

2.

Revisão Bibliográfica

2.1. Introdução

Embora o homem conheça e utilize o bambu desde tempos pré-históricos, ainda não conhece as características botânicas de muitas espécies. Isto pode ser devido principalmente à sua floração que ocorre a intervalos de ciclos muito grandes que flutuam de acordo com a espécie, de 30 a 120 anos, após este período a maioria das plantas secam e morrem. Devido a este fato, a classificação dos bambus tem sido lenta e pouco satisfatória, sendo freqüente o fato de uma mesma espécie ter sido classificada por vários botânicos em gêneros distintos. Para corrigir estes erros Mc Clure dedicou os últimos anos de sua vida ao estudo da classificação dos bambus do Novo Mundo. Na atualidade novos taxonomistas prosseguem estes estudos.

Todos os continentes, com exceção da Europa, têm espécies nativas de bambu. Sua maior concentração encontra-se nos países do sudoeste asiático e as ilhas adjacentes. África e Austrália são os que possuem menor número de espécies. Na América existem cerca de 290 espécies correspondentes a 18 gêneros aproximadamente, cuja distribuição estende-se desde a parte oriental dos Estados Unidos até Argentina e Chile, e desde o nível do mar até as regiões mais altas dos Andes (LOPEZ, 1978).

Uma das espécies de bambu mais conhecida no mundo é *Phyllostachys aurea*, que é a que melhor tem-se adaptado ao clima temperado devido a seus rizomas leptomorfos. Esta espécie pertence à família poacea, sub família *Bambusoideae*, tribo *Bambuseae*, subtribo *Shibataeinae*, gênero *Phyllostachys*, espécie *aurea*. É nativo da China, porém é encontrado também em Taiwan, Japão, América Central e América do Sul. Sua altura atinge de 6 a 12 m e diâmetro entre 3 e 7 cm. Os colmos são eretos, verdes quando jovens, tendendo a amarelo esverdeado com o tempo. Na base, os internós são menores que na parte intermediária e no topo. (OHRNBERGER, 1999).

2.2. Morfologia do bambu

A estrutura do bambu consiste no sistema subterrâneo de rizomas, os colmos e os galhos. Todas estas partes são formadas pelo mesmo princípio: uma série alternada de nós e entrenós. Com o crescimento do bambu, cada novo internó é envolvido por uma folha caulinar protetora, fixada ao nó anterior no anel caulinar. Os nós são massivos pedaços de tecido, compreendendo o anel nodular, o anel da bainha e uma gema dormente, que são os locais de surgimento do novo crescimento segmentado (rizoma, colmo ou galho).

Os rizomas são caules subterrâneos que crescem, reproduzem-se e afastam-se do bambu permitindo a colonização de novo território. A cada ano novos colmos crescem dos rizomas, para formar as partes aéreas das plantas. De acordo com a forma e hábito de ramificação do rizoma os bambus podem classificar-se em três grupos principais:

1.- **Leptomorfos ou Alastrantes:** Apresentam rizomas alongados e finos, tendo os entrenós longos e espaçados. A ponta muito dura geralmente está orientada horizontalmente. Os colmos são mais grossos que o rizoma. Algumas vezes a ponta do rizoma pode tornar-se um novo colmo. Crescem lateral e radialmente, afastando-se linearmente uns dos outros. São encontrados em geral nas espécies de climas temperados, como no gênero *Phyllostachys*.

2.- **Paquimorfos ou Torcentes:** Com forma de bulbos, possuem entrenós compactos e muito curtos. A ponta é orientada para cima e dela sai um colmo mais fino que o bulbo. Crescem afastando-se muito pouco uns dos outros. Crescem lateral e radialmente. Podem ter pescoços curtos, médios ou longos. Encontrados em espécies tropicais, como as do gênero *Bambusa*, espécie *Dendrocalamus*.

2.- **Anfipoidal ou Intermediário:** Caracterizam-se por rizomas que apresentam ramificação combinada dos dois grupos principais numa mesma planta. A este grupo pertencem gêneros como o *Chusquea*, ao qual correspondem grande número de espécies desenvolvidas nas zonas montanhosas da Colômbia (LOPEZ, 1978).

2.3. Desenvolvimento e crescimento

Diferente das árvores, cujo tronco cresce ao mesmo tempo radial e verticalmente até alcançar seu completo desenvolvimento entre os 12 e 15 anos e ainda depois dos 100 anos, o bambu emerge do solo com o diâmetro máximo que terá em sua vida, o qual não aumenta com a idade, pelo contrario diminui proporcionalmente ao longo de seu comprimento. O colmo alcança sua máxima altura entre os 30 e 80 dias no grupo leptomorfo e entre os 80 e 180 dias no grupo paquimorfos. Terminado seu crescimento começa a formação de seus ramos e folhas a qual se completa no primeiro ano.

Entre os 4 e 12 primeiros meses, o bambu é muito brando e flexível, pelo que é empregado na confecção de cestos e outras peças artesanais. À medida que alcança sua maturidade, as fibras tornam-se cada vez mais duras e resistentes até atingir sua máxima resistência entre os três e seis anos, idade apropriada para seu uso na construção civil. Depois deste período, os colmos começam lentamente a mudar a cor até secar completamente.

O crescimento do bambu é tão rápido que não existe na natureza planta que possa igualar-se a ele. Em condições normais e na época de maior desenvolvimento, o crescimento em 24 horas pode alcançar de 8 a 10 cm, chegando a 40 cm em espécies como o *Dendrocalamus giganteus* e a 30 cm na *Guadua angustifolia*.

2.4. Características dos colmos

Os colmos são formados por cascas geralmente cilíndricas, esbeltas, normalmente ocos (ver Figura 2.1). O espaço vazio dentro do colmo é denominado cavidade, as quais são separadas uma das outras por diafragmas que aparecem externamente como nós, onde saem os galhos e as folhas. A posição do colmo entre dois nós é chamada internó, os quais possuem uma parede de espessura variável. Os colmos diferem segundo a espécie em comprimento, diâmetro e distância internodal. Alguns colmos possuem poucos centímetros de altura e poucos milímetros de diâmetro, outros podem alcançar até 40 m de altura e diâmetros de até 30 cm (GHAVAMI e MARINHO, 2001).

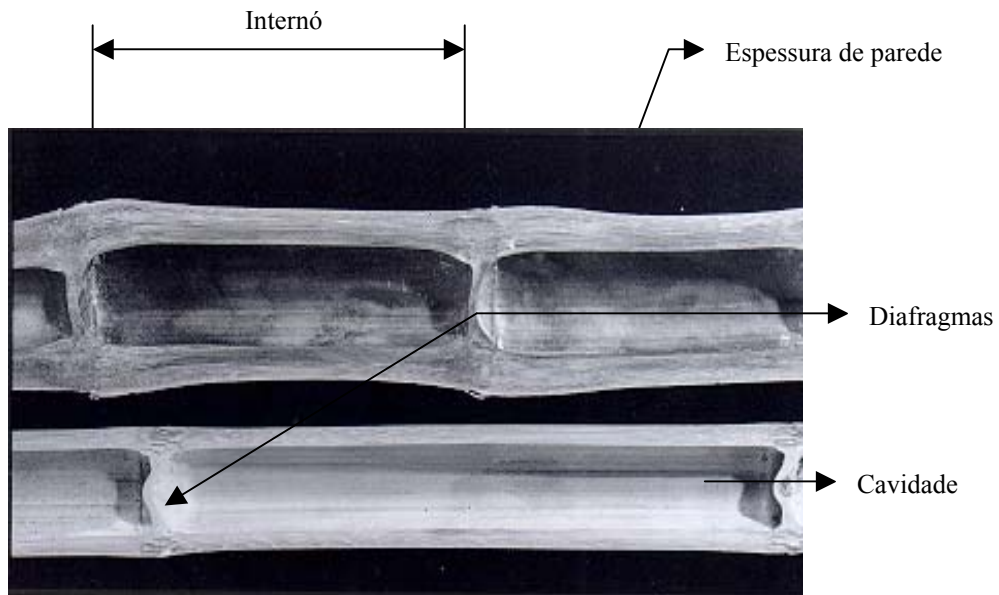


Figura 2.1. Seção transversal do colmo de bambu.

A estrutura do bambu em geral pode ser encarada como sendo um material compósito constituído, a grosso modo, de fibras longas e alinhadas de celulose, imersas em uma matriz de lignina (GHAVAMI et al., 2000). Observando a seção transversal de um colmo de bambu, pode-se observar que as fibras se concentram mais a medida que se aproxima da casca o que faz com que o material possa resistir as cargas de vento, que são a solicitação mais constante durante a vida do material na natureza. Esta variação das fibras na espessura do colmo é conhecida como “*Funcionalidade graduada*”.

A seção transversal de uma parede de bambu é formada por:

- Superfície exterior dura e lustrosa a qual evita parcialmente a perda de água do colmo.
- Células parênquimais, onde são armazenados os nutrientes.
- Feixes vasculares contendo:
 - a) vasos que conduz a água.
 - b) Tubos condutores de seiva.
 - c) Fibras de paredes grossas compostas de celulose. Esta região conhecida pelo nome de esclerênquima é a responsável pela resistência dos colmos.

O conjunto vascular é o componente estrutural que apresenta mais variações quanto à sua forma, tamanho e distribuição dentro dos colmos, sendo estas

mudanças mais significativas ao longo de seu comprimento do que no sentido radial. Estas mudanças coincidem com a redução gradual da espessura do colmo. Assim como o diâmetro radial reduz-se muito mais que o tangencial, a configuração do feixe vascular muda ao longo do comprimento, passando de forma arredondada a forma oval no topo (LIESE, 1998).

Uma previsão preliminar do comportamento mecânico do bambu em regime elástico pode ser feita utilizando-se as equações da regra das misturas, que dão boa aproximação para as propriedades elásticas dos compósitos a partir das propriedades elásticas de seus constituintes, ou seja, fibras e matriz, e das frações volumétricas destes materiais. Para que se possa utilizar estas equações para análise dos bambus, é necessário considerar a variação da fração volumétrica na espessura da parede dos colmos. GHAVAMI et al. (2000) analisaram o bambu como material compósito através do método de microscopia por Processamento Digital de Imagens (PDI), cuja imagem de variação das fibras na espessura do colmo é apresentada na Figura 2.2.

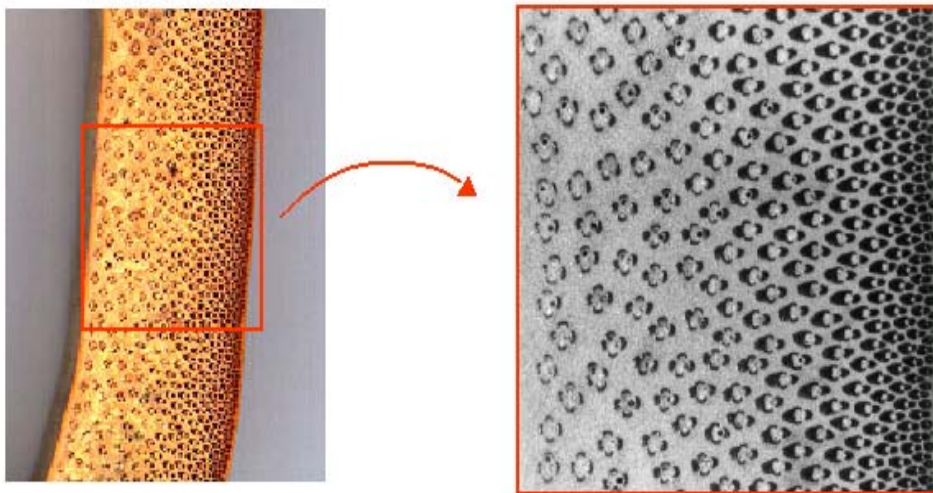


Figura 2.2. Variação da fração volumétrica das fibras na espessura do colmo de bambu.

As Figuras 2.3 e 2.4 apresentam a normalização do comportamento das fibras ao longo da espessura de colmos da espécie *Phyllostachys heterocycla pubescens* (Mosó) e *Dendrocalamus giganteus*. Depois de dividir as imagens das amostras em 4, 8, 12 e 16 fatias, GHAVAMI et al. (2000) demonstraram que os resultados obtidos são similares para diferentes seccionamentos. A partir dos

resultados obtidos pelo método PDI, pode-se obter a equação que permite modelar o comportamento mecânico do bambu como material compósito.

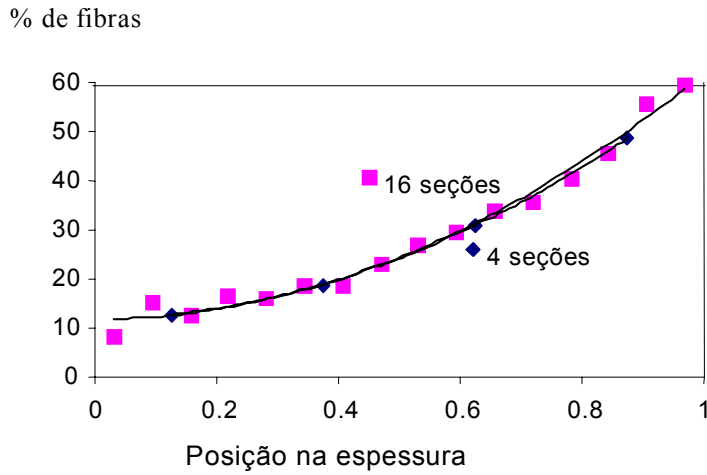


Figura 2.3. Gráfico da variação do volume de fibras ao longo da espessura de uma amostra extraída de um colmo da espécie *Phyllostachys heterocycla pubescens* (Mosó).

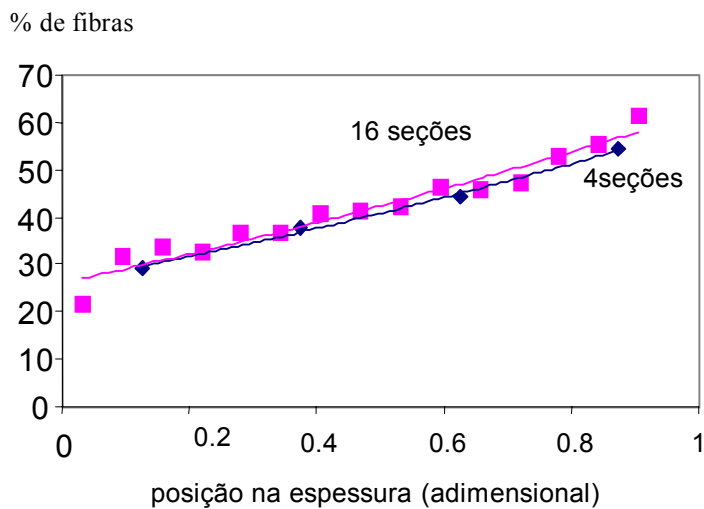


Figura 2.4. Gráfico da variação do volume de fibras ao longo da espessura de uma amostra extraída de um colmo da espécie *Dendrocalamus giganteus*.

As fibras são caracterizadas pela sua forma delgada. Seu comprimento influencia na resistência mecânica dos colmos. Entre 78 espécies de bambu analisadas por diferentes autores, um amplo número de comprimento de fibras tem sido encontrado: desde 1,04 mm em *Phyllostachys nigra* até 2,64 mm em *Bambusa vulgaris* (GROSSER e LIESE, 1971). A Tabela 2.4.1 resume os valores de comprimentos de fibras para diferentes espécies.

Tabela 2.4.1. Dimensões das fibras para diferentes espécies de bambu.

Espécies	Comprimento (mm)	Largura (μm)
<i>Bambusa multiplex</i>	2,20	14,00
<i>Bambusa tulda</i>	1,45	24,00
<i>Bambusa vulgaris</i>	2,64	10,00
<i>Guadua angustifolia</i>	1,60	11,00
<i>Phyllostachys edulis</i>	1,56	13,00
<i>Phyllostachys nigra</i>	1,04	10,00
<i>Phyllostachys reticulata</i>	1,56	13,00

2.4.1. Estrutura dos nós

O nó do colmo de bambu é composto de uma crista nodal, uma cicatriz de revestimento, um diafragma e um intranó. Acima da cicatriz emergem bolhas em lados alternados do colmo, em nós sucessivos. O comprimento dos intranós varia de acordo com a espécie. A forma do diafragma pode variar ao longo do colmo. Ele pode ser plano ou pode sofrer um encurvamento de sua parte central para acima ou para baixo, ou mesmo dobrar-se.

Muitos dos feixes vasculares principais passam através dos nós. Na periferia da parede do colmo elas se curvam-se ligeiramente para fora e tornam-se conectadas com a cicatriz, enquanto na zona interna curvam-se para dentro e dirigem-se para o diafragma.

A estrutura dos nós é mais complexa do que nos internós, já que nesta região ocorre a principal distribuição de água e nutrientes por meio de intensa

anastomose do sistema vascular (ver Figura 2.5). Por este motivo, na região nodal a composição típica do feixe vascular é parcialmente mudada. As células de parênquima da região nodal são principalmente redondas e algumas vezes de forma bastante irregular. O diâmetro médio destas células é cerca de 45 µm.

O comprimento das fibras varia através da parede do colmo, sendo mais curtas na parte externa, mais longas no centro e decrescem em comprimento em direção à região interna. Na região nodal as fibras são mais curtas que na região internodal. As fibras mais curtas estão no diafragma. A redução no comprimento das fibras é acompanhada por mudanças de largura e forma nesta região.

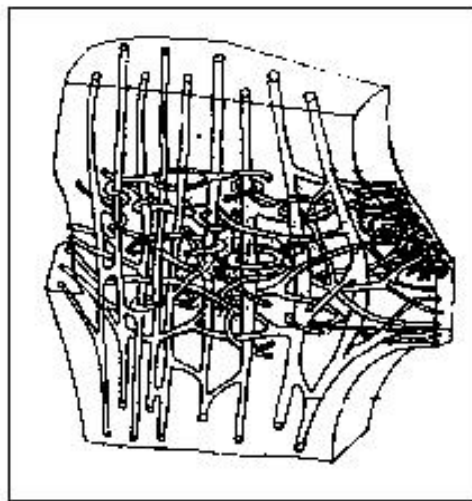


Figura 2.5. Anastomose do nó.

2.5. Características químicas

O bambu, como material orgânico, é produzido por processos fotossintéticos que tem lugar nas folhas. Estes processos podem ser representados através da seguinte equação química:



O bambu é um compósito polimérico, anisotrópico, com diferentes propriedades mecânicas em diferentes direções e não homogêneo, não tendo a mesma composição, estrutura ou características em todo seu volume. A principal fonte de propriedades mecânicas do bambu é a celulose. Na molécula de celulose

são definidos três planos mutuamente ortogonais. Estas moléculas são mantidas juntas no primeiro plano por fortes ligações de hidrogênio, no segundo plano por fracas ligações de Van der Waals e no terceiro por fortes ligações covalentes. A Tabela 2.5.1 apresenta as propriedades mecânicas da celulose sob tração segundo JANSEN (1981) e MOREIRA (1998).

Tabela 2.5.1. Propriedades mecânicas da celulose sob tração.

Módulo de elasticidade longitudinal (MPa)	Módulo de elasticidade transversal (MPa)
$E_{11} = 25000$	$G_{12} = 240$
$E_{22} = 280000$	$G_{23} = 170 \text{ a } 390$
$E_{33} = 16000 \text{ a } 37000$	$G_{31} = 3000$

As propriedades da lignina não são muito conhecidas devido à sua extremamente complicada estrutura química. A lignina fornece rigidez para as árvores, tornando o seu crescimento possível, além de proporcionar maior durabilidade aos tecidos, protegendo-os da ação de microorganismos. Por último a hemicelulose são polissacarídeos de baixa resistência, constituídas por 150 a 200 moléculas de sacarose.

Estes componentes orgânicos formam as paredes das células que compõem os tecidos do bambu. Nas regiões externas das paredes dos colmos encontra-se em maior concentração a celulose biológica, hemiceluloses e lignina silícica. Em menor concentração são encontradas cinzas, álcool benzeno e pentoses (GHAVAMI e MARINHO, 2001).

2.6. Características físicas

O bambu é um material ortotrópico formado essencialmente por feixes de fibras longitudinais fortemente unidas por uma substância aglutinante. Sua umidade natural varia de 13 a 20 %, em função da umidade e do clima do local. É um material higroscópico, já que se dilata com o aumento da umidade e se contrai

com sua perda. O coeficiente de dilatação térmica possui valores diferentes no sentido longitudinal e transversal. No sentido longitudinal é pouco menor do que aço e do concreto ($\alpha = 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$), enquanto no sentido transversal é cerca de cinco vezes maior (GEYMAYER e COX, 1970). A condutividade térmica do bambu para uma transmissão de calor radial é 15 % menor do que para madeira, nas mesmas condições de umidade. Para uma transmissão de calor longitudinal, a condutividade é 25 % menor.

GHAVAMI e TOLEDO (1992), determinaram propriedades tais como cor, comprimento total, distância internodal, diâmetro externo, espessura da parede, teor de umidade e peso específico para duas espécies do estado da Paraíba. Eles observaram que o *Dendrocalamus giganteus* apresenta maiores comprimento internodal, diâmetro externo e espessura, quando comparado com outras espécies de bambu.

GHAVAMI e MARINHO (2001), estudaram as propriedades físicas dos colmos de bambus das espécies *Dendrocalamus giganteus* e *Guadua angustifolia* provenientes do Jardim Botânico-RJ, e de São Paulo *Guadua angustifolia*, *Guadua tagoara*, *Mosó* e *Matake* onde determinaram a variação do diâmetro, da espessura de parede e do comprimento internodal de colmos inteiros. A Tabela 2.6.1 apresenta os valores máximos, mínimos e médios, medidos experimentalmente do comprimento internodal, diâmetro externo e espessura de parede dos bambus estudados. Os valores obtidos para o *Dendrocalamus giganteus* foram próximos aos obtidos por GHAVAMI e TOLEDO (1992).

Tabela 2.6.1. Características físicas de diferentes espécies de bambu estudadas na PUC-Rio.

Características físicas		Espécies de bambu					
		Dendrocal. Giganteus	Guadua angustifolia		Guadua tagoara	Matake	Mosó
			SP	JB-RJ			
Comp. total (m)		18,85	15,55	20,91	15,23	20,45	15,68
Comp. internodal (mm)	mínimo	244,00	138,50	197,5	201,25	65,50	40,00
	máximo	508,00	315,75	426,6	447,75	509,00	395,50
	média	392,68	229,80	321,7	346,09	335,30	290,43
Diâmetro externo (mm)	mínimo	9,83	31,21	21,67	47,00	10,50	25,36
	máximo	131,49	101,86	135,3	106,63	118,25	131,78
	média	79,87	79,56	90,37	83,70	70,22	78,63
Espessura da parede (mm)	mínimo	2,00	3,00	9,13	8,02	2,99	2,32
	máximo	17,03	22,13	21,84	26,21	25,16	19,86
	média	7,97	10,80	12,26	14,74	8,93	11,17

Na Figura 2.6 pode-se observar que em quase todas as espécies de bambu estudadas o comprimento internodal atinge seu valor máximo na parte intermediária do colmo.

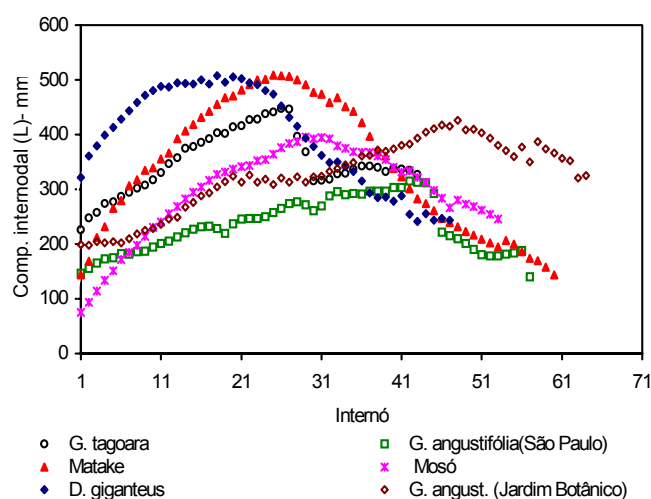


Figura 2.6. Variação do comprimento internodal de colmos de bambu.

A variação do diâmetro externo ao longo do comprimento do colmo é apresentada na Figura 2.7, onde pode-se observar que o mesmo diminui da base para o topo. O mesmo acontece com a espessura de parede (Figura 2.8), porém acontece uma grande variação ao longo do colmo. Das medições realizadas observa-se que existem diferenças entre colmos da mesma espécie desenvolvidos em locais diferentes. Esta diferença ocorre em função de fatores como clima, relevo, manejo de plantio, idade, entre outros.

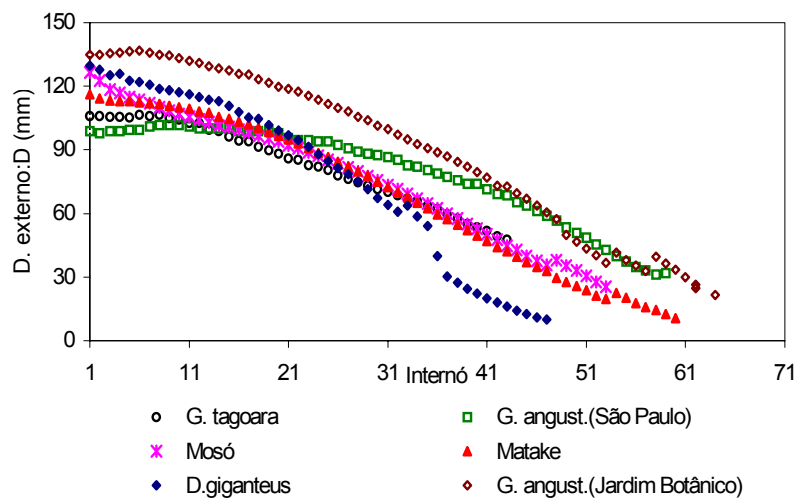


Figura 2.7. Variação do diâmetro externo ao longo do comprimento dos colmos.

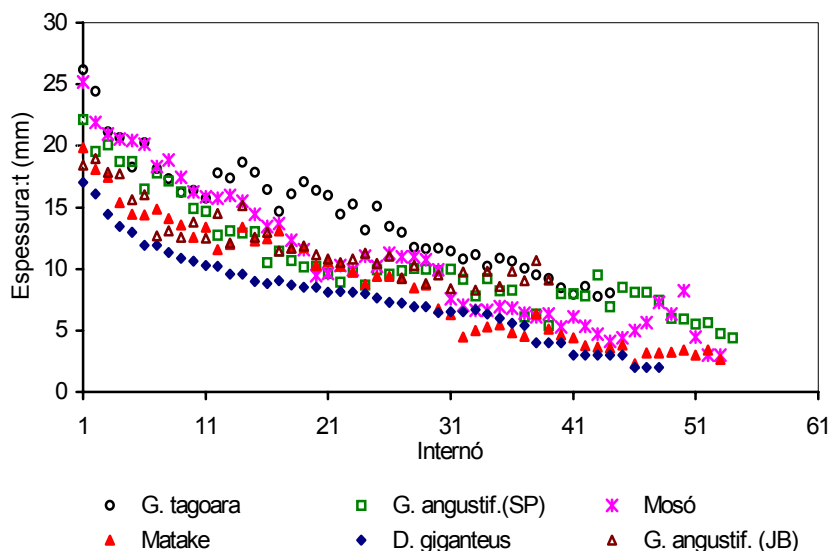


Figura 2.8. Variação da espessura da parede ao longo do comprimento dos colmos de bambu.

2.7. Características mecânicas

O bambu é um material natural e como tal existe uma infinidade de fatores que influenciam nas suas características mecânicas (CULZONI,1986). Da mesma forma que acontece para madeira, estas características são influenciadas por fatores como idade da planta, solo do bambuzal, condições climáticas, época de colheita, teor de umidade das amostras, localização das mesmas com respeito ao comprimento do colmo, presença ou ausência de nó na amostra e tipo de teste.

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 varia em função da posição do colmo, sendo maior nos nós por apresentarem maior concentração de sílica (LIESE,1998).

Por ser o nó um ponto de descontinuidade das fibras e de mudanças dimensionais, nele originam-se concentrações de tensões quando submetido a ensaio. Em estudos realizados à tração, GHAVAMI e HOMBECK (1981) observaram que na maioria dos testes a ruptura ocorreu próximo ao nó. Eles observaram ainda que a parte basal, por possuir maior seção transversal, apresentou maior carga de ruptura.

LEE et. al. (1994), estudaram as características mecânicas da espécie *Phyllostachys bambusoide*, utilizando amostras de 14 cm de diâmetro médio e comprimento aproximado de 9 m. Foram realizados ensaios de flexão, tração e compressão seguindo as recomendações da ASTM D-1037 em 376 elementos de bambu verdes e 371 secos ao ar. A média dos valores atingidos durante o ensaio é apresentada na Tabela 2.7.1.

Tabela 2.7.1. Resistência mecânica da espécie *Phyllostachys bambusoide*.

Resistência (MPa)	Colmos verdes	Colmos secos ao ar
compressão	31,34	43,12
Tração	102,00	122,50
módulo de elasticidade à flexão	7350,00	10890,00

2.7.1. Resistência à tração

GHAVAMI e MARINHO (2001), determinaram a resistência à tração das partes basal, intermediário e topo do bambu *Dendrocalamus giganteus*. Foram testados corpos de prova com nó nivelado, com nó não nivelado e sem nó. Os resultados médios obtidos são apresentados na Tabela 2.7.2.

Tabela 2.7.2. Tensão à tração nas partes basal, intermediária e topo do bambu *Dendrocalamus giganteus*.

Parte do bambu	Carga aplicada P (kN)			Tensão à tração σ_t (MPa)			Módulo de elasticidade E (GPa)
	P _{min}	P _{max}	P _{médio}	σ_t (min)	σ_t (max)	σ_t (médio)	
Topo s/ nó	2,23	2,60	2,46	129,45	160,49	147,16	-
Topo c/ nó	2,75	2,86	2,79	76,31	119,25	119,00	18,31
Intermediário s/ nó	3,28	5,51	4,62	142,59	245,36	224,08	-
Intermediário c/ nó	4,02	4,70	4,36	156,25	184,31	170,28	20,76
Base s/ nó	6,57	8,00	7,28	140,12	178,57	159,35	23,12
Base c/ nó	4,13	4,60	4,38	101,37	117,49	109,43	13,61

Observa-se na Tabela 2.7.2 que o bambu *Dendrocalamus giganteus* atinge uma tensão mínima de 76,31 MPa, nas amostras do topo com nó. Na região intermediária foram reportadas as maiores solicitações, oscilando os valores entre 142,59 e 156,25 MPa. Como era de esperar, nos nós a resistência diminui devido à descontinuidade das fibras nestes pontos. O módulo de elasticidade oscilou entre 13,61 e 23,12 GPa. CULZONI (1986), obteve valores de 12,6 GPa para esta espécie.

2.7.2. Resistência à compressão

Uma das utilizações mais difundidas do bambu é como elemento para suportar cargas axiais (CULZONI, 1986). Para este fim devem ser escolhidos os colmos com um valor menor de imperfeições geométricas. Porém, o emprego é totalmente empírico já que são desconhecidas as cargas capazes de serem atingidas por estes elementos. Para poder determinar o valor destas cargas são realizados ensaios de compressão simples em amostras de comprimento igual ao seu diâmetro ($L=D$).

BERALDO (1987), estudou amostras de *Bambusa tuloides* e encontrou valores de tensão variáveis entre 31,2 e 61,6 MPa. Através de seus ensaios demonstrou-se a compatibilidade do bambu e do concreto quando submetidos à compressão paralela às fibras. Nos ensaios de compressão perpendicular às fibras, a resistência varia entre 10,8 e 59,2 MPa, dependendo do posicionamento do nó, demonstrando a influência deste na resistência do elemento.

GHAVAMI (1990), estudou as propriedades mecânicas de algumas espécies de bambu do Rio de Janeiro, entre elas o *Bambusa tuloidis*, obtendo para a resistência à compressão valores de 30,10 MPa e 38,05 MPa, para amostras com nó e sem nó, respectivamente.

GHAVAMI e MARINHO (2001), determinaram a resistência à compressão das partes basal, intermediário e topo da espécie *Dendrocalamus giganteus*. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 2.7.3, onde se observa que na região do topo a resistência à compressão é maior. GHAVAMI (1990), obteve valores entre 38,96 MPa e 45 MPa para esta espécie com e sem nó. Resultado semelhante foi obtido por MOREIRA (1991).

A resistência à compressão é geralmente 70 % menor que a resistência à tração. CULZONI (1986), GHAVAMI e BOZA (1998), GHAVAMI e RODRIGUEZ (2000) e LIMA Jr. et al.(2000), obtiveram resultados semelhantes quanto a diferença de valores entre a tensão de tração e de compressão.

Tabela 2.7.3. Resistência à compressão nas partes basal, intermediária e topo do bambu *Dendrocalamus giganteus*.

Parte do bambu	Carga aplicada P (kN)		Tensão de compressão σ_c (MPa)		Módulo de elasticidade E_{long} (GPa)	Coef. Poisson (μ)	σ_c/σ_t
	P_{min}	P_{max}	σ_c (min)	σ_c (max)			
Topo s/ nó	5,00	66	6,03	96,75	17,14	0,40	0,60
Topo c/ nó	3,00	74	4,53	75,49	17,75	0,42	0,63
Intermediário s/ nó	5,00	197	2,00	78,79	18,00	0,25	0,32
Intermediário c/ nó	10,00	200	3,64	72,72	26,25	-	0,39
Basal s/ nó	10,00	310	2,33	72,62	26,6	0,27	0,41
Basal c/ nó	10,00	295	2,42	71,43	20,5	0,19	0,61

2.7.3. Resistência ao cisalhamento

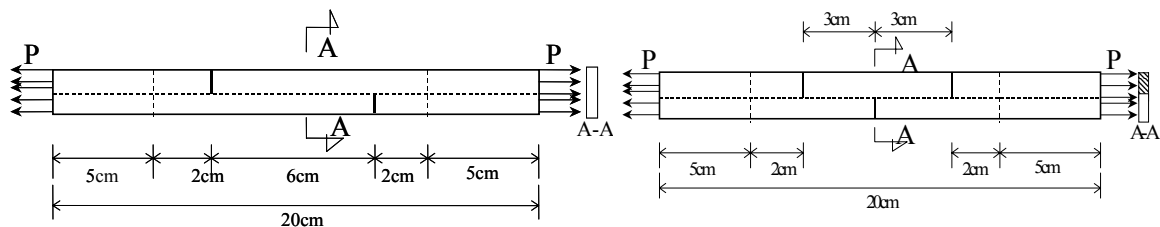
Segundo JANSEN (1980), a resistência ao cisalhamento do bambu é somente da ordem do 8 % da resistência à compressão. Quando a ruptura ocorre por flexão, esta é originada pela falta de aderência entre as fibras.

Segundo ATROPS (1981), a resistência ao cisalhamento aumenta com a diminuição da espessura da parede, ou seja da base para o topo dos colmos de bambu. Com a diminuição da espessura da parede do colmo a porcentagem de esclerênquima (tecido que proporciona resistência ao colmo) aumenta, por este motivo amostras extraídas do topo são mais resistentes ao cisalhamento que amostras extraídas da parte basal de um mesmo colmo.

GHAVAMI e SOUZA (2000) determinaram a resistência ao cisalhamento perpendicular das partes intermediárias dos colmos de bambu das espécies *Mosó* e *Matake* obtendo uma tensão de ruptura de 29,17 MPa para o bambu *Mosó* e de 29,71 MPa para o *Matake*. Estes resultados foram maiores que os obtidos por GHAVAMI e BOZA (1998), 19,70 MPa e 13,00 MPa para as mesmas espécies de bambu.

2.7.3.1. Resistência ao cisalhamento interlaminar

GHAVAMI e MARINHO (2001) realizaram testes em tiras de bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus* cujas características dos corpos de prova são apresentadas na Figura 2.9. O objetivo deste ensaio foi verificar se existe diferença no valor da tensão de cisalhamento com o aumento da simetria entre os cortes. Os resultados dos testes são apresentados na Tabela 2.7.4.



Cisalhamento com 2 cortes.

Cisalhamento com 3 cortes.

Figura 2.9. Dimensões dos corpos de prova para ensaio de cisalhamento interlaminar.

Observa-se que a resistência ao cisalhamento com dois e três cortes apresenta pouca diferença. Os valores obtidos foram maiores para a parte intermediária e menor para a basal. A resistência média foi de 3,74 MPa para as amostras com três cortes e de 3,46 MPa para aquelas que só tinha dois cortes. SOUZA e GHAVAMI (2000), obtiveram tensão de 3,08 MPa e 3,11 MPa para corpos de prova com dois e três cortes, respectivamente, para o mesmo bambu estudado.

Tabela 2.7.4. Resistência ao cisalhamento interlaminar do bambu *Dendrocalamus giganteus*.

Partes do colmo			Carga máxima P (kPa)	Tensão de cisalhamento τ (MPa)
Base	com nó	2 cortes	2,926	3,243
		3 cortes	1,572	3,556
	sem nó	2 cortes	2,076	2,338
		3 cortes	2,167	4,947
Intermediário	com nó	2 cortes	1,582	3,237
		3 cortes	1,048	4,100
	sem nó	2 cortes	1,787	4,199
		3 cortes	0,895	4,015
Topo	com nó	2 cortes	1,259	4,197
		3 cortes	0,798	4,717
	sem nó	2 cortes	1,069	3,591
		3 cortes	0,499	3,341

2.7.3.2. Resistência ao cisalhamento transversal

Os esforços de cisalhamento transversal às fibras são os mais comuns na prática. CULZONI (1986), determinou estes esforços para diferentes espécies de bambu, utilizando tiras de 12 cm de comprimento e espessura própria à espessura do bambu. A peça foi segurada para não introduzir fenômenos de flexão. A Tabela 2.7.5 apresenta os resultados obtidos para a parte basal, intermediária e topo da espécie *Dendrocalamus giganteus*.

Tabela 2.7.5. Resistência ao cisalhamento transversal às fibras. Valores obtidos para a parte basal, intermediária e topo da espécie *Dendrocalamus giganteus*.

Parte do colmo	Tensão média de ruptura (MPa)	Erro (%)
Topo	49,0	5,5
Intermediário	45,6	4,7
Base	47,0	4,3

2.8. Estabilidade de cascas cilíndricas

Cilindros de paredes finas são estruturas amplamente utilizadas em diversos ramos da engenharia, sendo usualmente empregados para suportar cargas axiais e pressão lateral. A grande vantagem da casca cilíndrica, além da facilidade de fabricação, é sua capacidade de resistir a estes carregamentos através de esforços de membrana, o que permite a construção de estruturas leves e esbeltas. Esforços de flexão, quando presentes, estão em geral restritos a pequenas regiões, como, por exemplo, os apoios. Apesar de ter uma forma geométrica simples, a casca cilíndrica pode apresentar um comportamento complexo quando submetida a excitações externas, em virtude da sua grande não-linearidade geométrica e sensibilidade a imperfeições. Estes fatores são particularmente importantes quando em uma dada situação há a possibilidade de perda de estabilidade, ocasião em que a não-linearidade geométrica se torna particularmente importante.

A análise da estabilidade de cascas cilíndricas é um dos problemas clássicos na teoria da estabilidade de estruturas. Uma das principais motivações para o estudo da estabilidade estática e dinâmica de cascas cilíndricas é a grande diferença encontrada entre resultados teóricos e experimentais.

As equações de estabilidade para as cascas cilíndricas estão disponíveis na literatura desde o século XIX (GHAVAMI, 1989). Os primeiros estudos relacionados com a flambagem de cilindros foram desenvolvidos utilizando a teoria linear clássica, que baseia-se em pequenos deslocamentos e suposições de elasticidade e forma geométrica inicial perfeitas.

Para analisar o fenômeno de flambagem de cascas cilíndricas alguns conceitos básicos devem ser conhecidos: trajetória de equilíbrio, ponto de bifurcação, ponto limite e carga crítica são os fundamentais (ver Figura 2.10).

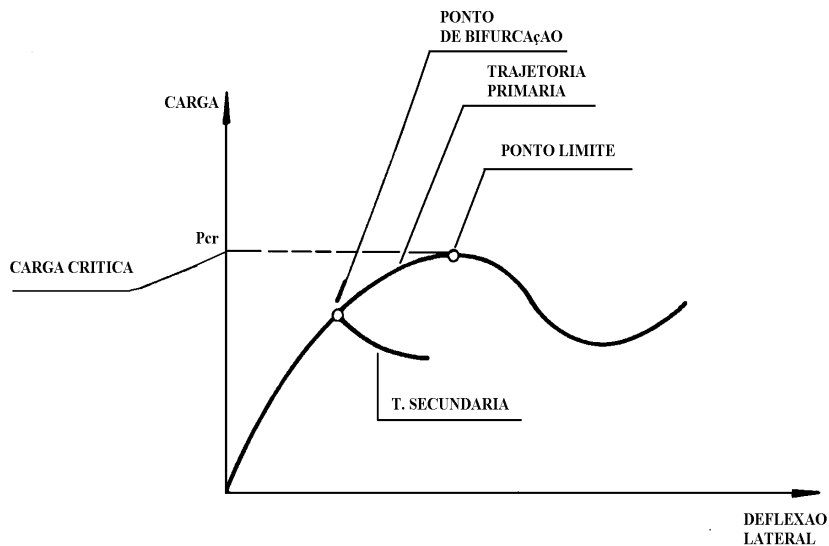


Figura 2.10. Trajetórias de equilíbrio das cascas cilíndricas.

Usando a teoria de grandes deslocamentos, VON KARMAN e TSIEN (1941) apresentaram uma solução para casca cilíndrica isotrópica submetida a compressão axial, considerando cilindros geometricamente perfeitos, e foi concluído que uma vez atingida a carga crítica, a carga do cilindro inicialmente perfeito cai abruptamente com o aumento das deformações. Sendo assim, a carga de flambagem para cilindros inicialmente imperfeitos ocorreria em valores mais baixos que a carga crítica teórica (ver Figura 2.11).

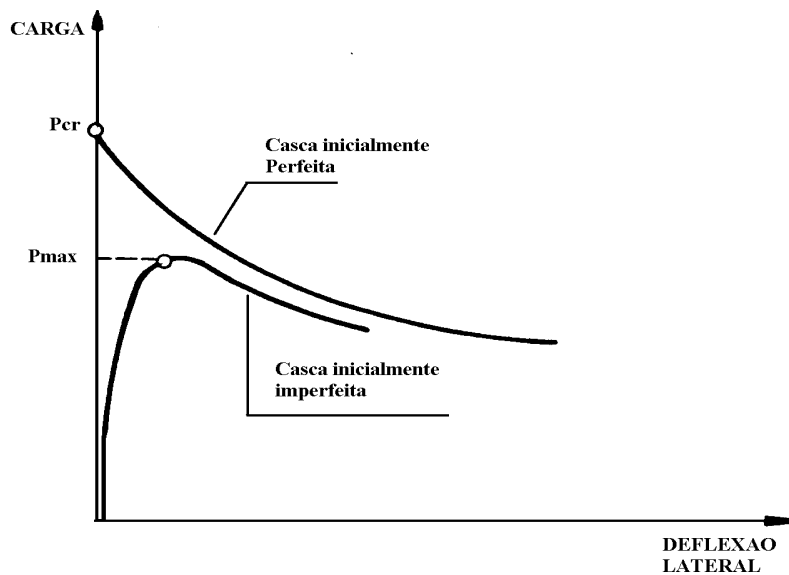


Figura 2.11. Comportamento da casca cilíndrica com imperfeições iniciais.

Para explicar o fato da carga aplicada nunca atingir o valor da carga crítica, DONNELL e WAN (1950), incluíram termos adicionais referentes às imperfeições iniciais, nas equações não lineares de equilíbrio, verificando-se que a presença dessas imperfeições resultava numa carga máxima inferior a carga crítica para a casca inicialmente perfeita.

2.8.1. Condições de contorno e deformações de pré-flambagem

Segundo GHAVAMI (1989), na análise de cascas cilíndricas submetidas a diferentes tipos de carregamento devem ser analisadas as condições de contorno e as deformações pré-flambagem.

Para cascas cilíndricas sob compressão axial, a teoria linear clássica assume que somente tensões de membrana existem antes da flambagem. Esta suposição implica que a casca é livre para se expandir lateralmente ao longo de todo seu comprimento. Na realidade, os cilindros geralmente são impedidos de expansão nos bordos, o que origina tensões de flexão antes de ser atingida a carga crítica. ALMROTH (1966), investigou os efeitos destas deformações pré-flambagem usando uma solução para o equilíbrio axissimétrico. Foi concluído que a inclusão

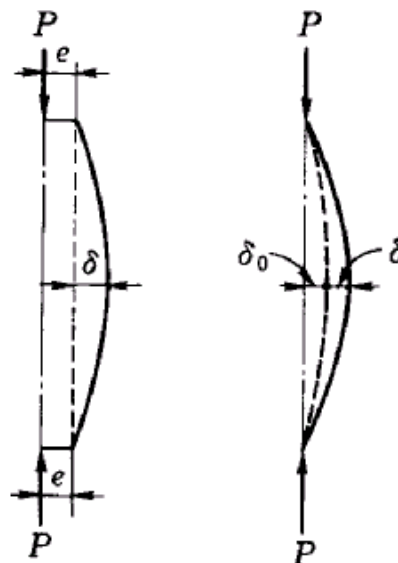
destes efeitos reduzia pouco a carga de flambagem, possibilitando assim a omissão das tensões de flexão pré-flambagem na teoria linear clássica.

2.8.2. Teoria fundamental de colunas

Caso 1: Colunas submetidas a carregamento excêntrico.

Quando uma carga P é aplicada aos extremos de uma coluna com excentricidade e (Figura 2.12 a), a deflexão δ na metade da altura da coluna (Figura 2.12 b) é:

$$\delta = e \{ \sec \pi/2 [P/P_E]^{0.5} - 1 \} \quad (2.1)$$



a) Coluna com carga excêntrica b) Coluna com imperfeição inicial

Figura 2.12. Colunas com excentricidade e imperfeição inicial.

A deflexão da coluna diverge infinitamente quando a carga P aproxima-se da carga de Euler P_E (ver Figura 2.13).

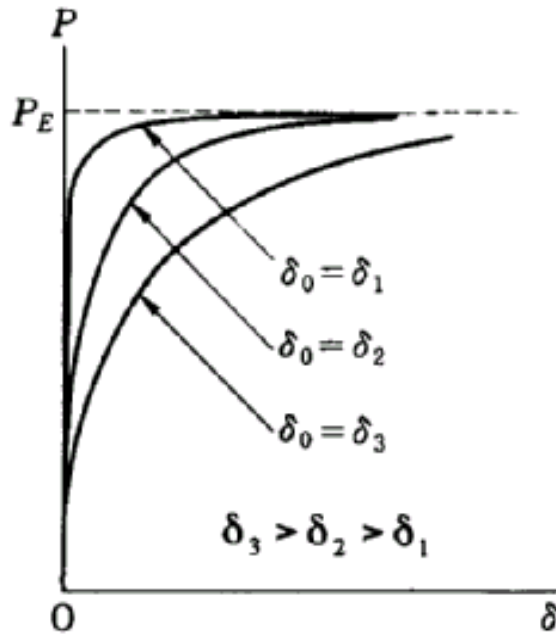


Figura 2.13. Curva carga – deflexão de colunas com imperfeição inicial.

A tensão de compressão máxima na coluna é a soma da tensão uniforme devido à força axial, $\sigma_N = P/A$ e à tensão de flexão, $\sigma_M = M_c / I$ devido ao momento fletor

$$M_c = P(e + \delta) \quad (2.2)$$

$$\sigma_{max} = \sigma_N + \sigma_M = P/A [1 + (ec/r^2) \sec(\pi/2 (P/P_E)^{0.5})] \quad (2.3)$$

onde c é a distância desde o eixo neutro da seção transversal ao extremo da superfície. Se a ruptura da coluna é definida de tal modo que a tensão máxima da coluna expressa na Equação (2.3) alcança a tensão de escoamento do material, então a tensão média σ_s da seção transversal é a mostrada na Equação (2.4), a qual é conhecida como Fórmula secante.

$$\sigma_s = P/A = \sigma_y / [1 + (ec/r^2) \sec(\pi/2 (P/P_E)^{0.5})] \quad (2.4)$$

Caso 2: Colunas com imperfeição inicial

O comportamento de uma coluna com imperfeições iniciais é semelhante ao analisado para colunas com carga excêntrica. Se a forma da deflexão inicial da coluna é assumida como senoidal com amplitude δ_0 , como apresentado na Figura 2.12 (b), a deflexão da coluna em $L/2$ é:

$$\delta + \delta_0 = [\delta_0 / 1 - (P/P_E)] \quad (2.5)$$

Quando a carga aplicada P é incrementada até a carga de Euler P_E , a deflexão da coluna diverge infinitamente, mostrando um comportamento semelhante ao apresentado na Figura 2.13. A tensão máxima σ_{max} devida à combinação da tensão axial uniforme e da tensão de flexão é:

$$\sigma_{max} = P/A \{1 + [\delta_0 c/r^2] [1/1 - (P/P_E)]\} \quad (2.6)$$

Se a ruptura da coluna ocorre para o valor de σ_{max} e a tensão de escoamento do material σ_Y , a tensão média σ_e da seção transversal é expressa como:

$$\sigma_e = 1/2 [\sigma_Y + \sigma_E (1 + \eta) - \{[\sigma_Y + \sigma_E (1 + \eta)]^2 - 4\sigma_E \sigma_Y\}^{0.5}] \quad (2.7)$$

onde $\sigma_E = P_E / A$, $\eta = \delta_0 c / r^2$. A Equação (2.7) é conhecida como a Fórmula Perry-Robertson. O coeficiente η pode ser tomado como função do parâmetro de esbeltez λ . A Equação (2.7) expressa a curva representativa da resistência das colunas de aço, considerando as imperfeições geométricas e do material assim como as tensões residuais (FUKUMOTO, 1997).

Caso 3: Colunas rígido - plásticas

O conceito de rótula plástica tem sido introduzido em problemas de resistência de colunas. Consideremos uma rótula plástica na metade do comprimento de uma coluna simplesmente apoiada, como está apresentado na Figura 2.14. Assumindo o equilíbrio entre as forças internas e externas, o

momento plástico M_P no ponto da rótula é igual a $P\delta$. A força axial resultante e o momento plástico de flexão correspondente à carga externa P , são calculados dependendo da forma da coluna. Para uma coluna de seção transversal retangular com largura b e comprimento d , a Equação (2.8) é obtida (KIHARA, 1967), (FUKUMOTO, 1997):

$$M / M_P + (P / P_Y)^2 = 1 \quad (2.8)$$

onde M_P é o momento plástico ($\sigma_Y b d / 4$) e P_Y , a força de escoamento axial ($\sigma_Y b d$).

Substituindo $M = P\delta$ na Equação (2.8), a deflexão da coluna δ será:

$$\delta = d/4 [P_Y/P - P/P_Y] \quad (2.9)$$

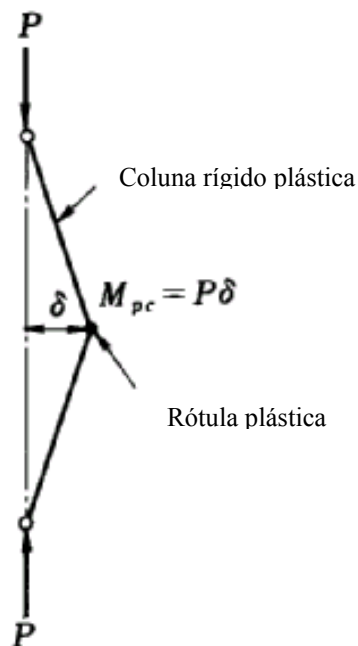


Figura 2.14. Momento desenvolvido numa coluna rígido plástica.

A relação entre a carga e a deflexão obtida da Equação (2.9) é representada pela linha desconínua da Figura 2.15. Esta linha começa na carga $P = P_Y$ e deflexão $\delta = 0$ e decresce com aumento de δ . De igual forma a curva carga -

deflexão de uma coluna elástica com deflexão inicial e excentricidade é plotada na Figura 2.15, junto com o comportamento de uma coluna elástica - plástica real. O comportamento da coluna real desvia-se da curva elástica no ponto elástico limite *A* e aproxima-se da curva de deflexão da coluna rígido - plástica depois da carga alcançar o ponto máximo *C*. Por isto, o comportamento da curva da coluna rígido - plástica pode ser tomado como a média da avaliação do comportamento da coluna (FUKUMOTO, 1997).

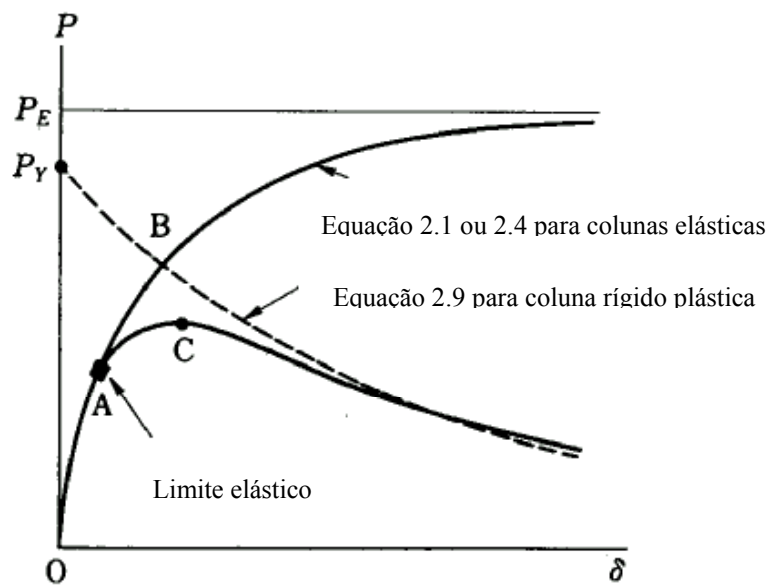


Figura 2.15. Curva carga vs. deflexão de uma coluna rígido plástica.

2.8.3. Teoria do módulo tangencial

O procedimento para obter a resistência à flambagem de uma coluna de um material com propriedades não lineares foi proposto por ENGESSRE (1989). Substituindo E pelo módulo tangencial E_t na fórmula de Euler tem-se:

$$\sigma_t = \pi^2 E_t / (L/r)^2 \quad (2.10)$$

ou

$$\sigma_t / \sigma_Y = (E_t/E) / \lambda^2 \quad (2.11)$$

O módulo tangente $E_t = d\sigma / d\varepsilon$, que é obtido a partir da tangente da curva tensão - deformação, obtém-se a partir da compressão do corpo de prova do material.

A curva do módulo tangencial de flambagem fornece uma boa estimativa para a carga de flambagem de colunas de metais não ferrosos, tais como ligas de alumínio e aços inoxidáveis centralmente carregadas devido à presença de tensões residuais (FUKUMOTO, 1997).

2.8.4. Flambagem de colunas de bambu

No caso do bambu, os testes de flambagem revelam uma grande variabilidade dos resultados, a qual é provocada pela condição natural dos corpos de prova. Não é possível definir uma única dimensão para os mesmos, já que a geometria do bambu é muito variável. Por outro lado, ressalta-se o fato de o bambu apresentar densidade e módulo de elasticidade variável ao longo de seu comprimento.

Por tudo isto, é praticamente impossível fixar o valor da tensão correspondente à carga crítica de uma coluna perfeitamente reta, para tensões maiores que o limite de proporcionalidade, em que se cumpririam as teorias de flambagem inelásticas, principalmente porque não há forma de ensaiar bambus teoricamente retos como poderíamos fazer para outras estruturas.

MOREIRA (1998), concluiu que é razoável na análise de colunas de bambu definir uma esbeltez (λ), correspondente à tensão limite de estabilidade do material, acima da qual o bambu estaria sujeito a flexão elástica. Na realidade os bambus submetidos a carga de compressão estarão sujeitos a flexo - compressão e sua carga limite será inferior à carga crítica, sendo este limite dado pela resistência máxima das fibras do lado côncavo, sob compressão.

A forma mais simples de realizar testes de flambagem em colunas de bambu é ensaiar sistemas bi-rotulados, nos quais a carga crítica é dada pela equação de Euler. Iniciam-se desta forma, os problemas com relação à geometria do bambu, devido a que todos os termos que intervêm na fórmula de Euler são variáveis que dependem desta geometria. O aumento da concentração de esclerênquima no sentido radial da seção transversal do bambu gera a existência de um gradiente

radial de rigidez, sendo inevitável a obtenção de diferentes módulos de elasticidade e tensões de ruptura para amostras do mesmo colmo. O aumento radial da concentração de esclerênquima gera da mesma forma um aumento da inércia física da seção transversal. Tem-se ainda o fato de que o bambu tem forma cônica, diminuindo sua seção transversal da base para o topo, não ocorrendo esta transição de forma contínua ao longo do colmo.

MOREIRA (1998), estudou o comportamento à flambagem das partes intermediária e topo de colmos da espécie *Dendrocalamus giganteus*, procedentes de Minas Gerais, com idade média estimada em 2,5 anos e diâmetro aproximado de 10 cm. Os corpos de prova, com umidade média de 13,3 %, foram ensaiados estaticamente, sob cargas de compressão aplicadas a passos de 2,33 kN. Para cada aumento da carga foram determinadas as deflexões laterais em L/2 e os deslocamentos verticais da prensa, o qual fornece um valor aproximado do encurtamento do bambu durante o teste de flambagem. A Figura 2.16 apresenta os valores obtidos no ensaio de um elemento de 1950 mm de comprimento.

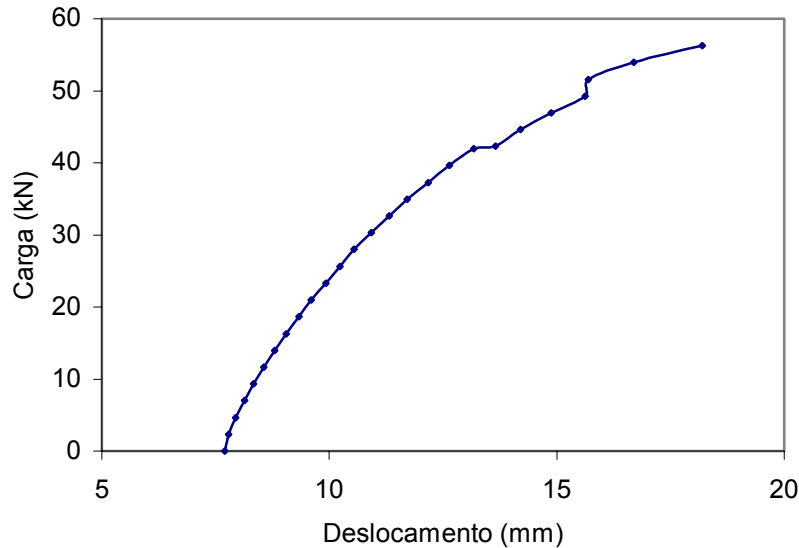


Figura 2.16. Gráfico carga – deslocamento obtido a partir de ensaio de flambagem para a espécie *Dendrocalamus giganteus*.

Foram medidas durante o ensaio as deformações em diversos pontos da superfície dos corpos de prova utilizando-se extensômetros elétricos longitudinais. A ruptura do elemento ocorreu na região prevista como de máxima imperfeição

inicial. O esmagamento progressivo das fibras ocorreu com um arco de 180 graus, sem trincas longitudinais. A perda total da capacidade de carga ocorreu na transição de 55,90 kN a 58,22 kN.

2.9. Considerações finais

Através da revisão bibliográfica, se torna possível realizar o trabalho experimental, determinando as principais características físicas, mecânicas e mesoestruturais da espécie *Phyllostachys aurea*, uma das mais conhecidas e menos estudadas na literatura, dando-se ênfase ao comportamento a flambagem de colunas esbeltas quando submetidas a carga axial.