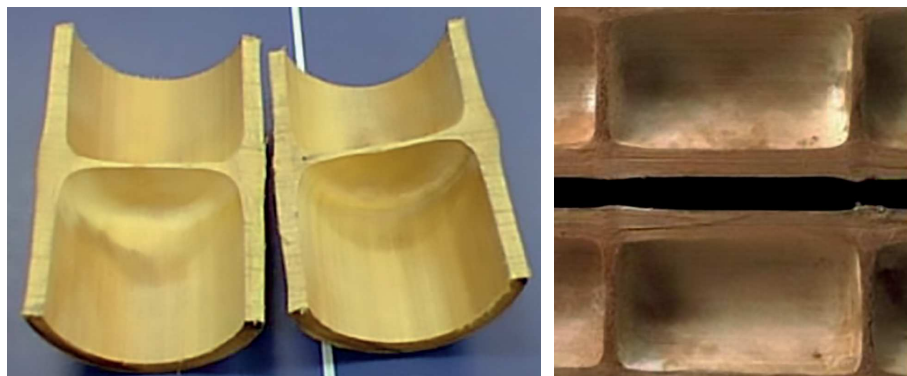
Chama-se “conicidade” do trecho de colmo a razão da diferença entre os diâmetros maior ( $D_{\max}$ ) e menor ( $D_{\min}$ ) nas extremidades do trecho e seu comprimento  $L$ . Multiplicado por 100, o resultado pode ser expresso em %:

$$\delta = 100 \times (D_{\max} - D_{\min})/L (\%)$$

Para emprego nas estruturas, é conveniente que a conicidade seja limitada a 0,67 % (BARBOSA; GHAVAMI; MOREIRA, 2016).

Cortando-se longitudinalmente o colmo ao meio, percebe-se que nos nós existe um diafragma que fecha inteiramente a seção (Figura 6), embora também existam espécies de bambu cuja seção é maciça, e não oca, como a maior parte das espécies.

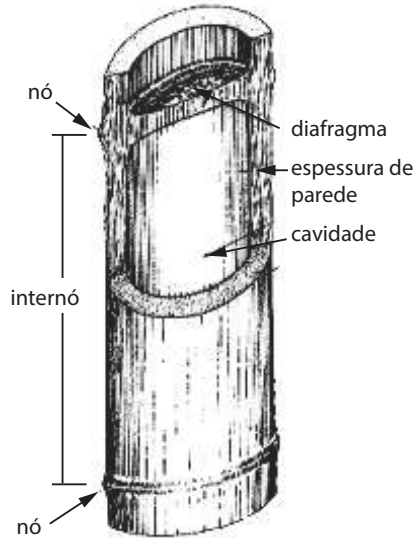
Os diafragmas servem para dar a rigidez necessária contra a torção dos colmos e também para impedir a flambagem local da parede. A distância entre os nós chama-se internó, entrenó ou distância internodal. O vazio entre os diafragmas é a câmara internodal.



**Figura 6.** Diafragmas do bambu.

Para emprego na Engenharia, é de interesse conhecer, além do comprimento médio dos colmos, os seguintes parâmetros ao longo deles, que variam enormemente com a espécie (Figura 7):

- distância internodal (ou entrenó, internó ou internódio);
- diâmetro externo;
- espessura da parede.

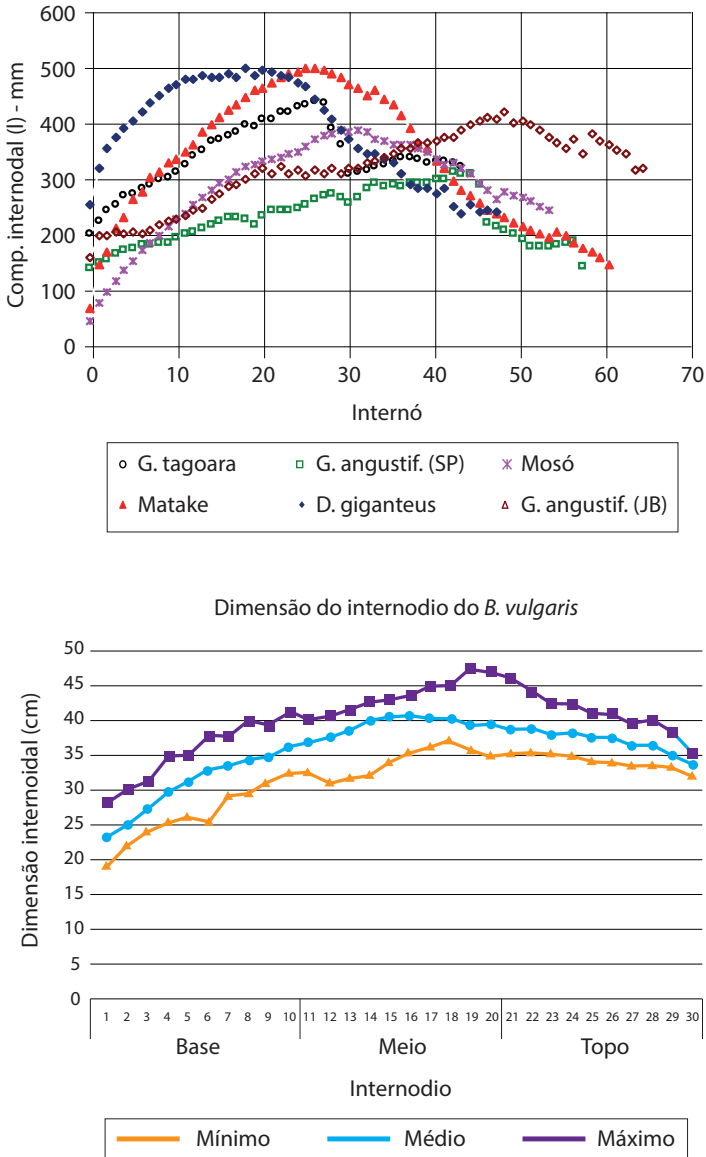


**Figura 7.** Colmo de bambu.

Esses parâmetros variam de acordo com:

- espécie;
- fatores locais, como qualidade do solo, temperatura e umidade relativa do ambiente, insolação, espaçamento entre touceiras, etc.;
- manejo do bambuzal;
- posição ao longo do colmo;

Na Universidade Católica do Rio de Janeiro (GHAVAMI; MARINHO, 2001), foram obtidas essas propriedades para diversas espécies de bambu. Foi estabelecida a forma como elas variam ao longo do colmo. Na Figura 8, apresenta-se o caso da distância internodal, sendo que o número no eixo x indica o número do entrenó, contado de baixo para cima, correspondendo o número 0 ao primeiro deles. Na Universidade Federal da Paraíba, obtiveram-se os dados para a espécie *Bambusa vulgaris* (GOME NETO, 2017).

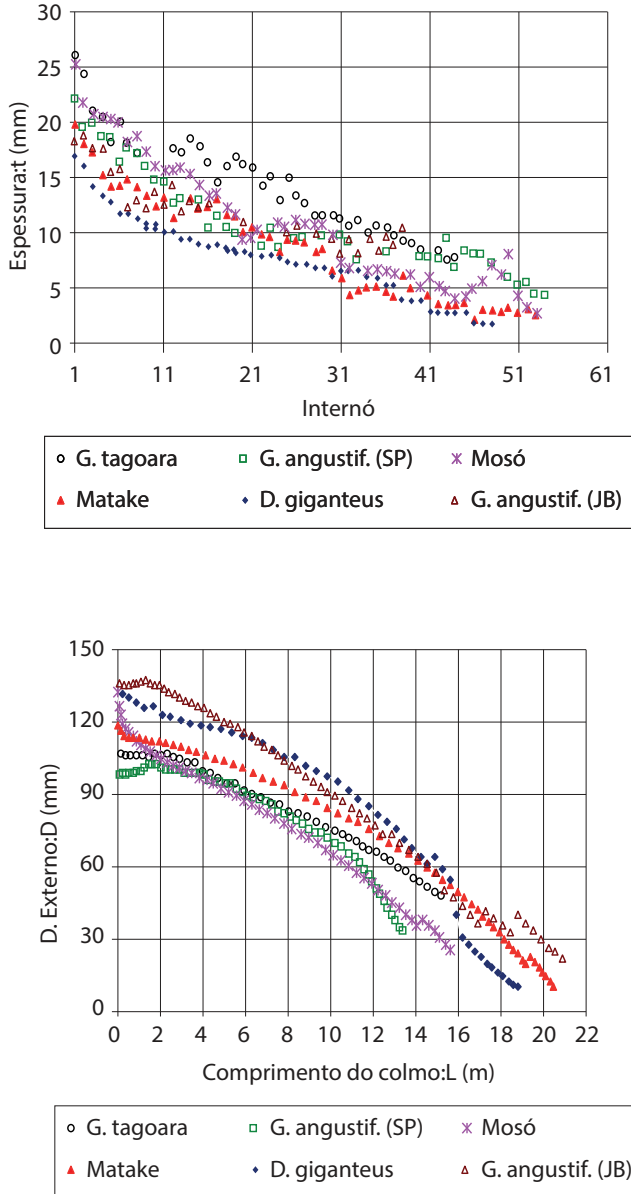


**Figura 8.** Variação da distância internodal ao longo do colmo.

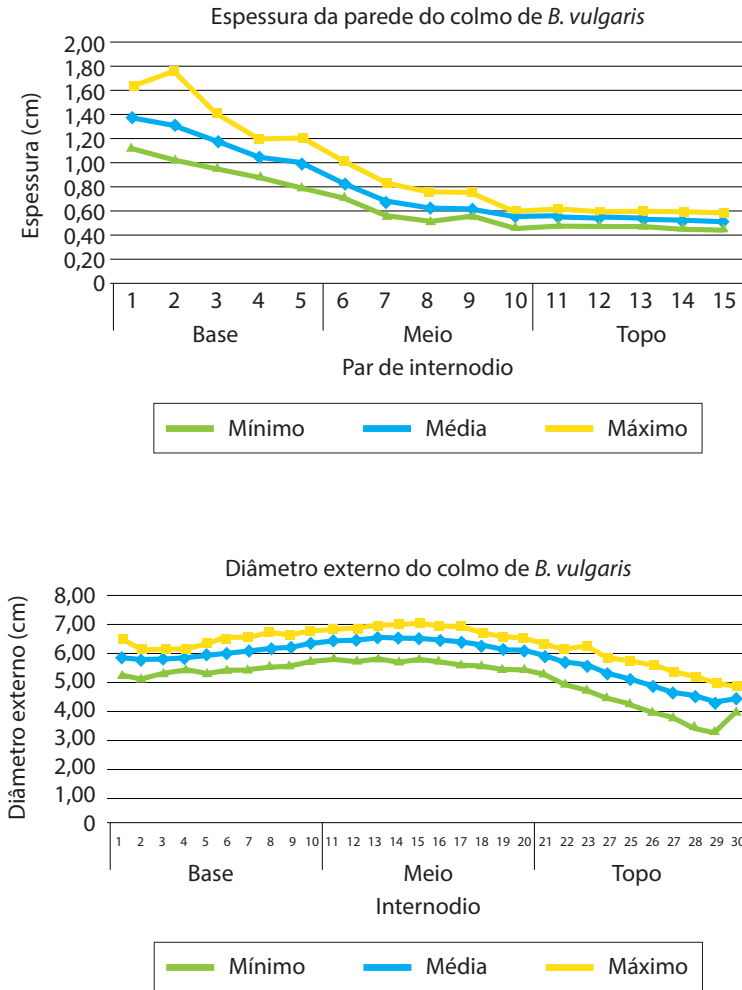
Percebe-se que a distância entre os nós vai crescendo a partir da base até atingir os valores maiores no trecho central, voltando a decrescer nas extremidades superiores do colmo.

No caso do diâmetro externo, vê-se na Figura 18 que ele decresce da base para o topo, visto que o colmo tem a forma tronco-cônica.

O mesmo ocorre com a espessura da parede: ela é maior nas partes inferiores do colmo, decrescendo ao longo de sua altura. Isso pode ser visto na Figura 9.



**Figura 9.** Variação da espessura da parede e do diâmetro externo ao longo do colmo.



**Figura 9.** Continuação

Sendo um material vegetal, as seções transversais do colmo nem sempre são perfeitas. Há espécies como *Guadua angustifolia*, *Dendrocalamus giganteus* e muitas outras cuja homogeneidade é muito grande. No entanto, outras, como a *Bambusa vulgaris*, apresentam muita variação. Por exemplo, nas vizinhanças do nó, a seção perde um pouco a forma circular, como se vê na Figura 10. Note-se também a variação na espessura da parede para colmos da mesma espécie. Isso porque se tratam de colmos colhidos aleatoriamente de locais diferentes, em bambuzais sem nenhum manejo. Uma plantação com o devido trato conduzirá a uma maior uniformidade.

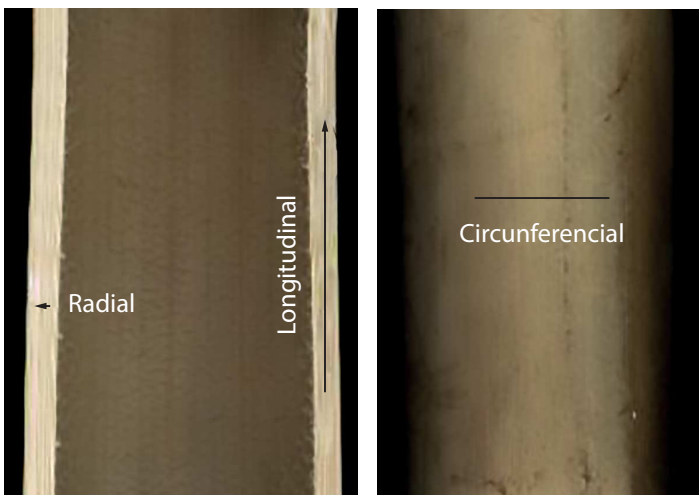


**Figura 10.** Seção transversal de colmos de *Bambusa vulgaris*: à direita, distorção nas vizinhanças do nó.

Para fins de engenharia, as irregularidades de certos colmos podem ser aceitas considerando-se um apropriado coeficiente de modificação da resistência e admitindo-se valores médios para as propriedades das seções transversais.

Devido à forma tubular, pode-se adotar como referência as direções longitudinal, radial e circunferencial, mostradas na Figura 11. As propriedades físicas e mecânicas do bambu são diferentes, segundo essas três direções.

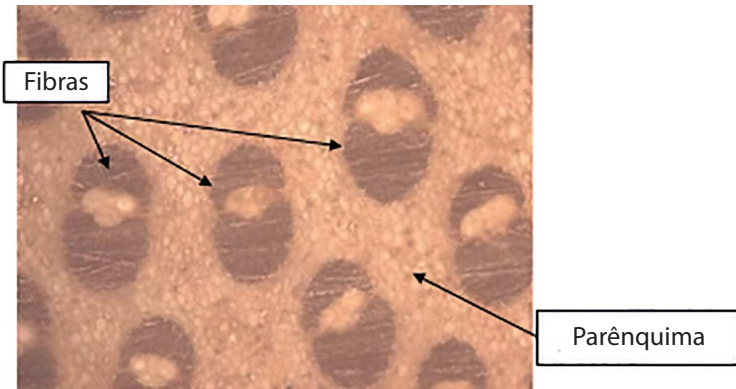
A direção longitudinal é dita direção paralela às fibras. A direção radial é aquela ao longo da espessura da parede do colmo. A direção circunferencial é aquela circular, paralela ao perímetro da seção transversal do colmo.



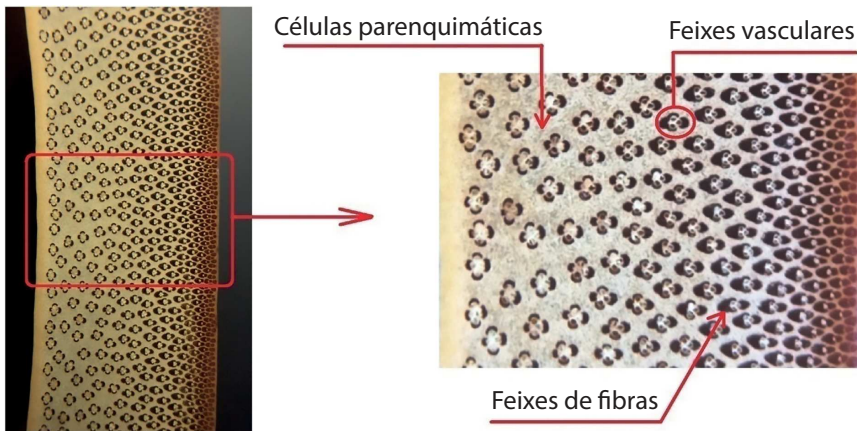
**Figura 11.** Direções a serem consideradas nos colmos de bambu.

## 2.2. Meso e microestrutura do bambu

Microscopicamente, as paredes dos colmos de bambu podem ser consideradas como sendo constituídas de um material compósito formado por fibras fortemente aderidas a uma matriz de parênquima (Figura 12). As fibras são as fases mais resistentes. Na Figura 13, vê-se que a concentração delas, a qual aumenta na direção radial, do interior para a face externa, de forma que o bambu possa resistir às cargas de vento, que constitui a solitação mais constante durante a vida desse material na natureza.



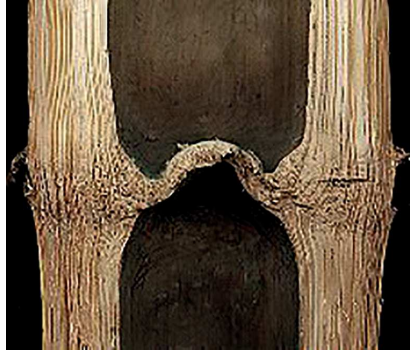
**Figura 12.** Bambu: material compósito.



**Figura 13.** Vistas da mesoestrutura do bambu Mosó.

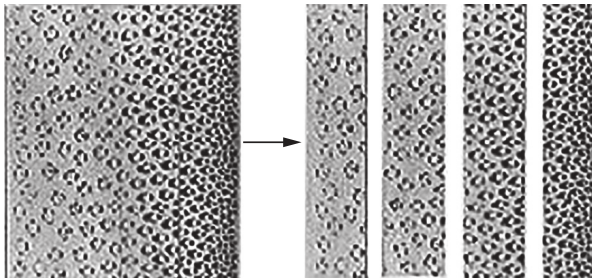
### 2.2.1. Mesoestrutura

As fibras têm uma direção preferencial, orientando-se longitudinalmente ao longo do colmo. Elas são praticamente paralelas e lineares ao longo do internó, porém, nos nós, elas sofrem desvios – anastomose –, como se pode perceber na Figura 14. Somente no diafragma as fibras circulam de um lado para outro.



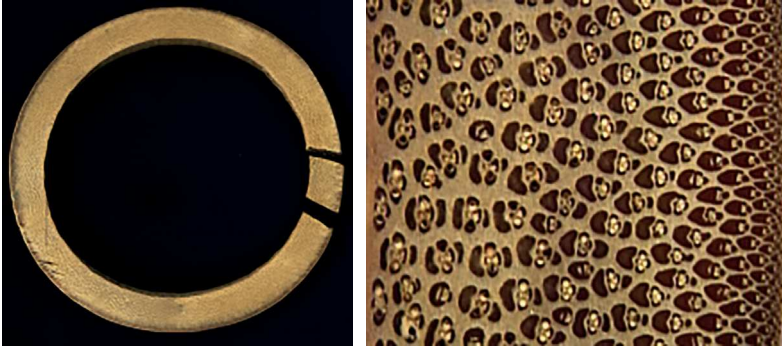
**Figura 14.** Desvio do paralelismo das fibras nos nós do colmo.

No sentido radial, as fibras não se distribuem homogeneamente no parênquima: há uma maior concentração nas proximidades da face externa, como se vê na Figura 15, obtida na PUC-Rio. Sendo as camadas externas do colmo as mais solicitadas pela ação do vento no bambuzal, bem como as fibras a fase responsável pela resistência à tração, sabiamente a Natureza concentra-as nas zonas mais tracionadas.



**Figura 15.** Distribuição das fibras ao longo da espessura da parede do colmo (direção radial).

Já ao longo da direção circunferencial (Figura 16) tem-se uma distribuição de fibras praticamente uniforme.

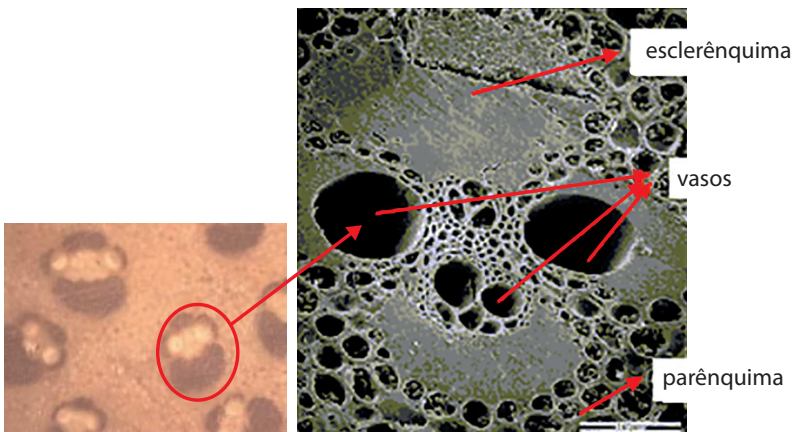


**Figura 16.** Distribuição das fibras ao longo da direção diametral.

Na direção longitudinal, a distribuição das fibras é também aproximadamente uniforme, embora haja variação na quantidade delas à medida que se afasta da base.

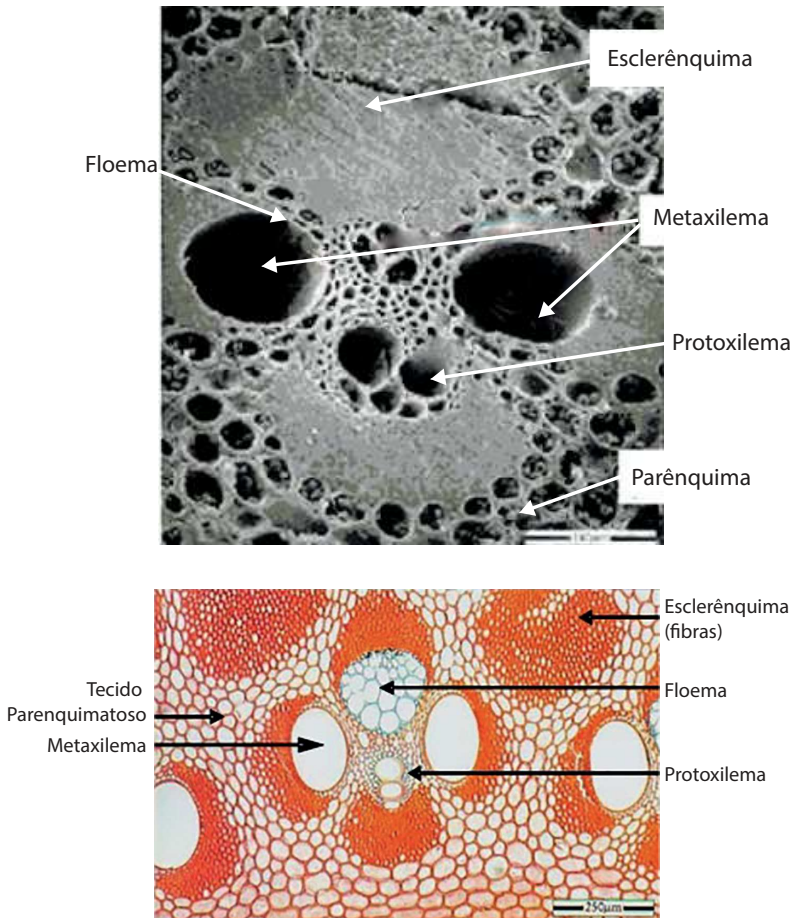
### 2.2.2. Microestrutura

As fibras e vasos estão imersas no parênquima, que é um tecido poroso, de células ocas, nas quais se armazenam o amido. A lignina e a celulose são os polímeros que fazem as paredes de todas as células, tanto do parênquima quanto das fibras. A celulose ( $C_6 H_{10} O_5)_n$  é uma cadeia de monômeros tridimensionais, que conferem resistência ao tecido, enquanto a lignina, polímero aromático, faz uma cimentação do tecido, conferindo-lhe rigidez.



**Figura 17.** Vista de fibra de bambu.

Os vasos condutores de seiva chamam-se xilema. Eles, por sua vez, são formados por protoxilema, metaxilema e floema (Figuras 17 e 18). No protoxilema e no metaxilema, localizam-se os vasos onde circulam a água com sais minerais dissolvidos - a seiva bruta - desde a raiz até às folhas. Já o floema é o vaso que transporta a seiva elaborada, já com as substâncias orgânicas produzidas pela fotossíntese.



**Figura 18.** Componente da fibra e desenho esquemático da microestrutura do bambu.

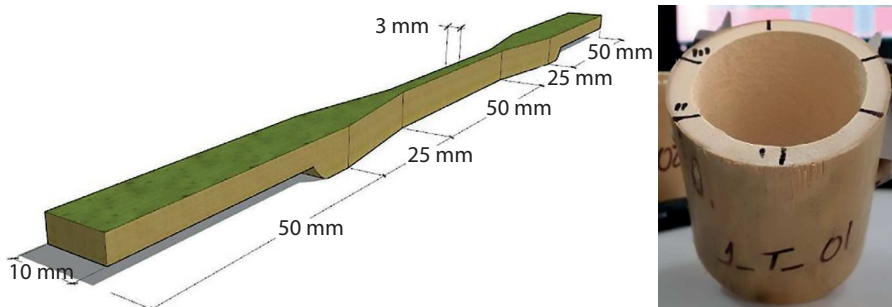
O metaxilema apresenta um diâmetro maior que o protoxilema. Os vasos do floema têm ainda menor dimensão. Do ponto de vista da engenharia, é importante conhecer os diâmetros e distribuição dos vasos ao longo da espessura da parede.

### 3. Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas do bambu são influenciadas principalmente por fatores como: espécie, idade do colmo, condições do solo e climáticas, época de colheita, teor de umidade e localização das amostras, com respeito ao comprimento do colmo, presença ou ausência de nós nas amostras testadas e tipo de teste realizado (GHAVAMI, 2005; CULZONI, 1986; MOREIRA, 1991). Como já citado, essas propriedades variam segundo as três direções: longitudinal, radial e circunferencial. A resistência longitudinal é a preponderante, denominada resistência paralela às fibras.

Em virtude da orientação das fibras ser paralela ao eixo do colmo, o bambu resiste mais à tração do que à compressão. O módulo de elasticidade paralelo às fibras varia em função da posição do colmo. O nó do bambu é um ponto de descontinuidade de algumas fibras. Nele ocorrem mudanças que alteram a seção, havendo concentração de tensões, verificadas nos ensaios. Na Tabela 1, tem-se uma série de resultados alcançados por vários autores, que dão ideia da ordem de grandeza da resistência do bambu paralela às fibras. Convém citar que tais resultados foram obtidos com o bambu na umidade de equilíbrio com a atmosfera.

Nota-se que a resistência à tração do bambu paralela às fibras é alta. Já a resistência à compressão é, na maioria dos casos, cerca de 30% menor que a resistência à tração. Na Tabela 2, tem-se resultados atingidos por diferentes pesquisadores. Os corpos de prova usados para medição das resistências à tração e à compressão paralela às fibras podem ser vistos na Figura 19. No teste de compressão, a altura é igual ao diâmetro, a duas vezes o diâmetro e até 3 vezes o diâmetro, para menores diâmetros, colocação de *clip gauges* – grampos que medem deformação.



**Figura 19.** Corpos de prova para medição das resistências à tração e à compressão.

**Tabela 1.** Resistência à tração do bambu paralela às fibras em MPa obtida por diferentes autores – adaptado de (GOME NETO, 2017; MURAD, 2011).

	Bv	Bv (2)	Bv (3)	Gsp	Gw	Ga	Gs	Dg (1)	DG (2)	Dg (3)
Base com nó	94,2		161,7	86,5	72,2	69,9	109	103	109	107
Meio com nó	87,9	94,3	155,3	73,5	-	82,6	-	118	170	144
Topo com nó	91,9		145,3	91,2	-	64,3	116	114	119	114
Média	91,3	94,3	154,1	83,7	72,2	72,3	112,5	111,7	132,7	121,7
Desvio padrão das médias	3,15	-	8,27	9,17	-	9,38	4,95	7,77	32,72	19,66
Coefficiente de variação	3,45%	-	5,36%	10,95%	-	12,98%	4,40%	6,96%	24,66%	16,16%
Base sem nó	112		-	239	256	93,4	143	240	159	147
Meio sem nó	111,9	117,9	-	228	-	95,8	-	250	224	188
Topo sem nó	106,5		-	210	-	116	151	247	147	158
Média	110,1	117,9	-	225,7	256	101,7	147	245,7	176,7	164,3
Desvio padrão das médias	3,18	-	-	14,64	-	12,41	5,66	5,13	41,43	21,22
Coefficiente de variação	2,88%	-	-	6,49%	-	12,20%	3,85%	2,09%	23,45%	12,91%

**Tabela 2.** Resistência à compressão do bambu paralela às fibras em MPa obtida por diferentes autores.

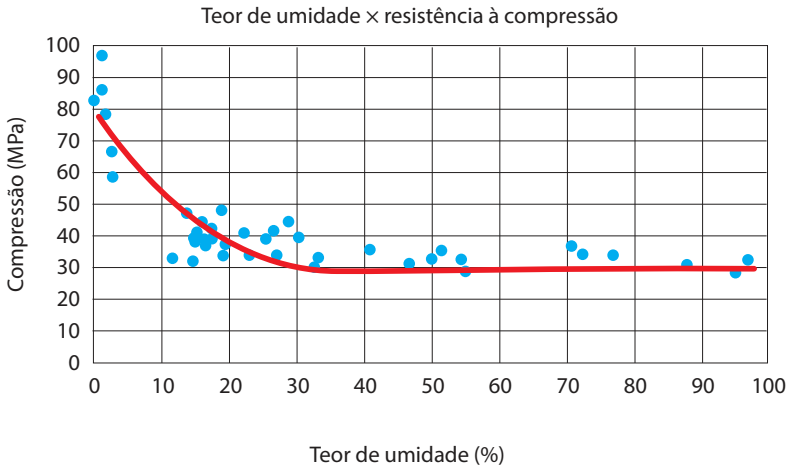
Região do colmo	Bv*	Bv*(2)	Bv*(3)	Gspp	Gw	Ga	Gs	Dg(1)	DG(2)
Base sem nó		51,68	56,5	44	54,5	28,4	50,6	68,5	72,6
Base com nó		49,9	-	43,4	37,3	25,3	36,4	59,1	71,4
Meio sem nó		51,68	-	47,7	-	31,8	-	70,8	78,8
Meio com nó	54,8	49,9	-	43,6	-	28,4	-	65,4	72,7
Topo sem nó		51,68	-	54,4	-	25,3	45	71,5	96,8
Topo com nó		49,9	-	41,3	-	31,8	35	65,6	75,5
Média	54,8	50,8	56,5	45,7	45,9	28,5	41,8	66,8	78
Desvio padrão das médias	5,08	1,26	-	4,73	12,16	2,91	7,37	4,55	9,6
Coefficiente de variação	9,26%	2,48%	-	10,33%	26,50%	10,20%	17,66%	6,81%	12,32%

Fonte: Adaptado de Murad (2011).

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

No que diz respeito ao módulo de elasticidade, ele varia entre as diferentes espécies de 8 GPa e 25 GPa. Para uma mesma espécie, o módulo de elasticidade à tração é maior do que o módulo à compressão.

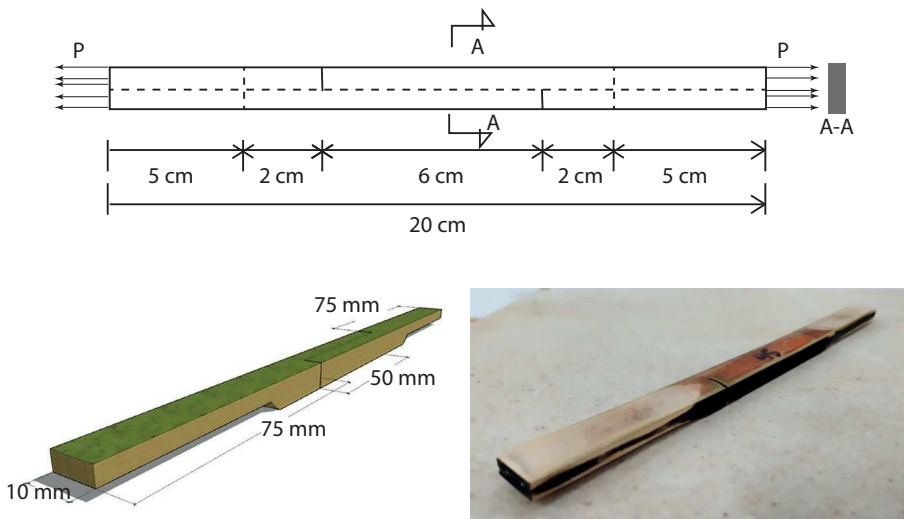
Na Figura 20, vê-se a influência da umidade do corpo de prova na resistência à compressão do *Bambusa vulgaris* (GOME NETO, 2017). Nota-se que, quando a umidade é muito baixa (material seco em estufa), a resistência aumenta significativamente. Depois dos 30%, ela praticamente se estabiliza. Esse percentual de umidade além do qual a resistência se estabiliza é o ponto de saturação das fibras, que teria um valor teórico de 33%. Contudo, o bambu tem sílica e cera na superfície, que dificultam a saturação de todas as fibras, de forma que esse valor pode ficar menor. Cada monômero de celulose tem 3 oxidrilas, que podem capturar 3 moléculas de água. A razão do peso molecular de 3 moléculas de água para um monômero de celulose é 33%. Essa é a água de constituição ou impregnação. Ao perder água de constituição, o bambu sofre retração de suas dimensões, e inchamento, quando absorve água de constituição. Acima do ponto de saturação, tem-se a água livre.



**Figura 20.** Variação da resistência à compressão paralela às fibras com o teor de umidade do bambu (GOME NETO, 2107).

Outra propriedade mecânica de interesse na engenharia é a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras. Nas ligações com parafusos ou com pinos, ela é determinante. Na Tabela 3, tem-se resultados obtidos com o *Bambusa vulgaris* (GOME NETO, 2107).

Na Figura 21, vê-se o corpo de prova utilizado para tal.



**Figura 21.** Corpo de prova para ensaios de cisalhamento paralelo às fibras.

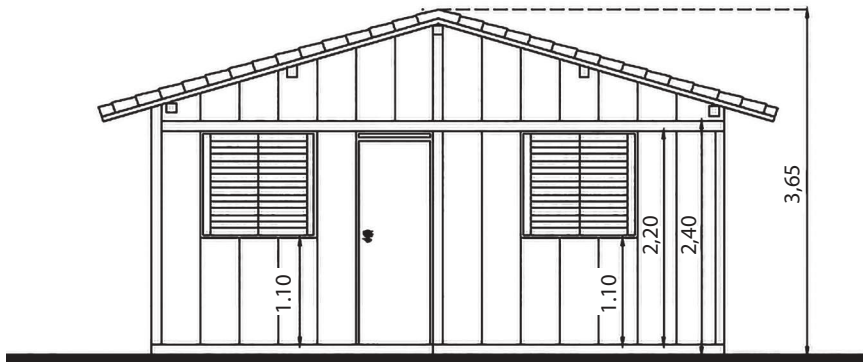
**Tabela 3.** Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras do *Bambusa vulgaris*.

	Com nó (MPa)	Sem nó (MPa)	Umidade (%)
Base	5,6	4,9	11,0%
Meio	6,7	4,4	11,1%
Topo	7,0	4,1	10,3%
Média	6,4	4,4	10,8%
Desvio padrão	1,99	1,17	0,98%
Coefficiente de variação	31,10%	26,43%	9,06%

Quando a resistência está muito baixa em bambus com umidade de equilíbrio da ordem de 10 %, há forte indício de bambus novos. Bambus estruturais devem ser colhidos com idade maior que 3 anos. Assim, os colmos devem ser etiquetados logo que nascidos e colhidos nessa idade ideal. Como em todos os anos há novas brotações, o corte nunca descaracteriza o bambuzal, mantendo as suas folhagens e evitando, com isso, erosões eólicas e pluviais. Mal se percebe o corte dos bambus maduros, que corresponde também a uma poda da gramínea, fortalecendo o rizoma e os novos bambus. Uma silvicultura completamente diferente de uma árvore. Bambu não é árvore e não pode ser confundido com árvore. O corte parcial dos bambuzais é necessário para o fortalecimento do rizoma.

#### 4. Painéis Modulares Estruturais de Bambu

Um interessante uso estrutural do bambu pode ser na forma de painéis modulares pré-fabricados, com encaixes. Com eles, pode-se fazer construções como a da Figura 22, com grande velocidade.

**Figura 22.** Proposta de construção com painéis modulares de bambu (SOBRINHO et al., 2012).

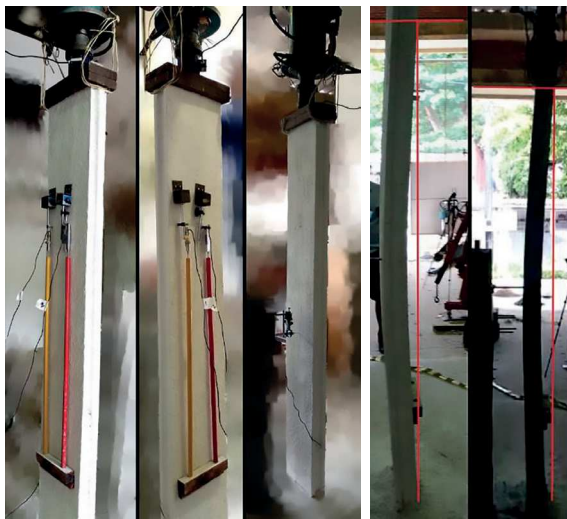
Os painéis são compostos por colmos inteiros paralelos, envolvidos por um microconcreto de baixa rigidez (Figura 23), tendo, em sua composição, resíduos da fabricação de sandálias (etileno vinil acetato-EVA) ou espuma de poliestireno e fibras de coco. Isso permite ao composto cimentício acompanhar as deformações do bambu sem danos entre eles.



**Figura 23.** Painéis modulares estruturais de bambu (GOME NETO, 2107).

O desempenho estrutural é muito bom e, na Figura 24, pode-se notar a grande flexibilidade do conjunto. Na parte direita da Figura 24, o painel apresenta uma flecha lateral significativa, mas, retirado o carregamento, voltou-se praticamente à configuração inicial, com pequena deformação permanente.

Essas peças também podem servir de lajes de cobertura.



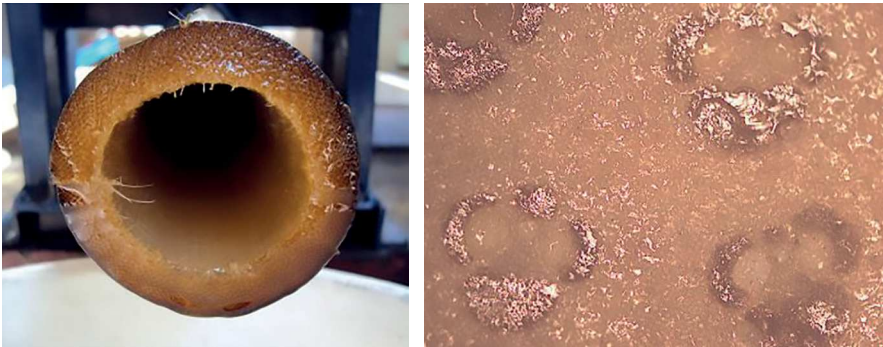
**Figura 24.** Ensaios de painéis modulares de bambu: notar a deformabilidade, à direita.

As cargas máximas suportadas pelos painéis atingiram valores por volta de 120 kN. Considerando-se que o painel de 10 cm de espessura tem apenas 40 cm de largura, isso corresponde a 300 kN/m. Tal capacidade de carga capacita o painel como estrutural, vendo-se nele um grande potencial.

## 5. Impregnação do bambu com resinas poliméricas

Como se viu no item 2.2 (Figuras 16 e 17), o bambu apresenta muitos vazios. Dessa característica, surgiu então a ideia de se preencher os vasos com resinas poliméricas (SOBRINHO et al., 2012; ORTIZ, 2017).

Os primeiros estudos usaram uma resina (80 % de estireno + 20 % de metilmetacrilato), e um equipamento que sob pressão (SOBRINHO et al., 2012) empurrava a resina para o interior do colmo. Conseguiu-se sucesso (Figura 25) em porções de colmo com nó apenas na extremidade por onde estava sendo aplicada a resina. A espécie utilizada foi o *Bambusa vulgaris*.

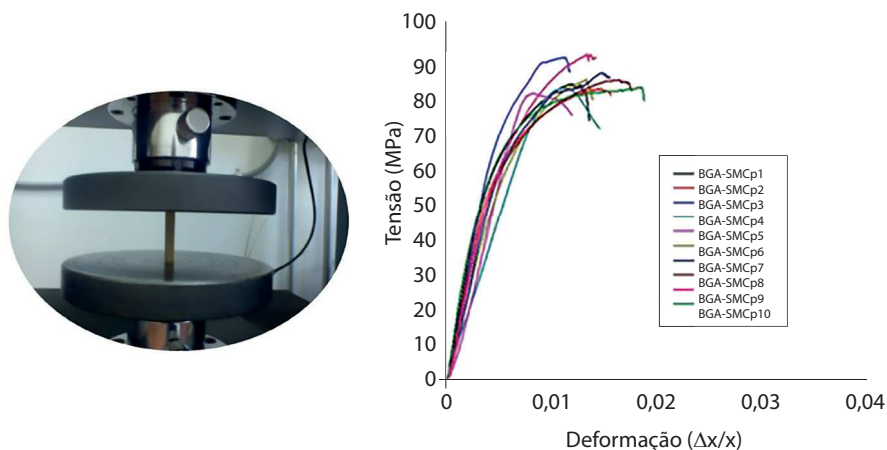


**Figura 25.** Trecho de colmo de bambu impregnado.

Em uma segunda etapa, foram estudadas resinas mais apropriadas e, após muitos testes, chegou-se à conclusão que é conveniente aplicar-se um pré-tratamento com glutaraldeído, seguido da impregnação com poli (estireno-co-metacrilado de metila). Para tanto, foi usado um processo de vácuo em pequenas amostras, considerando-se a norma ASTM 143-09 *Standard test methods for small clear specimens of timber*.

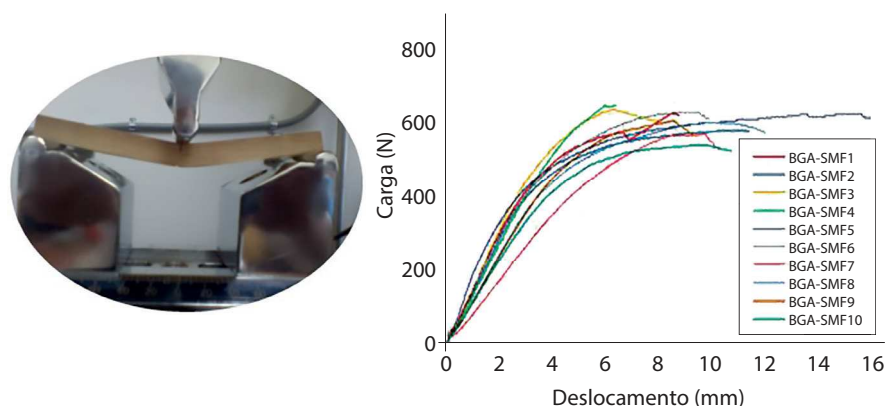
Pôde-se concluir que foram aumentadas as resistências à tração, à compressão, à flexão, além das variações dimensionais e da durabilidade, no que diz respeito ao ataque do inseto *Dinoderus minutus*.

Na Figura 26, vê-se a curva tensão-deformação de pequenas amostras de bambu impregnadas com os produtos acima descritos. Considerando o valor médio das resistências obtidas, elas passaram de 56 MPa para 85 MPa, ganho de cerca de 50%.



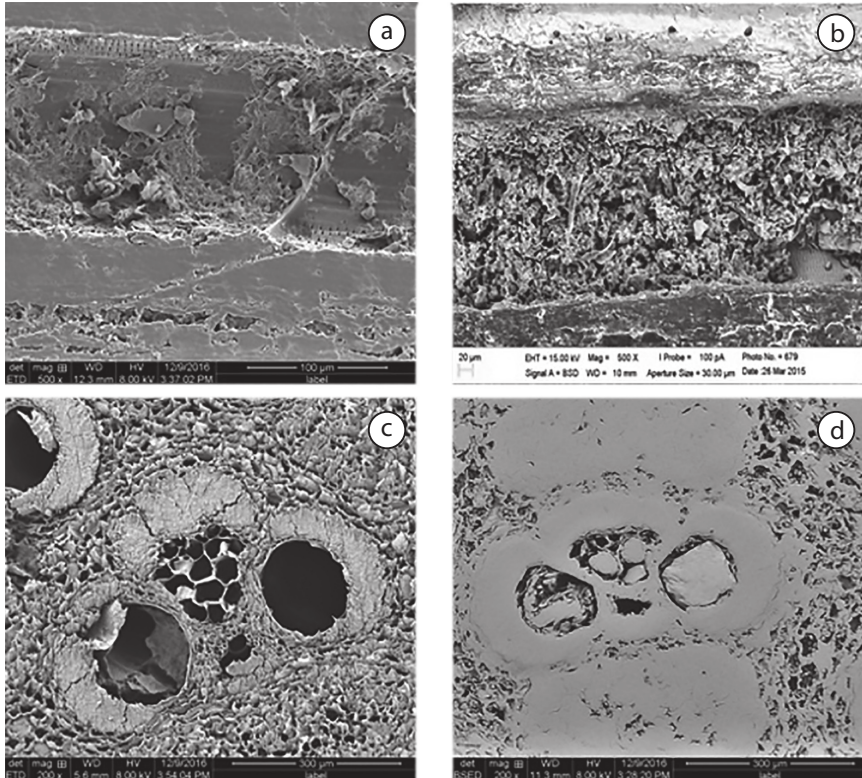
**Figura 26.** Ensaio de compressão em pequenas amostras e curvas tensão-deformação do bambu impregnado (ORTIZ, 2017).

Na Figura 27, vê-se o ensaio de flexão e as curvas obtidas com o bambu impregnado. Passou-se de cerca de 100 MPa para 118 MPa. O módulo de elasticidade também foi aumentado com o preenchimento de parte dos vazios por resina.



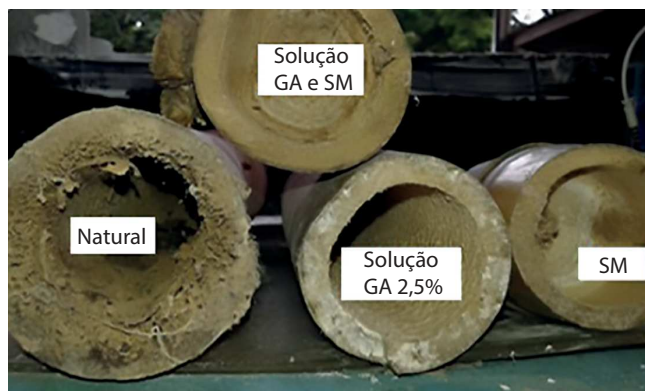
**Figura 27.** Ensaio de flexão em pequenas amostras e curvas carga-flecha do bambu impregnado (ORTIZ, 2017).

Na Figura 28, podem ser vistos cortes que mostram o metaxilema do bambu. À esquerda, tem-se o bambu natural; à direita uma amostra em que foi feita a impregnação. Pode-se notar que os vasos recebem a resina, mas o preenchimento deles não é perfeito, aparecendo ainda vazios.



**Figura 28.** Microscopia do bambu: a- corte longitudinal do metaxilema bambu natural; b - idem bambu impregnado; c- corte transversal da fibra bambu natural; d – idem bambu impregnado (ORTIZ, 2017).

Um efeito muito benéfico da impregnação é a imunização do bambu contra insetos. Um teste foi feito durante período de seis meses, expondo-se bambus no estado natural e impregnados à presença de insetos *Dinoderus minutus*, conhecido como caruncho do bambu. Em pouco tempo, os primeiros já estavam completamente deteriorados, ao passo que os segundos não sofreram nenhum ataque (Figura 29).



**Figura 29.** Bambus impregnados: imunes aos insetos.

## 6. Considerações Finais

O que foi apresentado demonstra que o bambu tem um potencial para ser considerado material de construção para o novo milênio.

Macroestruturalmente, os colmos de bambu têm a forma tronco-cônica, e um parâmetro usado para seu uso nas estruturas é a conicidade, ou seja, relação entre o maior e o menor diâmetro dividido pelo comprimento do trecho do colmo analisado. Essa grandeza é limitada a 0,67%.

Os colmos apresentam diafragmas nos nós, cuja distância varia de acordo com a espécie e com a posição ao longo do colmo, tendo seus valores máximos na parte central.

Ele apresenta muitos vazios, os maiores deles são os vasos condutores de seiva, chamados metaxilema. As fibras são orientadas longitudinalmente, em decorrência disso as maiores resistências e módulos são paralelos às fibras.

As resistências do bambu são compatíveis com as mais diversas aplicações de engenharia. O módulo de elasticidade, como de todo material vegetal, é mais baixo que o do aço ou do alumínio, por isso possui maior flexibilidade.

A aplicação do bambu com reforço em painéis pré-fabricados estruturais apresenta grande potencial. A capacidade de carga é elevada e o comportamento até as vizinhanças da ruptura é adequado, sem destacamento do microconcreto que o envolve.

A impregnação de resinas poliméricas nos vasos do bambu mostrou que são melhoradas as propriedades de resistência, estabilidade dimensional e durabilidade do material, credenciando o bambu como material de construção para o século XXI.

## Referências

BARBOSA, N.P.; GHAVAMI, K.; MOREIRA, L.E. Proposta de Norma, Projeto de Estruturas de Bambu – **Proceedings...**, 2016, UFPB.

CULZONI, R.A.M. **Características dos Bambus e sua utilização como material alternativo no concreto**. Dissertação (Mestrado) – PUC-Rio, p.134, 1986

GHAVAMI, K. **Engineering Properties of Entire Bamboo Culm of Species Guadua**: Contribution to a Sustainable Development, Bamboo Lab, Spain, ISBN 84-934672-0-0, p. 32-52, 2005.

GHAVAMI, K., MARINHO, A.B. **Determinação das propriedades dos bambus das espécies: Mosó, Matake, Guadua angustifolia, Guadua tigoara e Dendrocalamus giganteus** para utilização na engenharia. Publicação – RMNC Bambu 01/2001 do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. 53p.

GHAVAMI, K.; TOLEDO FILHO, R. D. Desenvolvimento de materiais de construção de baixo consumo de energia usando fibras naturais, terra e bambu. **Revista Engenharia Agrícola**. Publicação Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, v. 2, p. 1-19, 1992.

GOME NETO, J.A. **Painel modular intertravado de matriz cimentícia com reforço estrutural de *Bambusa vulgaris***. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. 2017. 131p.

MBUGE, D.O. **Mechanical Properties of Bamboo (*Bambusa vulgaris*) Grown in Muguga, Kenya**. Tese (Doutorado) – University of Nairobi, 2000.

MOREIRA, L.E. **Desenvolvimento de Estruturas Treliçadas Espaciais de Bambu.** Dissertação (Mestrado) – PUC-Rio, 1991

MURAD, J.R.L. **As propriedades físicas, mecânicas e meso-estrutural do bambu *Guadua weberbaueri* do Acre.** Dissertação (Mestrado) – PUC-Rio, 2007.

MURAD, J.R.L. **Estudo experimental das propriedades físicas, mecânicas e aplicações estruturais do bambu *Guadua spp* de Assis Brasil – AC.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal Fluminense. Rio de Janeiro: Niterói, 2011.

ORTIZ, S.R. **Efeito da impregnação em polímeros sobre as propriedades mecânicas do *Bambusa vulgaris*.** Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

PEREIRA, M.A.R. **Projeto bambu: manejo e produção do bambu gigante (*Dendrocalamus giganteus*) cultivado na Unesp de Bauru – SP e determinação de características mecânicas de ripas laminadas.** In: Seminário Nacional de Bambu: estruturação da rede de pesquisa e desenvolvimento. 13 a 15 de setembro, Brasília, D.F., p. 91-103, 2006b.

SILVA, O.F. **Estudo sobre a substituição do aço liso pelo *Bambusa vulgaris*, como reforço em vigas de concreto, para o uso em construções rurais.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alagoas, 2007.

SOBRINHO, A. et al. **Impregnation of *Bambusa Vulgaris* with Polymeric Resins.** Key Engineering Materials, v. 517, pp. 27-33, 2012. Trans Tech Publications, Switzerland doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.517.27

## ANEXO

### A1 Considerações Sobre a Proposta de Norma Brasileira de Projeto de Estruturas de Bambu

A norma brasileira está dividida em duas partes:

- Estruturas de bambu: Parte 1 – Projeto;
- Estruturas de bambu: Parte 2: Determinação das propriedades físicas e mecânicas.

#### A2.1 Parte 1 – Projeto

Na Parte 1, diferentemente da norma colombiana que utiliza o método das tensões admissíveis, a brasileira trabalha com o método dos coeficientes parciais aos estados limites.

Enquanto a norma colombiana trata apenas da espécie *Guadua angustifolia*, a brasileira considera bambus de diferentes espécies.

Como no Brasil os sismos são praticamente desprezíveis, a Norma não inclui requisitos exigíveis para evitar os estados limites gerados por terremotos.

Ela também não se aplica a estruturas de bambu laminado colado, que devem estar de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 1997), nem a estruturas em que o bambu faz parte de compósitos, como, por exemplo, reforçando concreto ou gesso.

Entre os termos e definições que constam no item 3 da citada proposta de norma, convém destacar “conicidade” do trecho de colmo, o qual se define como a razão da diferença entre os diâmetros maior ( $D_{\max}$ ) e menor ( $D_{\min}$ ) nas extremidades do trecho e seu comprimento  $L$ . Multiplicado por 100, o resultado pode ser expresso em %:

$$\delta(\%) = \frac{100(D_{\max} - D_{\min})}{L} \quad (1)$$

Para fins estruturais, a conicidade do bambu foi limitada a 0,67%, pouco maior que a recomendação colombiana de 0,6%. Tal porcentagem foi

definida para que se possa considerar barras prismáticas com propriedades geométricas igual ao valor médio das seções extremas.

As condições ambientais serão levadas em conta na fase de projeto para se avaliar o significado delas em relação à durabilidade e se tomar providências adequadas de proteção dos materiais. Deve-se evitar que os colmos da estrutura de bambu fiquem expostos à incidência direta do sol por longos períodos durante o dia. Do mesmo modo, a incidência da chuva deve ser evitada.

Em nenhum caso, devem ser utilizadas estruturas de bambu quando a temperatura a que vão estar submetidas exceda 65°C.

Cuidados especiais devem ser tomados para prevenir falha nas ligações, causadas por deterioração do bambu, devido ao acúmulo de umidade, falta de ventilação em torno das juntas e ataque por insetos.

Quando se usarem conexões metálicas, estas devem ser de material resistente à corrosão ou receberem proteção contra esse desgaste.

Quando se colocar um colmo paralelamente a outro e existir contato direto entre eles, é preciso verificar se não há possibilidade de acúmulo de umidade nesse contato.

Cuidados especiais devem ser tomados para vedar os extremos dos colmos com massa de serra de bambu, pó de serra mesclada com cola ou algo equivalente.

### ***A2.1.1 Considerações Sobre o Dimensionamento***

Define-se, no âmbito deste trabalho, dimensionamento das estruturas de bambu como a escolha das dimensões dos colmos que atendam à segurança estrutural. Normalmente, indicam-se os valores mínimos requeridos para o diâmetro externo  $D_{\min}$  e a espessura da parede do colmo,  $t_{\min}$ .

Considera-se que a segurança está satisfeita quando, em uma seção crítica, a tensão de cálculo (obtida majorando-se as ações) é menor ou igual à correspondente resistência de cálculo (obtida minorando-se as resistências do bambu) ou, de maneira equivalente, quando o esforço solicitante de cálculo é menor ou igual ao esforço resistente de cálculo (esforço que aqui significa momento fletor, esforço cortante, esforço normal, momento de torção). A majoração das ações é feita segundo a norma brasileira *NBR 8681 Ações e*

*Segurança das Estruturas.* A minoração da resistência do bambu depende da solicitação em jogo.

A escolha das dimensões dos colmos pode ser feita a partir da igualdade entre a tensão solicitante de cálculo e a resistência correspondente de cálculo (ou da igualdade entre o esforço solicitante de cálculo e o esforço resistente de cálculo).

Na norma colombiana, já estão apresentadas diretamente as tensões admissíveis no *Guadua*, e os diversos coeficientes de modificação.

Na norma brasileira, as resistências à compressão, tração, cisalhamento, etc. devem decorrer do ensaio de corpos de prova extraídos dos colmos que vão ser empregados na obra. O valor característico das propriedades mecânicas do bambu é aquele que tem 5% de probabilidade de não ser atingido em determinado lote de bambu.

Assim, uma resistência característica genérica,  $f_k$ , pode ser dada por:

$$f_k = f_{0,05} = f_m - 1,645 \cdot s_d \quad (2)$$

Na qual:

$f_k$  = valor característico da resistência;

$f_m$  = valor médio;

$s_d$  = desvio padrão dos resultados da amostra.

Devendo-se ensaiar pelo menos 12 corpos de prova.

Já o valor de cálculo das propriedades mecânicas,  $f_d$ , é dado pela equação 3:

$$f_d = k_{\text{mod}} f_k / \gamma_m \quad (3)$$

Na qual:

$\gamma_m$  é o coeficiente de minoração das propriedades mecânicas, podendo ser tomado igual a 1,4 para dimensionamento e verificações nos estados limites últimos, salvo indicação contrária;

$k_{\text{mod}}$  é o coeficientes de modificação da resistência, dados conforme a norma brasileira de madeira NBR 7190 (ABNT,1997) por:

$$k_{\text{mod}} = k_{\text{mod},1} \cdot k_{\text{mod},2} \cdot k_{\text{mod},3} \quad (4)$$

$k_{mod,1}$  = coeficiente que depende do tipo de carregamento, dado na Tabela A1.

**Tabela A1.** Valores de  $k_{mod,1}$ .

Tipo de carregamento	$K_{mod,1}$
Permanente	0,7
Longa duração	0,8
Média duração	0,9
Curta duração	1,0
Instantânea	1,1

$k_{mod,2}$  = coeficiente que depende da umidade do ambiente no qual a estrutura vai estar inserida, dado por:

$k_{mod,2} = 1,0$  se  $UR < 65\%$ ;

$k_{mod,2} = 0,8$  se  $65\% < UR < 85\%$ ;

$k_{mod,2} = 0,6$  se  $UR \geq 85\%$ .

$k_{mod,3}$  = coeficiente que depende da qualidade (linearidade, presença de fissuras) do colmo, o que pode também ser função da espécie, do manejo do bambuzal, das fases por que passa após o corte. Pode-se adotar, para colmos secos em boas condições, sem defeitos visuais de fissuras ou furos de ataques de insetos, preferencialmente de plantações manejadas, os valores indicados na Tabela A2.

**Tabela A2.** Valores de  $k_{mod,3}$  para colmos secos sem defeitos visuais.

Espécie de bambu	$K_{mod,3}$
<i>Dendrocalamus giganteus</i>	1,0
<i>Dendrocalamus asper</i>	1,0
<i>Guadua angustifolia</i>	1,0
<i>Phyllostachys heterocyclus pubescens</i> -Mosó	1,0
<i>Phyllostachys bambusoides</i> -Matake	1,0
<i>Bambusa vulgaris</i>	1,0
<i>Bambusa tuldoides</i>	1,0

Bambus com defeitos visuais não devem ser aplicados estruturalmente. A prevenção a posteriori de fissuras com aberturas de rachaduras deve ser feita com bandagem compósita têxtil, colocada sobre os nós dos elementos, em bambus secos, ou com braçadeiras metálicas, caso os bambus estejam verdes.

Após a secagem dos bambus em serviço, as braçadeiras devem ser apertadas. A distância entre as braçadeiras ou bandagens, atentando-se para a necessidade de se saltar ou não nós, depende da qualidade da espécie de bambu quanto ao risco de rachaduras, que pode ser controlada pelo percentual de bambus que racham após a secagem até a umidade de equilíbrio com o meio, e da avaliação do técnico responsável pela obra que informará ao calculista sobre a qualidade do lote.

Admite-se, para o bambu, em tração ou em compressão, uma relação linear entre tensão e deformação até a ruptura. Um comportamento elástico pode também ser assumido.

### *A2.1.2 Propriedades Físicas do Bambu*

As propriedades físicas do bambu, como umidade, massa volumétrica e retração, são obtidas conforme a Parte 2 da referida Norma.

O momento de inércia de colmo simples,  $I$ , deve ser determinado da forma como se segue:

- Como a seção transversal é elíptica, o diâmetro externo médio de cada extremidade  $D_m$  é a média do maior diâmetro e do menor diâmetro, tomados visualmente.
- Como a espessura de parede varia numa mesma seção transversal, a espessura média de parede de cada extremidade  $t_m$  é a média entre a maior espessura e a menor espessura, tomadas visualmente.
- A partir desses valores, calcula-se o diâmetro médio do elemento  $\bar{D}$  e a espessura média de parede do elemento  $\bar{t}$ , como a média dos valores extremos, e trata-se a barra como prismática até um comprimento  $L = 65 \bar{D}$ , quando selecionadas nos trechos basal e médio do colmo, os quais têm uma razão de conicidade menor. Ver item 7.1.2.1.
- Elementos tirados do trecho superior do colmo podem exigir uma análise do elemento como tronco-cônica.
- O diâmetro interno médio do elemento é dado pela equação 5:

$$\bar{d} = \bar{D} - 2\bar{t} \quad (5)$$

O momento de inércia do elemento tratado como prismático deve ser calculado usando-se esses valores médios, pela equação 6:

$$I = \frac{\pi(\bar{D}^2 - \bar{d}^2)}{64} \quad (6)$$

Quando se empregam vários colmos para conformar um elemento estrutural (vigas compostas, pilares compostos), a inércia do conjunto é a soma das inércias individuais, a menos que se garanta um trabalho conjunto de todos os colmos, situação na qual a inércia poderá ser calculada como um percentual da inércia bruta obtida pelo teorema dos eixos paralelos. O deslizamento entre as seções na flexão é responsável por drástica redução do momento de inércia do conjunto, devido às deformações localizadas nas paredes do bambu nos pontos de conexão, já que as paredes são relativamente finas.

A área geométrica da seção transversal do colmo é dada por:

$$A = \pi(\bar{D}^2 - \bar{d}^2) / 4 \quad (7)$$

### *A2.1.3 Peças Fletidas*

Seções compostas com feixes de bambu amarrados entre si por fitas de aço devidamente apertadas funcionam com momento de inércia, que se caracteriza pela soma dos momentos de inércia de cada elemento, sem a aplicação do teorema dos eixos paralelos.

Seções compostas de bambus parafusados entre si devem levar em conta o diâmetro dos parafusos, a distância entre os parafusos ao longo da viga e a continuidade ou descontinuidade dos elementos que fazem a composição.

Como o bambu é mais resistente à tração que à compressão, o controle da segurança se faz pela tensão de compressão na flexão. Do mesmo modo, o módulo de elasticidade à tração é normalmente maior do que o módulo de elasticidade à compressão. Contudo, por simplificação, pode-se considerar a linha neutra coincidindo com o centroide da seção. Desse modo, o dimensionamento de vigas de bambu pode ser feito a partir das equações (8) e (10).

$$\sigma_{cd} = M_d / W \quad (8)$$

Com  $M_d$  sendo o momento solicitante de cálculo, obtido com a combinação normal de ações da NBR 8681.

$W$  é o momento resistente da seção transversal:

$$W = \frac{2I}{D} \quad (9)$$

A segurança está satisfeita se:

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

$f_{c0,d}$ , resistência de cálculo à compressão paralela à fibras, que deriva da expressão:

$$f_{c0,d} = k_{mod} \cdot f_{c0,k} / \gamma_m \quad (11)$$

com  $\gamma_m = 1,4$

Na norma colombiana, é enfatizada a importância das deflexões das peças fletidas. Um colmo único exercendo a função de viga é pouco eficiente por conta do relativamente baixo valor da rigidez à flexão, por isso, normalmente, o fator limitante no projeto é a flecha das vigas ou deflexão das colunas comprimidas e não a resistência do bambu. O uso de vigas com mais de um colmo ajuda a suprir essa deficiência.

A flecha máxima da viga a longa duração deve ser calculada e comparada com o valor limite. Considera-se que o estado limite de serviço por deflexões excessivas é atingido quando a deflexão máxima do elemento estrutural chega a  $L/100$ . A curvatura inicial deve ser levada em conta no cálculo da flecha. A norma colombiana considera valores menores e o local da construção onde o elemento está inserido. Portanto, cabe ao técnico responsável verificar se a flecha máxima traria danos a possíveis elementos frágeis fixos à viga deformada. A questão estética é menos importante porque uma flecha adicional ao bambu, devido ao carregamento, não choca tanto quanto uma flecha de um elemento prismático de aço ou concreto, que tem uma geometria bastante regular. A estética das estruturas de bambu difere bastante da estética das estruturas com barras prismáticas.

Por conta da fluência do bambu, por *default*, considera-se que a flecha ao longo do tempo, devido às ações permanentes, atinja um valor 1,5 vezes

maior que a flecha inicial, obtida usando-se a combinação quase permanente de ações da NBR 8681.

Quando se utiliza mais de um colmo para compor a viga, eles devem estar conectados com parafusos, cintas metálicas ou qualquer outro elemento que garanta o trabalho em conjunto. Esses conectores devem ser projetados para resistir às forças que aparecem nas uniões, e, nos entrenós em que se localizam, devem ser tomadas medidas para evitar falha por corte paralelo às fibras ou esmagamento do colmo.

O espaçamento dos conectores não pode exceder a:

- três vezes a altura total da viga;
- um quarto do vão.

Tal valor correspondente a:

$$s = 7.L / V \quad (12)$$

com:

$s$  = espaçamento dos conectores em mm;

$L$  = vão da viga em mm;

$V$  = esforço cortante de serviço em kN.

O primeiro conector deve situar-se a uma distância de 150 mm, medida a partir da extremidade da viga.

Todos os entrenós de vigas de seção composta que são atravessados ou presos por conectores devem ser preenchidos com argamassa de cimento, obedecendo a uma relação volumétrica de 1:3 e, preferencialmente, usando-se aditivo plastificante ou serragem de bambu ou de madeira com cola ou outro material composto semelhante.

Cargas ou reações de apoio devem atuar nos nós ou tão próximo a eles quanto possível.

As extremidades apoiadas que não coincidem com um nó devem ser preenchidas por meio de algum material compósito para aumentar a resistência ao amassamento.

Nos pontos em que existem cargas concentradas, medidas devem ser tomadas para evitar falha por corte paralelo às fibras ou amassamento do colmo.

As tensões de corte em vigas são normalmente muito pequenas. Porém, a tensão de cisalhamento localizada na linha neutra, nas proximidades do apoio, deve ser verificada, se o comprimento da viga é menor que 25 vezes o diâmetro de sua extremidade.

No caso de vigas compostas por feixe de mais de um colmo, o esforço cortante em cada um deles pode ser considerado como o valor total daquele esforço dividido pelo número de colmos. No caso de vigas compostas de colmos ligados por parafusos, os estados limites acontecem na interface dos elementos, principalmente nas extremidades em que se tem o maior deslizamento, com o esmagamento das paredes do bambu nessas interfaces.

A segurança está satisfeita se:

$$\tau_d \leq f_{v0d} \quad (13)$$

com:

$$\tau_d = 2 \cdot V_d / (\pi \cdot \bar{D}t) \quad (14)$$

$V_d$  é o esforço cortante de cálculo (obtido com a combinação normal de ações).

A resistência característica ao cisalhamento paralela às fibras,  $f_{v0,k}$ , na falta de dados experimentais, pode ser tomada igual a:

$$f_{v0,k} = 0,11 f_{c0,k} \quad (15)$$

e

$$f_{v0d} = k_{mod} \cdot f_{c0,k} / \gamma_m \quad (16)$$

com  $\gamma_m = 1,4$

A segurança ao esmagamento das paredes do colmo será atendida se a força de cálculo obtida a partir da combinação normal de ações satisfaz a:

$$F_d \leq [2 \cdot f_{c90,d} \cdot t \cdot a] / (3 \cdot D / t) \quad (17)$$

$F_d$  = força concentrada de cálculo aplicada;

$f_{c90,d}$  = resistência à compressão de cálculo perpendicular à fibra, dado com  $\gamma_m = 1,4$ ;

$t$  = espessura da parede;

$a$  = comprimento de contato da força aplicada com o colmo;

$D$  = diâmetro externo do bambu no local de aplicação da carga.

Todos os colmos de bambu submetidos a esforços de compressão perpendicular às fibras devem ter a parte interna em que há aplicação da força concentrada preenchidas com argamassa de cimento ou resina expansiva de alta densidade. Caso essa providência não seja tomada, adotar na equação 16,  $\gamma_m = 3$ .

$$f_{c90,d} = k_{mod} \cdot f_{c90,k} / \gamma_m$$

Devem ser evitadas perfurações nas vigas. Caso sejam necessários, os furos devem constar no projeto, observando-se o que se segue:

- a) Não devem ser feitos horizontalmente, na altura da linha neutra. Em caso obrigatório, deve-se tomar providencias para evitar falha por cisalhamento paralelo às fibras e adotar:

$$f_{v0,d} = k_{mod} \cdot f_{v0,k} / \gamma_m$$

com  $\gamma_m = 1,8$

- b) Caso existam furos na zona tracionada de elementos estruturais, a resistência à tração de cálculo paralela às fibras,  $f_{t0,d}$ , a considerar é:

$$f_{t0,d} = k_{mod} \cdot f_{t0,k} / \gamma_m$$

com  $\gamma_m = 1,8$

- c) O diâmetro do furo deve ser de no máximo 25 mm.

Para vigas nas quais atuem cargas axiais e de flexão, a interação das tensões aplicadas deve ser considerada.

A norma colombiana adota um coeficiente de modificação que leva em conta a estabilidade lateral. Tal coeficiente depende da relação altura/largura ( $d/b$ ) da viga composta, variando de 1,0 para  $d/b = 1$  até 0,87 para  $d/b = 5$ .

#### **A2.1.4 Peças Comprimidas**

Para pilares, devem ser selecionados os colmos mais retos possíveis, com imperfeição acidental  $e_a \leq \frac{L}{200}$

A esbeltez,  $\lambda$ , máxima tolerada para um pilar de bambu é 240. Esse índice pode ser obtido pela expressão:

$$\lambda = (L / i) \quad (18)$$

com o raio de giração  $i$ , dado por:

$$i = (I / A)^{1/2} \quad (19)$$

O bambu sempre possui imperfeições iniciais, de forma que, trabalhando como pilar, está sujeito à flexo-compressão. A segurança é controlada pela tensão de compressão máxima, segundo a expressão:

$$\sigma_{Nd} / f_{co,d} + \sigma_{Md} / f_{co,d} \leq 1 \quad (20)$$

Nessa expressão:

$$\sigma_{Nd} = N_d / A \quad (21)$$

é a tensão de compressão devida ao esforço normal de cálculo;

$N_d$  o esforço normal de cálculo obtido com a combinação normal de ações da NBR 8681;

$A$  = área da seção transversal do bambu, dada em 8.4.2;

$\sigma_{Md}$  é a tensão de compressão devida ao momento fletor de cálculo, igual a  $\sigma_{cd}$  da expressão (8) com o momento de cálculo dado por:

$$M_d = N_d \cdot e / (1 - N_d / F_E) \quad (22)$$

Sendo:

$$e = e_i + e_a + e_c \quad (23)$$

A excentricidade total é, dessa forma, composta pela soma da excentricidade inicial ( $e_i$ ), da excentricidade das imperfeições acidentais ( $e_a$ ) que pode ser medida e da excentricidade devida à fluência do bambu ( $e_c$ ), dadas pelas expressões:

$$e_i = M_{1d} / N_d \geq /20 \quad (24)$$

$M_{1d}$  = momento devido à excentricidade acidental.

$$e_a \geq L / 200 \quad (25)$$

caso não seja medida.

$$e_c = (e_{qp} + e_a)[2,718^\alpha - 1] \quad (26)$$

com:

$e_{qp}$  = excentricidade com momento fletor ( $M_{qp}$ ) e esforço cortante ( $N_{qp}$ ), obtidos usando-se a combinação quase permanente de ações da NBR 8681.

$$e_{qp} = M_{qp} / N_{qp} \quad (27)$$

$$\alpha = \varphi \cdot N_{qp} / [F_E - N_{qp}] \quad (28)$$

$\varphi$  = coeficiente de fluência do bambu aqui considerado igual a 0,8;

$F_E$  = força de Euler dada por:

$$F_E = (\pi^2 \cdot E_{co,d,l}) / L_0^2 \quad (29)$$

Peças com esbelteza  $\lambda \leq 70$  submetidas à compressão dispensam a consideração da fluência do bambu.

No caso de colunas compostas por mais de um colmo, tem-se:

- em colmos sem ligação entre si, o momento de inércia do pilar é a soma das inércias individuais;
- quando eles são unidos ao longo do comprimento, o momento de inércia do conjunto pode ser calculado pelo teorema de Steiner dos eixos paralelos.

$$I = \sum I_i + \sum A_i \cdot d_i^2$$

- com  $I_i$  e  $A_i$  representando o momento de inércia e a área do  $i$ ésimo colmo e  $d_i$  a distância do respectivo centróide ao centróide conjunto de colmos;
- quando os colmos estão afastados entre si, conectados não continuamente, vale a equação:

$$I = \sum A_i \cdot d_i^2$$

Já a norma colombiana classifica as colunas em curta, intermediária e longa. A limitação da esbeltez máxima é de  $\lambda = 150$ .

A proposta de norma trata ainda de ligações, estruturas reticuladas, treliças e controle de qualidade. Reconhece-se que a norma colombiana trata as ligações de maneira mais completa, apresentando desenhos que não constam na proposta brasileira.

No que diz respeito às estruturas reticuladas e treliças, a menos que um modelo mais geral seja usado, elas devem ser representadas, para fins de análise, por elementos lineares conectados entre si.

As linhas que representam os elementos da estrutura devem estar dentro do perfil desses componentes, e, nos elementos externos, deve coincidir com o seu eixo. Elementos de viga fictícia podem ser usados para modelar as conexões excêntricas ou apoios. A orientação desses elementos deverá coincidir, tanto quanto possível, com a direção da força no elemento. Na análise estrutural, a não linearidade geométrica de um elemento comprimido (instabilidade por flambagem) poderá ser desconsiderada, se ela for levada em conta na verificação da resistência do elemento individual.

A análise de estruturas reticuladas e treliças deve ser feita a partir dos princípios conhecidos da mecânica. A partir deles, é feita a determinação das deformações dos elementos e das articulações. A influência de excentricidades de apoio e da rigidez da estrutura de suporte são levados em conta na determinação das forças e momentos nos elementos estruturais.

Se as retas que representam as barras dos elementos internos não coincidem com o seu eixo, a influência da excentricidade deve ser levada em conta na verificação da resistência desses elementos. Como o diagrama tensão-deformação para o bambu é linear até as vizinhanças da ruptura, as análises lineares dão bons resultados, se ligações parafusadas são usadas, apesar de os bambus não serem perfeitamente retos.

As extremidades de elementos estruturais que convergem numa ligação podem ser geralmente consideradas como livres para rotacionar.

Deslizamentos nas articulações devem ser levados em conta na verificação da resistência da estrutura, a menos que sua influência sobre a distribuição de forças internas e momentos possa ser considerada desprezível.

O travamento dos nós das treliças por mãos francesas ou contraventamentos em X é fundamental para a consideração dos comprimentos

livres de flambagem, iguais ao comprimento físico da peça. Caso uma das extremidades esteja livre para transladar, o comprimento de flambagem da barra deve ser considerado igual a  $2L$ .

A verificação da estabilidade lateral (fora do plano) dos elementos deve ser feita.

## A2 Análise Simplificada

Como uma alternativa à análise global, uma análise simplificada é permitida para treliças compostas por triângulos e retângulos que cumpram as seguintes condições:

- o módulo externo é composto por um único triângulo ou retângulo;
- uma parte da estrutura resistente está verticalmente abaixo do nó de apoio;
- a altura da treliça excede 0,15 vezes o vão no caso de uma treliça triangular, ou 0,10 vezes o vão no caso de uma treliça com módulo retangular.

As forças axiais nos membros devem ser determinadas admitindo-se que cada ligação entre os elementos é articulada. Momentos fletores em um elemento contínuo sobre uma junta devem ser determinados como se tal componente fosse uma viga ininterrupta apoiada nessa junta. Os efeitos da deflexão ou da fixação parcial da conexão devem ser considerados.

Um controle da qualidade passa pela conveniente classificação dos colmos de bambu a serem usados na estrutura.

Os colmos de bambu devem ser escolhidos e classificados de forma a garantir que suas propriedades sejam satisfatórias para uso na engenharia, e especialmente que as propriedades de resistência e de rigidez sejam confiáveis.

As regras de classificação devem ser baseadas em uma avaliação visual do bambu, ensaios não destrutivos de uma ou mais propriedades, ou ainda na combinação dos dois métodos.

Especial atenção será dada às propriedades como a idade, a conicidade do colmo, a linearidade, o comprimento dos entrenós, o conteúdo de umidade e a distribuição de nós.

O manual de garantia da qualidade deve abordar assuntos necessários ao programa de garantia de qualidade, incluindo o seguinte:

- Especificações de materiais, incluindo a entrada de material, inspeção e exigências de aceitação;

- Testes de inspeção de garantia da qualidade e procedimentos de aceitação;
- Frequência da coleta de amostras para inspeção;
- Procedimentos a serem seguidos em caso de não conformidade.

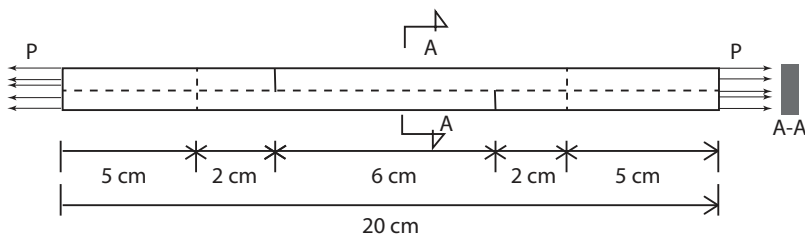
O manual de controle da qualidade deve conter um programa mínimo de ensaios necessário para manter a qualidade do produto.

O nível de controle selecionado será consistente com os valores de projeto e o uso previsto para o material.

Quando a análise dos dados indica que as propriedades do material estão abaixo do nível de controle exigido, o lote correspondente estará sujeito a reexame.

## A2.1 Parte 2 – Propriedades Físicas e Mecânicas

Nessa parte da norma, procurou-se manter os ensaios como propostos na ISO (ISO 2004b). Apenas em relação ao ensaio de cisalhamento paralelo às fibras, sugere-se um teste proposto por K. Ghavami, em que um corpo de prova prismático, tal como indicado na Figura 1, recebe dois cortes perpendiculares até o centro e é tracionado. Acontece então a ruptura na seção B-C. A força máxima dividida pela área de cisalhamento dá a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras.



**Figura 1.** Corpo de prova para ensaio de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras.

## A3 Considerações Finais

O bambu, material renovável, para ser difundido como material de construção tem necessariamente que dispor de normas técnicas como os demais materiais disponíveis no mercado. Poucos países dispõem

dessas normas, visto que na realidade só os materiais industrializados são considerados e ensinados nas escolas de engenharia e arquitetura. Com os problemas ambientais que ameaçam o planeta, renovou-se a procura por materiais energeticamente mais eficientes. Em consequência disso, houve o ressurgimento da construção com terra e construção com bambu. Uma das dificuldades de difundir o bambu como material de construção no Brasil decorre de sua pouca disponibilidade. No entanto, já surgiu no país a Associação Brasileira de Produtores de Bambu, e a expansão dos plantios está acontecendo. Também a propagação *in vitro* está se desenvolvendo e certamente em um futuro próximo o bambu estará disponível para atendimento de uma maior demanda, com preços competitivos em relação aos demais materiais estruturais. As abordagens técnicas deste texto deram apenas uma ideia inicial de como será a norma brasileira de estruturas de bambu, ainda em processo de estudos, crítica e complementação, podendo, portanto, sofrer alterações até o texto final que permitirá o uso oficial em todo o país.

## Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6120:** Cargas para o cálculo de estruturas de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro, 1980.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7190:** Projeto de estruturas de madeira – Procedimento. Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8681:** Ações e segurança das estrutura – Procedimento Rio de Janeiro,,2003
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6123:** Forças devidas ao vento em edificações – Procedimento. Rio de Janeiro, 2013.
- EL INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN – ICONTEC. **NSR 10.** Estructuras de madera y estructuras de guadua. Bogotá, 2010.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. **ISO 22156:** Bamboo – Structural design. 2004a.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. **ISO 22157:** Bamboo – Determination of physical and mechanical properties of bamboo. 2004b.