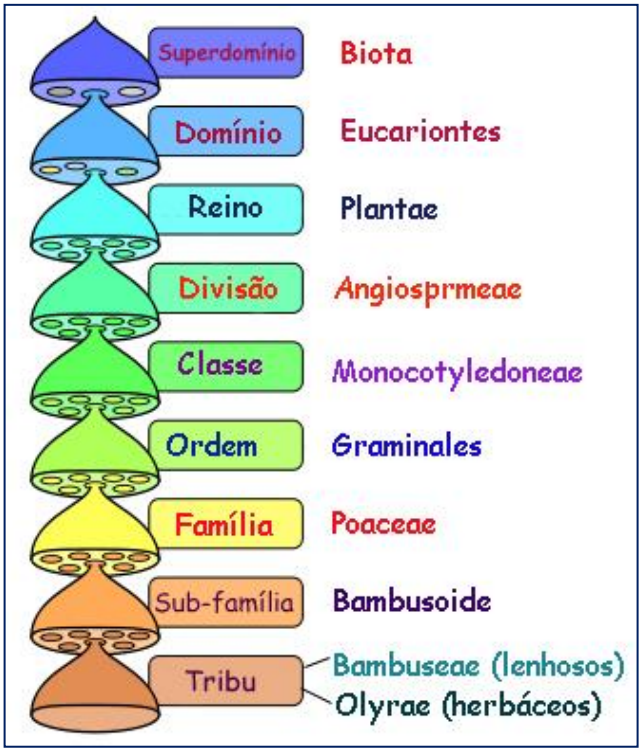
2
Revisão bibliográfica



Os bambus são umas gramíneas gigantes que pertencem à família Poaceae e à subfamília *Bambusoide*, formando parte da ordem *Graminales*, da classe *Monocotyledoneae* que é uma divisão das *Angiosprmeae* (figura 2.1). O bambu encontra-se em todos os continentes menos na Europa e na Antártida em toda a zona tropical da terra e em parte da zona subtropical.

Figura 2.1 - Classificação científica de bambu (modificado de [1])

Existem mais de 1600 espécies de bambu no mundo, 440 delas são nativas em América, 1000 espécies são da Ásia e Oceania e uma parcela pequena vem da África.

2.1
Morfologia de bambu

Morfologia é a parte da botânica que estuda a estrutura das plantas. A estrutura externa de bambu é formada por:

- rizomas e raízes
- colmos
- galhos
- folhas
- flores e frutos

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912748/CA

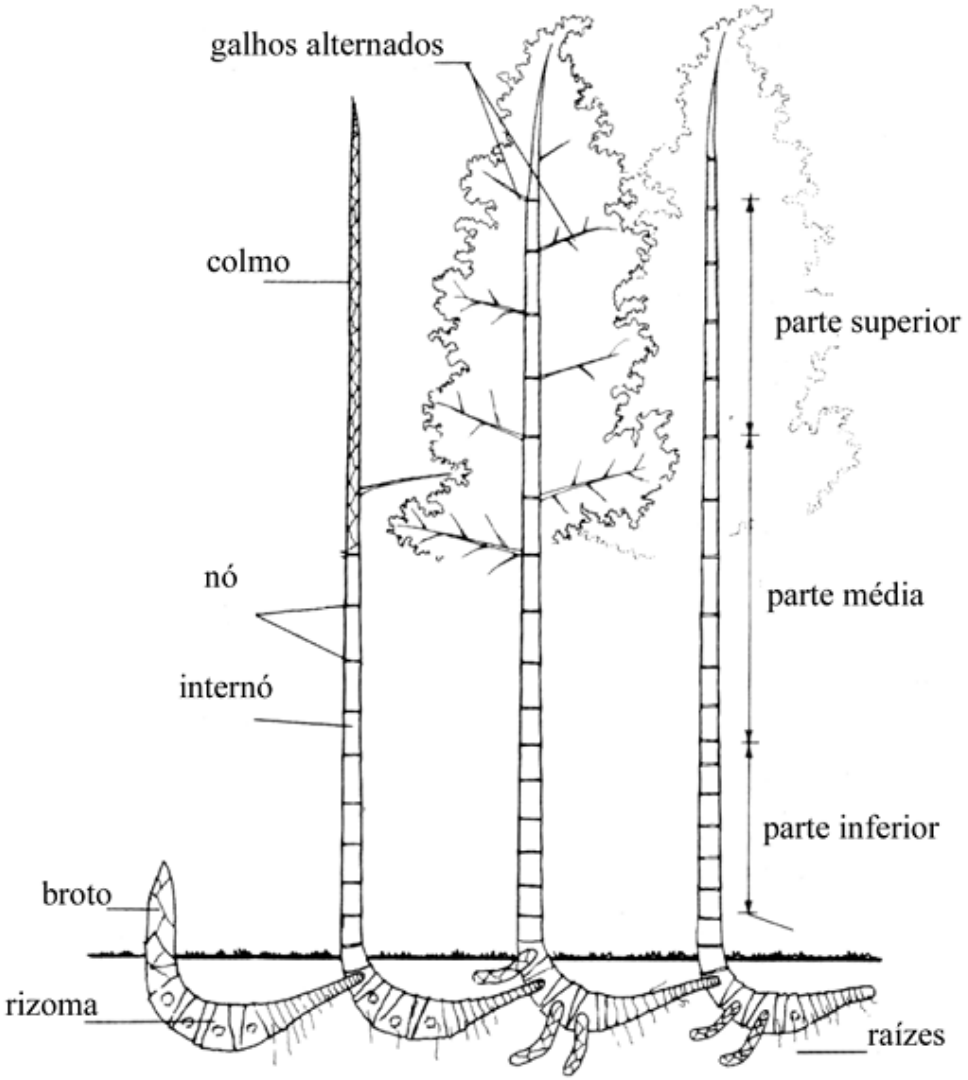


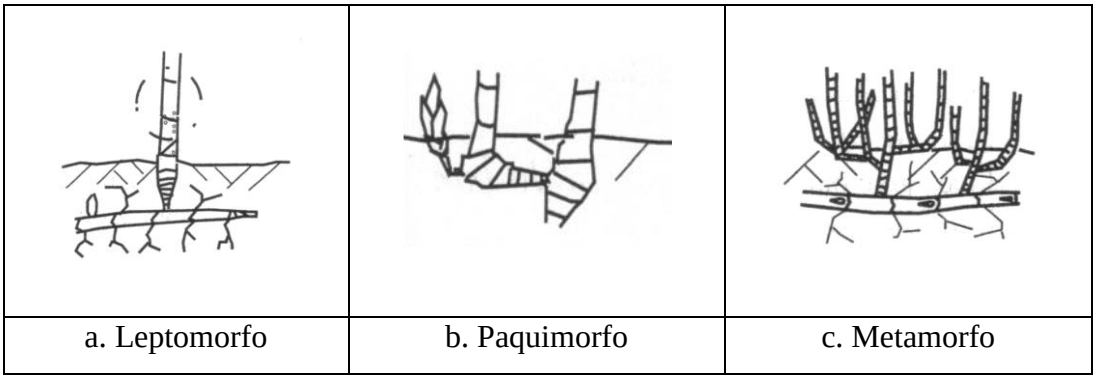
Figura 2.2 - Estrutura de bambu [2]

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912748/CA

2.1.1
Rizomas e raízes

O rizoma é o órgão vital na reprodução assexuada do bambu, que armazena e transporta nutrientes. O rizoma pode ser considerado como una fábrica ecológica subterrânea, de onde a cada ano saem novos colmos que vão se multiplicando. Ele é um caule subterrâneo composto de nó, interno, broto (figura 2.4) e uma ou mais raízes. Possuiu três padrões de ramificação em geral: o primeiro, chamado simpoidal, representa cada eixo sucessivo que se torna dominante e volta a se desenvolver; o segundo chamado monopodial, consiste num eixo dominante e eixos secundários derivados dele; o terceiro uma mistura dos outros dois, é conhecido como anfipodial.

O rizoma simpodial é também chamado de determinado, pois um número limitado de outros eixos é produzido a partir de um eixo matriz. Já o monopodial é considerado indeterminado, pois o eixo principal pode se desenvolver indefinidamente e continuar a produzir outros eixos adicionais. Simpodial e monopodial podem descrever o padrão de ramificações de qualquer parte da planta e não somente do sistema de rizomas. De acordo com a morfologia dos rizomas, existem três grandes tipos de bambu: leptomorfo, paquimorfo e metamorfo, que podem ser vistos na figura 2.3 [3].



a. Leptomorfo	b. Paquimorfo	c. Metamorfo

Figura 2.3 - Classificação das ramificações dos rizomas [4]

Figura 2.4 - Broto do bambu (Foto Joi Ito [1])

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912748/CA

2.1.2
Colmos

Os colmos formam a parte aérea da planta. Ele nasce do ápice do rizoma e tem seu eixo segmentado constituído de nó, interno, galho e folha [3]. Os colmos maduros são resultados de três processos: crescimento máximo do seu diâmetro, distensão dos internós e endurecimento através da lignificação [5]. O comprimento dos colmos de bambu varia enormemente com a espécie. Há espécies com colmos de alguns centímetros de altura e outras nas quais ele podem superar os 30 metros.

As Figuras 2.5 (a-d) representam os estágios de crescimento do colmo da espécie *Guadua angustifólia*.

a. alguns meses b. 1-2 anos c. 2-3 anos d. 3-6 anos

Figura 2.5 - Estágio de crescimento do colmo do bambu *Guadua angustifólia* [6]

O crescimento do colmo ocorre muito rapidamente. Seu comprimento aumenta sendo de alguns centímetros por dia (de 15cm a 20cm). A literatura reporta recordes de crescimento de mais de um metro em um único dia.

O nó é um local de onde saem os galhos. Internamente, o nó é representado pelo prato sólido horizontal de feixes vasculares denominados diafragmas [3].

As espécies do grupo paquimorfo e leptomorfo apresentam estruturas anatômicas semelhante na região nodal, e algumas espécies do grupo paquimorfo desenvolvem raízes densas ao redor da região nodal na parte mais baixa do colmo [7].

O interno é a parte do colmo entre os dois nós consecutivos. A parede do internó é variável, possuindo uma espessura desde muito fina (exemplo: espécie

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912748/CA

Rhipidocladum) a muito grossa (exemplo: espécie Guadua velutina). Nos bambus americanos, a superfície externa do interno é completamente lisa, mas pode apresentar aspereza com um maior ou menor grau de enrugamento. O diâmetro de interno decresce da base ao topo [3]. As figuras 2.6 e 2.7 representam a estrutura interna de bambu Mosô.

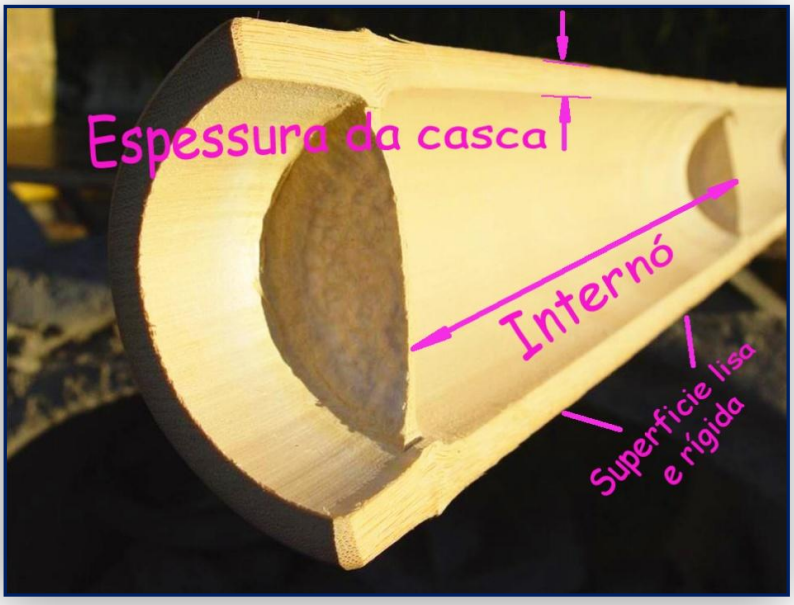


Figura 2.6 - Estrutura interna de bambu Mosô (modificado de [8])

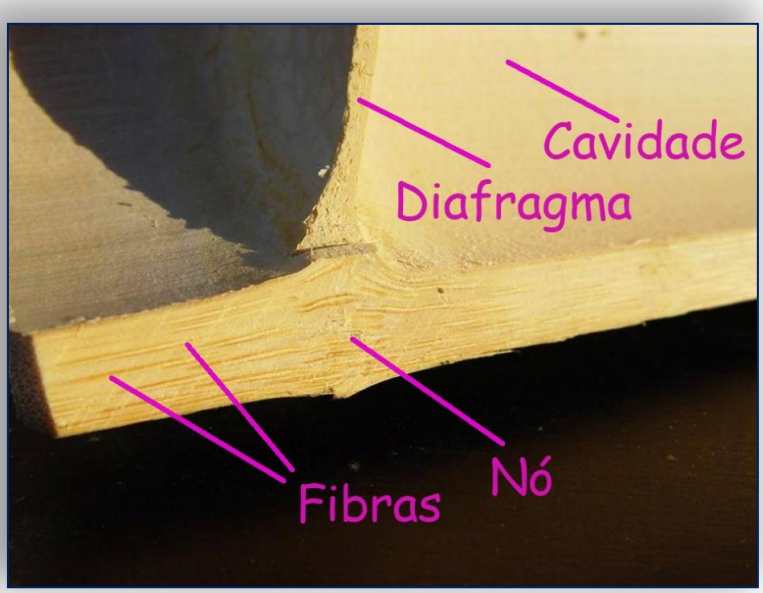


Figura 2.7 - Estrutura interna de bambu Mosô (modificado de [8])

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912748/CA

2.1.3
Galhos

Os galhos são originados de brotos que se alternam de um lado para outro, em nós sucessivos (figura 2.8). Em algumas espécies, os galhos desenvolvem na fase de crescimento; em outras, quando atingem o seu crescimento definitivo. O número de ramificações em cada nó é importante na identificação dos diversos gêneros [7]. Nas espécies do grupo paquimorfo o galho origina-se no ápice do rizoma e nas do grupo leptomorfo, em gemas laterais do rizoma [9].

Figura 2.8 - Galhos do bambu (Foto Quinn Dombrowski [10])

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912748/CA

2.1.4
Folhas

Os bambus apresentam dois tipos de folhas: as que crescem nas extremidades dos galhos e as que nascem no colmo. As primeiras (figura 2.9 e 2.10), são as folhas propriamente ditas as quais efetuam a fotossíntese.

Figura 2.9 - Folhas de bambu (Foto Davi C. Pasqualetti [10])

Figura 2.10 - Folhas de bambu (Foto Alexandre Amaral [10])

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912748/CA

As segundas, são ditas folhas caulinares, brácteas ou bainhas (figura 2.11 e 2.12). Nascem nos nós e protegem as gemas (partes da planta que originam os galhos) de danos mecânicos insetos nocivos. A fase interna da bainha é lisa e brilhante, mas, quando jovem, a parte externa é coberta com pelos, irritantes para pele, que possuem coloração variada, como branca, cinza, marrom ou preta. A forma e geometria das folhas caulinares variam com a espécie [3].

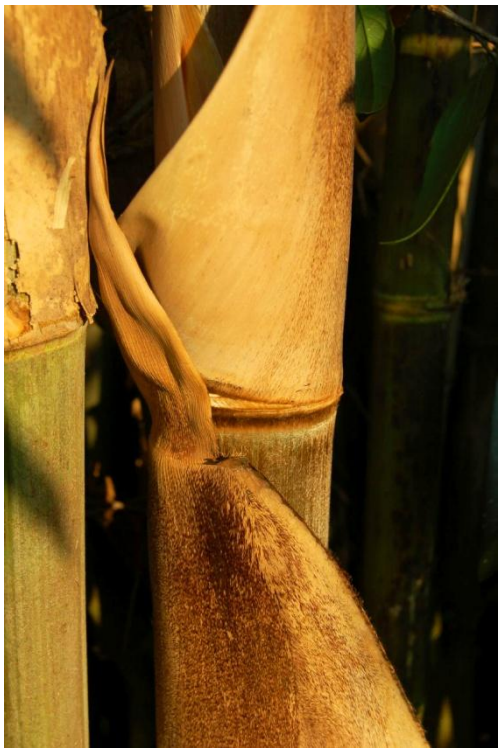


Figura 2.11 - Bainha de bambu (Foto Susan Ford Collins [10])

Figura 2.12 - Bainha de bambu (modificado de Tanetahi [10])

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912748/CA

2.1.5
Flores e frutos

O florescimento apresenta-se, no geral, em períodos mais ou menos regulares, que variam, segundo a espécie, de 3 a 160 anos e debilita a planta, determinando a morte dos colmos e ramos. Se um novo colmo brota de um rizoma que teve o seu colmo florescido, este novo colmo produz flores em seu primeiro ano de crescimento e logo, geralmente, morre. Existem três tipos básicos de florescimento: o anual, o esporádico e o gregário. O florescimento anual ocorre nos bambus herbáceos, os quais apresentam pouca importância econômica. O florescimento esporádico e o gregário ocorrem nos bambus lenhosos. O florescimento esporádico apresenta-se em colmos isolados e numa mesma touceira. O florescimento gregário ocorre quando floresce a totalidade dos colmos de uma touceira ou mata, ocorrendo a morte do colmo e também do rizoma [11] . As espécies *Dendrocalamus strictus e Bambusa atra* são exemplos de floração gregária [12].

O florescimento do bambu está apresentado na figura 2.13.

Figura 2.13 - Florescimento de bambu (Foto Mogens Engelund [1])

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912748/CA

2.2
Micro-estrutura

Microscopicamente o bambu pode ser considerado um material compósito formado por feixes de fibras fortemente aderidas a uma substância aglutinante, a lignina.

Devido à forma tubular, podem-se adotar como referência as direções longitudinal, radial e circunferencial (figura 2.14). As propriedade físicas e mecânicas de 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. Elas são praticamente paralelas e lineares ao longo do interno, porém, no nó, elas sofrem desvios.

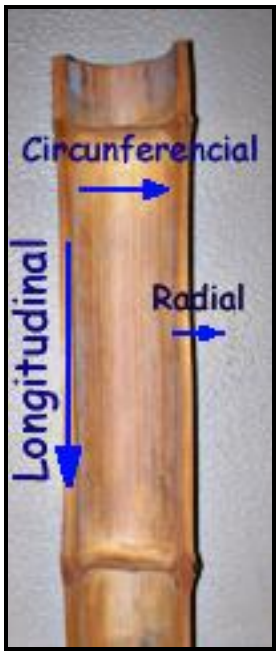


Figura 2.14 - Direções a serem consideradas nos colmos de bambu (modificado de Úrsula Ghavami [3])

No sentido radial, as fibras não se distribuem homogeneamente na matriz de lignina: há uma maior concentração delas nas proximidades da face externa, como se vê nas figuras 2.15 e 2.16. As camadas externas do colmo são as mais solicitadas pela ação do vento no bambuzal. Como as fibras são responsáveis pela resistência à tração de bambu, sabiamente a Natureza as concentra nas zonas mais tracionadas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912748/CA

Figura 2.15 - Distribuição das fibras ao longo da espessura da parede do colmo (bambu Mosô) [8]

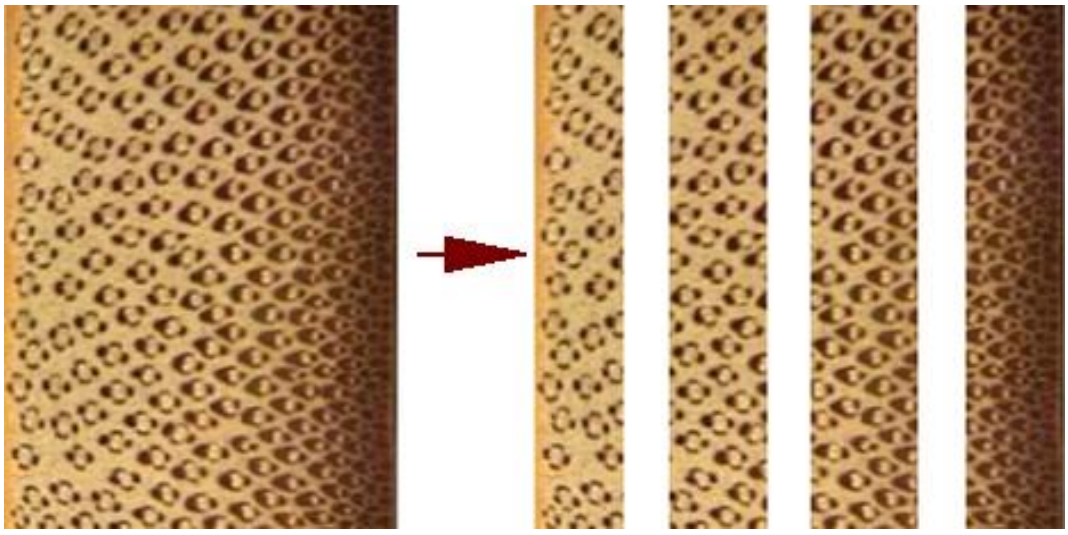


Figura 2.16 - Distribuição das fibras ao longo da espessura da parede do colmo (direção radial) [13]

Já ao longo das direções circunferencial e longitudinal tem-se uma distribuição praticamente uniforme, embora nesta última haja redução na quantidade de fibras à medida que se afasta a base.

Os vasos ou veios têm como função o transporte de nutrientes da raiz às demais partes da planta. Como os colmos de bambu são bastante esbeltos, os

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912748/CA

vasos ou veios são reforçados por um tecido (esclerênquima) que lhes dá resistência (figura 2.17) [3].

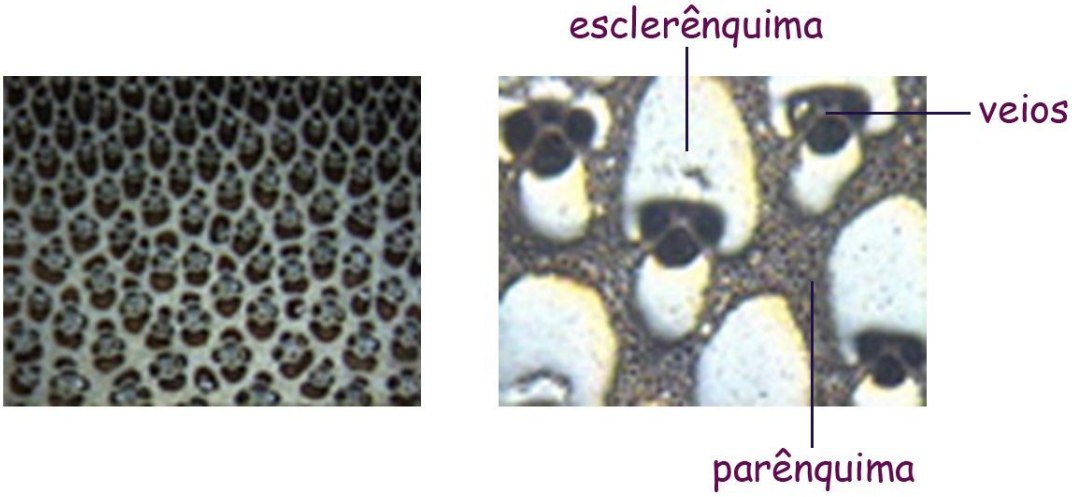


Figura 2.17 - Conjuntos vasculares de bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus* (modificado de [12])

De acordo com [5] a seção transversal do colmo marca o feixe de fibras vasculares regularmente distribuídas no interior do parênquima. A proporção dos elementos anatômicos presentes no colmo é de 52% de células parênquimais, 40 % de fibras e 8% de tecido vascular de condução.

2.3
Características mecânicas

2.3.1
Módulo de cisalhamento G

Até agora o módulo de cisalhamento de bambu foi muito pouco estudado, segundo Torres [14] isso é devido principalmente aos seguintes motivos: muitas das aplicações estruturais de bambu requerem o módulo de elasticidade longitudinal (E) só e o outro – o valor de módulo de cisalhamento G pode ser obtido através da expressão (2-1):

$$G_{z\varphi} = \frac{E_z}{2\cdot(1+\nu_{z\varphi})} \qquad (2\text{-}1)$$

No entanto, esta expressão não tem validez no presente trabalho, porque as constantes elásticas envolvidas não correspondem ao mesmo plano de isotropia.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912748/CA

Sánches e Prieto [15] determinaram módulo de cisalhamento de *Guádua Angustifólia* através do análise das deflexões, que considera a deformação por cortante nas vigas de deferentes comprimentos, ensaiadas a flexão nos quatro pontos. Foi utilizada norma ASTM 198 para elementos de madeira [16] com algumas modificações. Foi estabelecido valor de 628 MPa. Torres, L. [14] realizou ensaios de torção pura de bambu. Os colmos ensaiados das espécies *Metake e Phyllostachys Pubescens* (Mosô) eram de 1 metro de comprimento. Através de realização deste ensaios foram estabelecidos valores de 910 MPa e 665 MPa respectivamente. Martinez, D. [17] estabeleceu modulo de cisalhamento através dos estudos experimentais de torção pura dos colmos de *Guádua Angustifólia* de 65 cm de comprimento. Foi encontrado valor de 712 MPa. García, J. [18] realizou ensaios de aplicação de carga axial deslocada sob os anéis de *Guádua Angustifólia*, determinando ao mesmo tempo o coeficientes de Poisson (υ_{12}), modulo de elasticidade circunferencial e modulo de cisalhamento. Foi estabelecido valor de módulo de cisalhamento igual a 581 MPa. Resumo dos trabalhos realizados para estabelecimento do módulo de cisalhamento de varias espécies de bambu esta na tabela 2.1:

Tabela 2.1 - Módulo de cisalhamento G_{13} para as espécies Guádua Angustifólia, Metake e Phyllostachys Pubescens (Mosô)

	Valores médios de módulo de cisalhamento G_{13}		
	Guádua Angustifólia	*Metake*	*Phyllostachys Pubescens* (Mosô)
Sánches e Prieto	628 MPa		
Torres, L.		910 MPa	665 MPa
Martinez, D.	712 MPa		
García, J.	581 MPa		

2.3.2

Módulo de elasticidade longitudinal E_y

Módulo de elasticidade longitudinal é uma constante elástica mais encontrada na literatura por ser necessária para a maioria dos cálculos. Esta constante pode ser estabelecida através de diferentes estudos experimentais.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912748/CA

Ghavami e Marinho [13], realizaram ensaios axiais de tração e compressão nos segmentos de bambu inteiros com e sem nó para determinar módulo de elasticidade longitudinal da espécie *Guádua* nas diferentes alturas do colmo. Os colmos ensaiados tinham idade média de três anos. Os valores médios, estabelecidos nos ensaios de tração e compressão são 15,11 GPa e 12,58 GPa respectivamente. Nogata e Takahashi [19] ensaiaram espécies pequenas de bambu mosô, cortadas em posições diferentes com as dimensões variadas. Através dos ensaios foi encontrada a expressão 2-2 para determinar a variação do módulo de elasticidade em qualquer ponto da espessura da parede (que deve-se a distribuição graduada das fibras longitudinais).

$$E(r) = 3{,}75\, e^{(2{,}2\frac{r}{t})} \qquad (2\text{-}2)$$

onde r – a distância na direção radial a partir da superfície interior;

t – espessura da parede.

Calculado pela expressão 2, valor máximo de módulo de elasticidade é 33,84 GPa na parede externa de bambu. Nelli et al. [20] integraram a expressão 2 de r = 0 até r = t e estabeleceram valor médio de módulo de elasticidade longitudinal de 13,68 GPa.

Ensaio de propagação das ondas através de bambu da espécie *Guádua* foi realizado pelos Méndez e Vallecilla [21] tendo como objetivo determinação do seu módulo de elasticidade. Foi utilizado acelerômetro e sistema de aquisição de dados para medir tempo, que demora uma onda (generalizada pelo golpe de martelo) em percorrer uma espessura conhecida de um colmo de *Guádua*. Os colmos ensaiados tinham idade de 1 e 3 anos. Confiabilidade dos ensaios foi verificada pelos autores sobre barras de aço e alumínio. Foi encontrado um erro de 5%. Módulo de elasticidade encontrado através destes ensaios – 13,69 GPa.

Os resultados citados estão apresentados na tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Valores médios de módulo de elasticidade longitudinal E_y

	Valores médios de módulo de elasticidade longitudinal E_y
Ghavami e Marinho	15,11 GPa 12,58 GPa

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912748/CA

	Valor médio: 13,85 GPa
Nogata e Takahashi	13,68 GPa
Méndez e Vallecilla	13,69GPa
Valor médio	13,74 GPa

Torres [14] estabeleceu módulo de elasticidade longitudinal E_y, realizando estudos experimentais de flexão de viga em balanço. Os ensaios mostraram, que este método é impreciso, porque valor de E_y, que ele chamou de E_f (efetivo) varia, dependendo do afastamento do ponto analisado do engaste da viga (tabela 2.3).

Tabela 2.3 - Módulos efetivos a flexão [14]

Módulo de elasticidade efetivo / Espécie de bambu	E_{f1} (GPa)	E_{f2} (GPa)	E_{f3} (GPa)	E_{f4} (GPa)	Razão $D_{médio}$/ Espessura da parede	Esbeltez diametral λ_D
Metake	0,5	3,3	4,9	5,9	13,15	0,927
Phyllostachys Pubescens (Mosô)	0,27	2,33	3,43	4,2	9,84	0,903
Distância de afastamento do engaste, mm	60	370	630	940		

2.4
Objetivo do trabalho

Neste trabalho estão apresentados os resultados da pesquisa, relacionada com comportamento de bambu da espécie *Phyllostachys pubescens (Mosô)* sujeito a carga de torção e flexão pura, cujos resultado de 3 ensaios idênticos foram comparadas com os disponíveis na literatura. Na pratica bambus são usado nas obras de engenharia com variação de temperatura. Com perda da sua umidade variacional se fissuram inicialmente entre dois nós. E com o tempo aparecem fissuras nas maiorias dos cilindros internodais. Neste trabalho esta estudado

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912748/CA

iniciação da fissura através da introdução da corte longitudinal na parte internodal do colmos de bambu sujeito a carga de torção. E posteriormente esta fissura foi alongada até que a seção fique completamente aberta. Após cada introdução da fissura foram medidas as forças aplicadas, deformações, ângulos de rotação e deflexões, registradas pela sistema de aquisição de dados cDAQ e finalmente os dados foram verificados usando programa de elementos finitos Abaqus.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912748/CA