

3.

Determinação das Propriedades Físicas, Mecânicas e Mesoestruturais do Bambu da Espécie *Phyllostachys aurea*

3.1. Introdução

A fim de se obter dados que permitam a caracterização do bambu da espécie *Phyllostachys aurea*, este foi submetido a ensaios de mapeamento das propriedades físicas (espessura, diâmetro exterior, interior e comprimento internodal). Foram feitos ensaios mecânicos de tração, compressão, cisalhamento e da mesoestrutura através do Processamento Digital de Imagens (PDI).

Os trabalhos experimentais foram desenvolvidos no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM), do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. Nestes estudos foram analisados colmos inteiros de bambu com idade aproximada entre dois e três anos, proveniente de um bambuzal localizado na cidade de Bananal, estado de São Paulo.

Os bambus foram cortados no dia 15 de Outubro de 2001. O corte foi feito a uma altura aproximada de 20 cm acima do nível do solo e foram deixados em posição vertical, apoiados no lugar, acima do mesmo colmo ou sobre pedras, ainda com galhos, em posição vertical, para serem curados por um período de cinco semanas. Posteriormente os galhos foram retirados e os colmos cortados em comprimento de três metros para serem transportados para o LEM-PUC-Rio.

3.2. Tratamentos preservativos

Foram realizados dois tipos de tratamento diferentes, com o objetivo de analisar a possível influência dos mesmos nas propriedades mecânicas da espécie e comparar estas propriedades quando o bambu encontra-se no seu estado natural, ou seja, curado e secos ao ar.

a) Secagem ao fogo:

Os colmos curados no bambuzal foram transportados para o LEM, onde permaneceram empilhados verticalmente em uma área coberta, expostos ao ar e protegidos do sol e da chuva por um período de quatro semanas. Após este período os colmos foram colocados a uma altura aproximada de 50 cm do nível do solo, onde foi colocado carvão vegetal em camada com uma altura aproximada de 15 cm. Para conseguir um aquecimento uniforme, o bambu foi girado constantemente até secar e começar a mudar a cor. Todos os colmos tratados foram pesados antes e depois de tratados para determinar o teor de umidade dos mesmos.

b) Banho quente:

O tratamento foi realizado em banho quente com água. Os colmos, previamente secos ao ar, desprovidos de galhos e cortados em comprimentos aproximados de 30 cm foram imersos em água a uma temperatura aproximada de 90 °C, permanecendo nela por um período de 30 minutos para alcançar a saturação máxima. Desta maneira, os grânulos de amido podem ser decompostos termicamente.

3.3. Determinação das propriedades físicas

3.3.1. Metodologia empregada no mapeamento das propriedades físicas

Para a determinação das propriedades físicas foram selecionados quatro colmos com comprimento aproximado de 12 metros, divididos em base, intermediário e topo. Os internós foram numerados da base para o topo. O comprimento foi medido de forma experimental com relação a um eixo de coordenadas. O diâmetro exterior foi medido com paquímetro.

Para determinar a espessura da parede do colmo foram feitos dois furos de 5 mm de diâmetro em cada internó utilizando uma furadeira elétrica. Para cada furo efetuou-se duas leituras utilizando-se paquímetro, sendo obtido o diâmetro interno mais a espessura de uma das extremidades. A partir da leitura calculou-se a espessura da parede através da expressão:

$$t = D_{\text{externo}} - X \quad (3.1)$$

sendo t a espessura da parede do colmo (mm) e X a leitura efetuada com paquímetro (mm). Foi considerado na análise o valor médio das duas leituras efetuadas para cada furo.

Uma vez realizadas as medições correspondentes foi possível obter as curvas que relacionam diâmetro externo, diâmetro interno, espessura de parede e comprimento internodal com as coordenadas dos internós para cada colmo e analisar a variação de suas características físicas ao longo do mesmo.

3.3.2. Resultados do mapeamento das propriedades físicas

Nesta seção, apresenta-se o estudo da variação dos diâmetros, espessura de parede e comprimento internodal do colmo de bambu inteiro da espécie *Phyllostachys aurea*. Nos ensaios realizados a quatro colmos inteiros, pode-se constatar que o comprimento internodal apresenta um comportamento bem definido, sendo menor na base e topo e maior na parte intermediária. O diâmetro externo diminui da base para o topo e a espessura da parede varia irregularmente ao longo do colmo. As Figuras 3.1, 3.2 e 3.3 apresentam a variação do comprimento internodal, diâmetro exterior e espessura da parede ao longo do colmo inteiro do bambu.

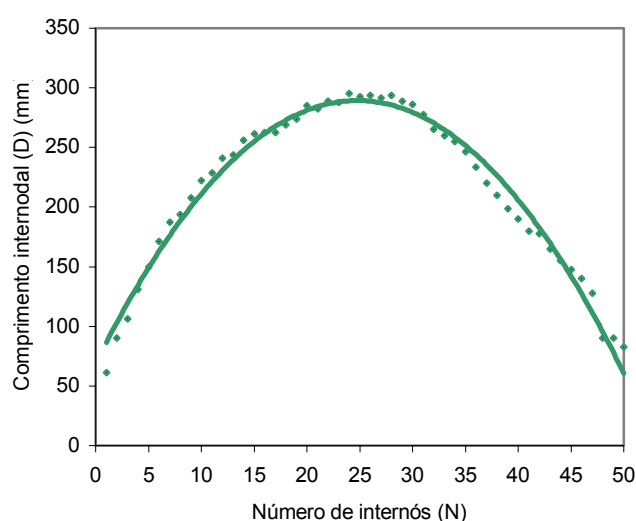


Figura 3.1. Comprimento internodal médio ao longo do colmo inteiro de bambu da espécie *Phyllostachys aurea*.

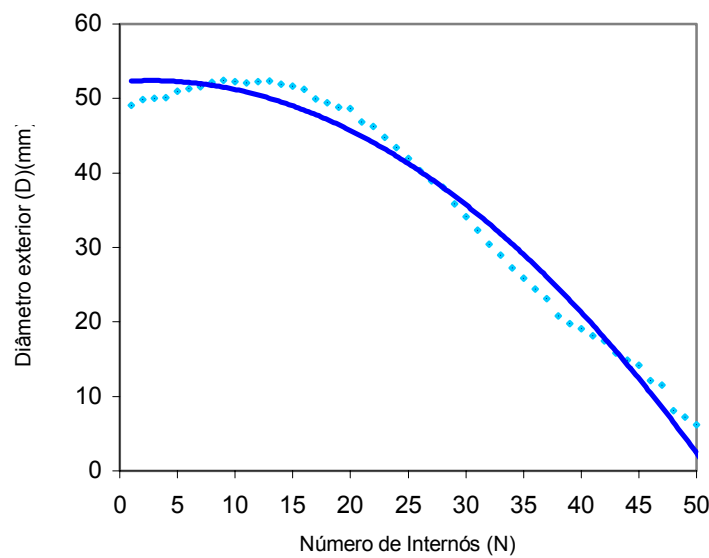


Figura 3.2. Diâmetro exterior médio ao longo do colmo inteiro de bambu da espécie *Phyllostachys aurea*.

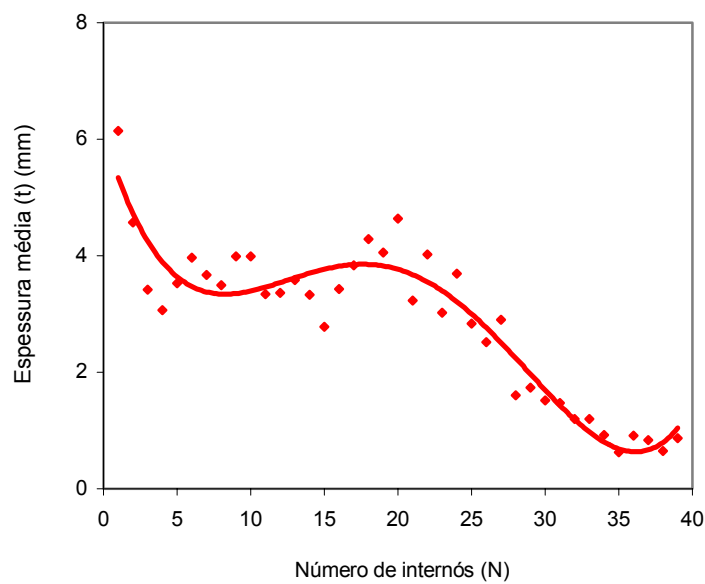


Figura 3.3. Espessura média ao longo do colmo inteiro de bambu da espécie *Phyllostachys aurea*.

Com base nos dados obtidos, fez-se um estudo através da análise de regressão do comportamento normal da distribuição do número de internós, em função do comprimento internodal, diâmetro externo e espessura da parede.

Através do método de tentativas foram estabelecidas as fórmulas matemáticas que relacionam o número de internós (N) com o comprimento internodal (L), espessura de parede (t) e diâmetro externo (D). As equações consideradas são as que apresentaram maior coeficiente de correlação (R^2), que indica o maior percentual de acertos para os valores desejados.

A Tabela 3.3.2.1 compara os valores obtidos nesta tese com os valores obtidos por GHAVAMI e MARINHO (2001). A espécie *Phyllostachys aurea* possui menor diâmetro, comprimento total e comprimento internodal que as espécies *Dendrocalamus giganteus*, *Guadua angustifolia*, *Guadua tagoara*, *Mosó* e *Matake*.

Dos estudos realizados determinou-se que os colmos podem ajustar-se a uma equação de segunda ordem com coeficiente de correlação da ordem de 0,98 para o comprimento internodal e diâmetro externo e de 0,89 para a espessura de parede (ver Tabela 3.3.2.2). A partir destas equações pode-se escolher as características físicas da espécie. As equações obtidas apresentam um alto grau de certeza, sendo da ordem dos valores reportados na literatura para outras espécies de bambu.

Tabela 3.3.2.1. Comparação dos valores médios de comprimento internodal, diâmetro exterior e espessura de parede, medidos experimentalmente para diferentes espécies de bambu.

Propriedades	Dendroc. giganteus	Guadua angustifolia	Guadua tagoara	Matake	Mosó	Ph. aurea
comprimento total (mm)	18850	15550	15230	20450	15680	10716
comprimento internodal médio (mm)	392,68	229,80	346,09	335,30	290,43	210,12
Diâmetro exterior médio (mm)	79,87	79,56	83,70	70,22	78,63	36,12
Espessura média da parede (mm)	17,03	22,13	26,21	25,16	19,86	2,877

Tabela 3.3.2.2. Equações obtidas a partir da análise de regressão que caracterizam o comportamento físico da espécie *Phyllostachys aurea*.

Propriedade física	Equação do gráfico	Coefficiente de correlação
comprimento internodal	$L = -0,3591x^2 + 17,787x + 69,014$	0,9799
diâmetro exterior	$D = -0,0223x^2 + 0,1197x + 52,243$	0,9804
espessura da parede	$t = 4E-05x^4 - 0,0034x^3 + 0,0878x^2 - 0,8545x + 6,111$	0,8941

3.4. Análise da mesoestrutura do colmo de bambu da espécie *Phyllostachys aurea*

Para que se possa utilizar as equações da regra das misturas para a análise dos bambus, é necessário adaptar estas equações de maneira a se considerar a variação da fração volumétrica das fibras na espessura. Considerando que esta variação na distribuição das fibras se dê segundo um eixo x , onde a origem é a parede interna e o limite máximo é a parede externa do colmo de bambu, as equações da regra das misturas passariam a ser representadas na forma da Equação (3.2). A determinação da forma como esta variação foi feita utilizando-se como ferramenta o PDI.

$$E_c = f(x) = E_f V_f(x) + E_m (1 - V_f(x)) \quad (3.2)$$

onde E_c é o módulo de elasticidade do compósito, E_f é o módulo de elasticidade das fibras, E_m é o módulo de elasticidade da matriz e $V_f(x)$ é a variação do volume de fibras ao longo do eixo horizontal (x).

As amostras foram extraídas de três colmos inteiros de bambu analisando-se base, trecho intermediário e do topo dos mesmos. O método utilizado para a determinação da fração volumétrica das fibras e sua variação na espessura foi o seccionamento da imagem em fatias (ou seções) perpendiculares à direção de variação da concentração das fibras, sendo considerada que a distribuição destas

dentro de cada seção é uniforme. Tendo-se calculado as frações volumétricas em cada seção, os valores correspondentes são plotados em um gráfico em função da posição.

As amostras de bambu foram lixadas utilizando lixas de água N_o (400, 600 e 1000) e polidas com pasta de alumínio (6 µm e 3 µm) para serem observadas e fotografadas em lupa com aumento de 6x. As imagens registradas em filme negativo preto e branco foram digitalizadas através de um scanner de negativos. Sendo obtidas imagens em preto e branco, como mostrado na Figura 3.4.

As manipulações realizadas sobre as imagens foram, a partir deste estágio, realizadas no software KS400 3.0. O pré-processamento foi iniciado com o seccionamento da imagem, tratando-se cada seção separadamente, até o estágio de extração de atributos. Ainda em pré-processamento, foi feita a correção da intensidade luminosa, irregular na imagem original, através da subtração do fundo (parte clara).

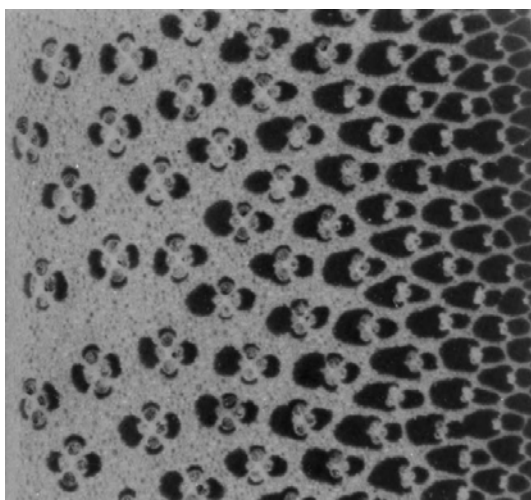


Figura 3.4. Variação da distribuição das fibras ao longo da espessura do colmo de bambu *Phyllostachys aurea*.

A separação dos elementos de interesse (fibras) foi feita por segmentação automática, o que forneceu bons resultados. O pós-processamento realizado foi o descarte de ruídos, pequenos elementos que foram considerados como fibra pela segmentação automática. Passou-se então às extrações dos atributos, no caso a fração volumétrica de fibras.

Preliminarmente foram feitos os cálculos da fração volumétrica de fibras para diferentes seccionamentos em cada amostra, ou seja, considerou-se a imagem dividida em 4, 8 e 12 seções, sendo os resultados mostrados na Figura 3.5, para a amostra extraída da base, Figura 3.6, para amostra da região intermediária do colmo e Figura 3.7 para a amostra do topo. A posição da fatia foi normalizada dividindo-se seu valor correspondente pela espessura total.

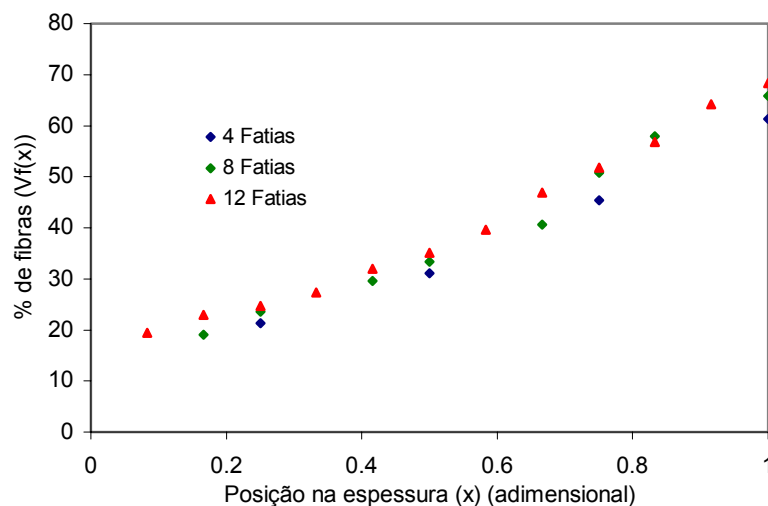


Figura 3.5. Variação do volume de fibras ao longo da espessura da parede da região basal.

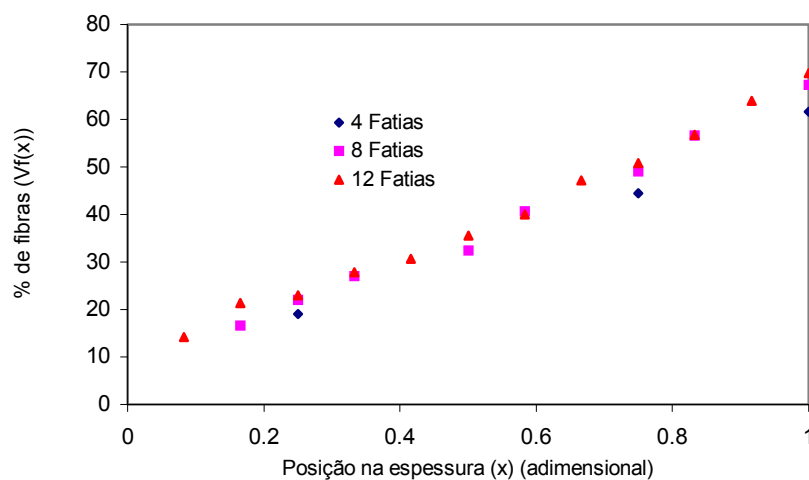


Figura 3.6. Variação do volume de fibras ao longo da espessura da parede da região intermediária.

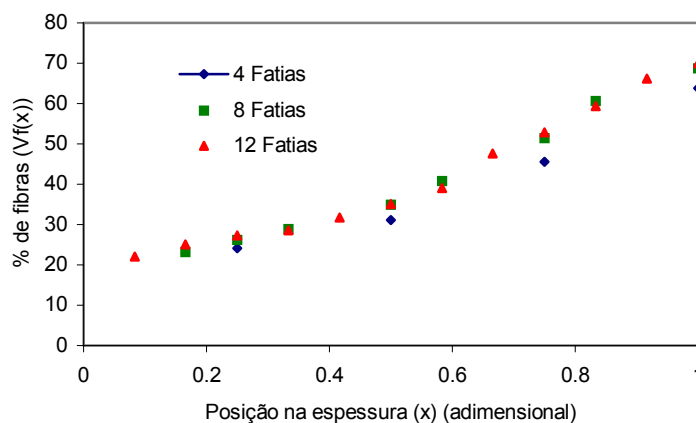


Figura 3.7. Variação do volume de fibras ao longo da espessura da parede do topo.

Das Figuras 3.5, 3.6 e 3.7 observa-se que os diferentes seccionamentos não resultam em diferenças expressivas na variação de fração volumétrica, visto que as curvas de ajuste para os pontos considerados são praticamente coincidentes. A Tabela 3.4.1 representa as equações que caracterizam as variações de volume a partir dos diferentes seccionamentos.

Tabela 3.4.1 Equações para determinação do volume de fibras ao longo da espessura do colmo.

Região do colmo	Seccionamento	Equação característica	Coefficiente de correlação (R^2)
Base	4 fatias	$V_{f(x)}=24,76x^2+22,79x+13,95$	0,9995
	8 fatias	$V_{f(x)}=24,87x^2+26,37x+15,336$	0,9964
	12 fatias	$V_{f(x)}=30,08x^2+22,19x+17,443$	0,9968
Intermedio	4 fatias	$V_{f(x)}=26,76x^2+23,64x+11,301$	0,9996
	8 fatias	$V_{f(x)}=27,54x^2+26,40x+13,150$	0,9991
	12 fatias	$V_{f(x)}=21,37x^2+35,58x+12,800$	0,9966
Topo	4 fatias	$V_{f(x)}=45,22x^2-3,20x+21,973$	0,9993
	8 fatias	$V_{f(x)}=41,89x^2+6,69x+21,383$	0,9959
	12 fatias	$V_{f(x)}=41,51x^2+9,37x+21,399$	0,9932

Dos gráficos obtidos para as amostras do bambu *aurea*, pode-se verificar que não existe diferença significativa na distribuição da fração volumétrica em relação à posição da amostra no bambu. Observa-se na Figura 3.8, que tanto para a base, como na região intermediária e topo o volume de fibras aumenta à medida que se consideram pontos na espessura.

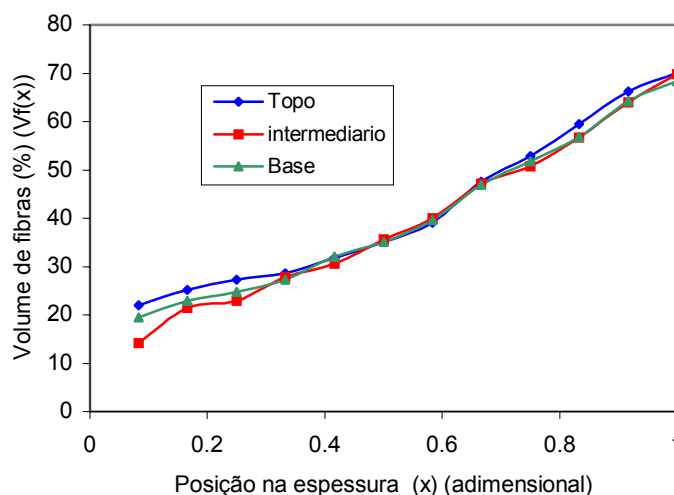


Figura 3.8. Variação do volume de fibras ao longo do comprimento do colmo.

A aplicação do PDI para a análise do comportamento das fibras ao longo da espessura das amostras forneceu resultados que podem ser considerados satisfatórios, uma vez que não se tem outras fontes de comparação na literatura nem tampouco resultados "analógicos" das grandezas medidas neste trabalho para a espécie de bambu envolvidas. Os resultados obtidos são coerentes aos apresentados por GHAVAMI et. al. (2001) ao estudar amostras das espécies *Dendrocalamus giganteus* e *Mosó*.

3.5. Determinação das propriedades mecânicas

As propriedades físicas e mecânicas dos colmos de bambu estão fortemente relacionadas com sua estrutura anatômica. Macroscopicamente, as propriedades mecânicas do colmo são determinadas pelo peso específico, o qual varia aproximadamente de 0,5 a 0,9 g/cm³. O peso específico depende principalmente do conteúdo de fibras, diâmetro das fibras e espessura da parede das células. É por isso que varia consideravelmente dentro do colmo e entre diferentes espécies

(LIESE, 1998). A resistência mecânica aumenta durante a maturidade do colmo (de 1 a 3 anos). Na parte externa do colmo a distribuição das fibras é mais densa por apresentar maior peso específico que a parte interna da parede do colmo. A concentração de fibras na região externa da parede do colmo pode ser encarada em termos de engenharia como a maximização do raio de giração. Os ensaios descritos a seguir foram realizados de acordo com as normas propostas pelo *INTERNATIONAL NETWORK ON BAMBOO AND RATTAN (INBAR, 2000)* para “Determinação das Propriedades Físicas e Mecânicas do Bambu”.

3.5.1. Determinação da resistência à tração

Para determinar a resistência à tração da espécie *Phyllostachys aurea* foram selecionados três colmos, os quais foram analisados no seu estado de seco ao ar, seco ao fogo e submetido a banho quente. Para o estudo em questão, foram confeccionados dois corpos de prova de cada uma das regiões de cada colmo: base, região intermediária e topo, analisando corpos de prova com e sem a presença de nó. Os corpos de prova foram preparados de acordo com a norma proposta pela INBAR (2000): tiras de bambu com comprimento de 20 cm, 1 cm de largura e a espessura própria da parede do colmo, de onde foi retirada a amostra. A Figura 3.9 representa as dimensões do corpo de prova.

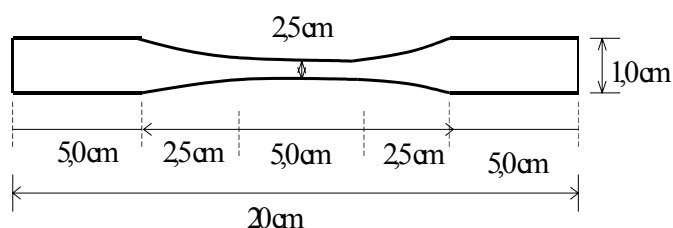


Figura 3.9. Forma e dimensões do corpo de prova.

Para fixar o bambu na máquina, de modo que, ao aplicar a carga, não escorregasse, utilizaram-se chapas de alumínio de 1 cm de largura, 5 cm de comprimento e espessura em torno de 2-3 mm. Estas foram coladas ao bambu

utilizando Silkadur gel e lixadas para melhorar a aderência entre o corpo de prova a ensaiar e a garra (ver Figura 3.10).

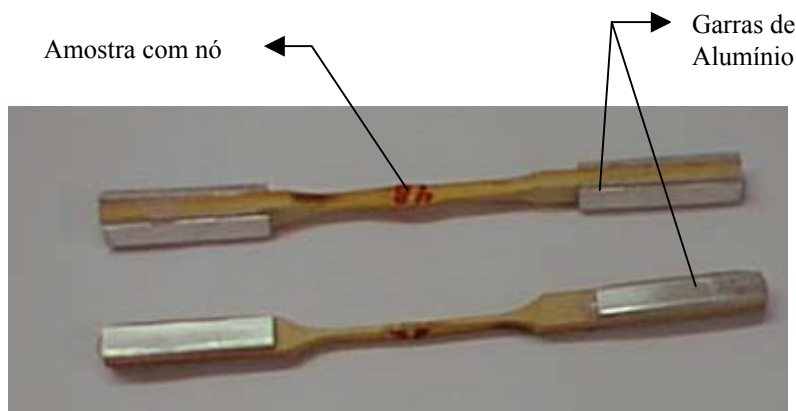


Figura 3.10. Corpos de prova para ensaio de tração.

O teste foi realizado no Laboratório do Instituto Tecnológico da PUC-Rio (ITUC) (ver Figura 3.11). As deformações foram medidas com strain gages bidimensionais utilizando a INSTRON 500 e o Vishay para a leitura das deformações. Este ensaio foi realizado a uma temperatura de 23 °C, umidade do local em torno 60 %, umidade das amostras entre 6-8 %. Para cada carga aplicada a intervalos de 1 N, a uma velocidade de 0,5 mm/min, foram registradas as deformações até chegar à carga de ruptura ($P_{máx}$). A resistência à tração máxima foi determinada pela seguinte expressão:

$$\sigma_{ult} = P_{máx} / A \quad (N/mm^2) \quad (3.3)$$

onde, $P_{máx}$ é a máxima carga aplicada durante o teste e A é a área da seção transversal do corpo de prova.

O módulo de elasticidade foi calculado a partir do resultado das leituras das deformações, como uma relação linear entre tensão-deformação, considerando entre 20 % - 80 % da tensão máxima (σ_{ult}). As Figuras 3.12 e 3.13 apresentam as deformações ocorridas ao longo do comprimento de um colmo seco ao ar, analisando amostras sem nó e com nó, respectivamente. Os resultados dos testes de tração são apresentados na Tabela 3.5.1.



Figura 3.11. Colocação do corpo de prova na INSTRON 500.

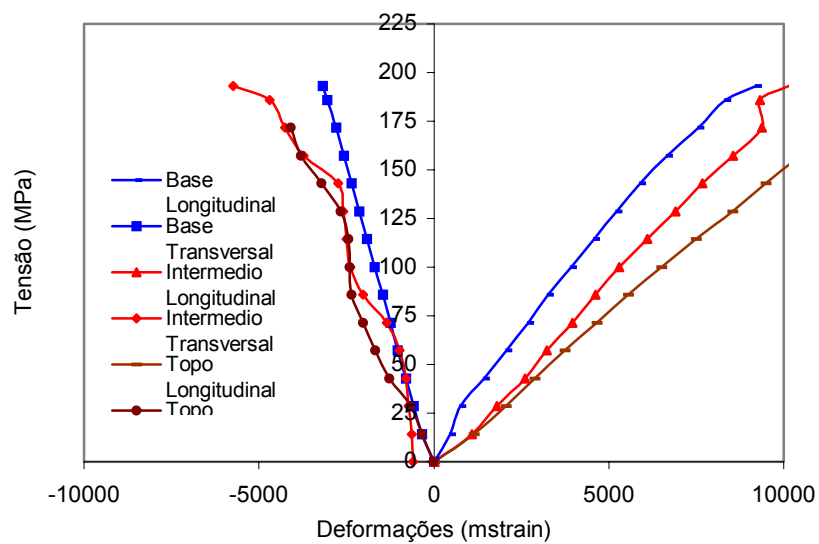


Figura 3.12. Curvas tensão – deformação obtidas durante o ensaio de tração.

Amostras sem nó.

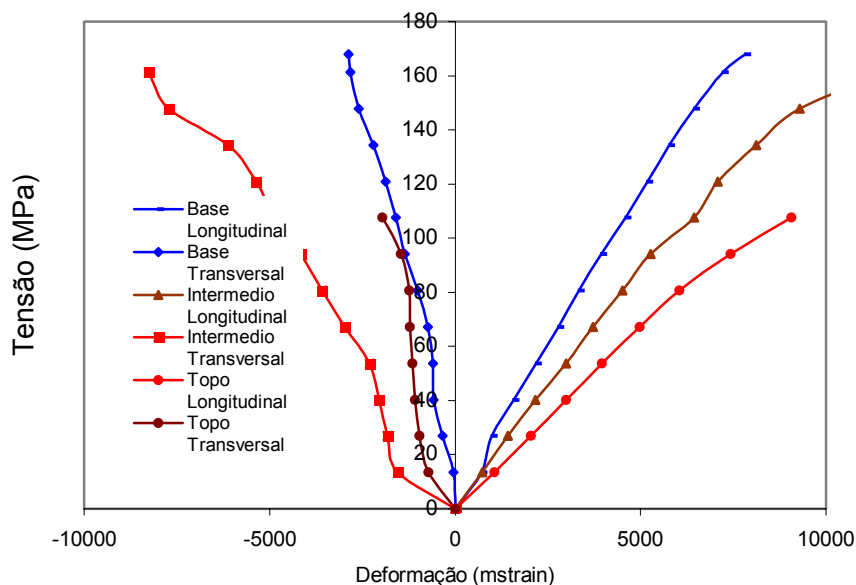


Figura 3.13. Curvas tensão – deformação obtidas durante o ensaio de tração.

Amostras com nó.

Através dos resultados apresentados observa-se que a resistência à tração alcança seu valor máximo no topo do colmo atingindo um valor de 272 MPa, para as amostras secas ao ar, 277,45 MPa nas amostras secas com fogo e 335,26 MPa nas amostras tratadas com banho quente. Os corpos de prova sem nó apresentaram maior resistência que as amostras extraídas da região nodal, sendo de 167,18 MPa para os corpos de prova secos ao ar, 104,49 MPa para as amostras secas com fogo e 165 MPa para os corpos de prova tratados com banho quente. A diminuição da resistência nas amostras com nó é devido principalmente à descontinuidade das fibras nestes pontos. Na Figura 3.14 fica demonstrado que nestes corpos de prova a ruptura sempre ocorre no nó o bem próximo a ele. De acordo com o estudo realizado, observa-se que os tratamentos preservativos, embora não prejudicaram a resistência das amostras, não provocaram uma melhoria na resistência à tração quando comparados com os resultados obtidos para amostras em estado natural, ou seja, secas ao ar. As diferenças observadas nos resultados são contempladas no percentual de acerto dos testes. As variações do módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson não foram significativas.

Tabela 3.5.1. Resultados obtidos no ensaio à tração do bambu *Phyllostachys aurea* em função do tipo de tratamento.

Tipo de Tratamento		Tipo de Amostra					
		Base c/nó	Base s/nó	Intermediário c/nó	Intermediário s/nó	Topo c/nó	Topo s/nó
Secagem ao ar	$P_{\text{máx}}$ (kN)	2,60	2,70	2,60	2,80	1,60	2,80
	$\sigma_{\text{tmáx}}$ (MPa)	174,75	193,13	220,34	234,80	167,18	272,42
	E_L (GPa)	19,00	18,47	16,38	20,78	15,20	23,75
	ν	0,32	0,29	0,34	0,25	0,22	0,29
Secagem ao fogo	$P_{\text{máx}}$ (kN)	2,40	2,00	2,19	2,15	1,00	240,00
	$\sigma_{\text{tmáx}}$ (MPa)	161,31	169,49	168,92	170,85	104,49	277,45
	E_L (GPa)	20,66	21,60	24,60	22,10	18,19	24,31
	ν	0,40	0,33	0,28	0,35	0,29	0,32
Banho quente	$P_{\text{máx}}$ (kN)	2,91	3,02	2,50	3,50	1,60	290,00
	$\sigma_{\text{tmáx}}$ (MPa)	202,90	208,45	228,13	293,50	165,00	335,26
	E_L (GPa)	24,22	22,16	18,31	26,14	16,49	21,17
	ν	0,42	0,32	0,39	0,21	0,25	0,23

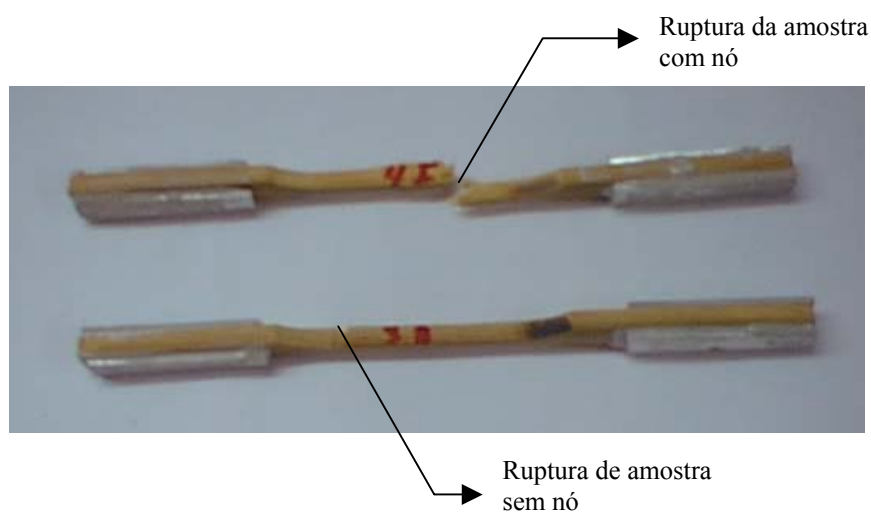
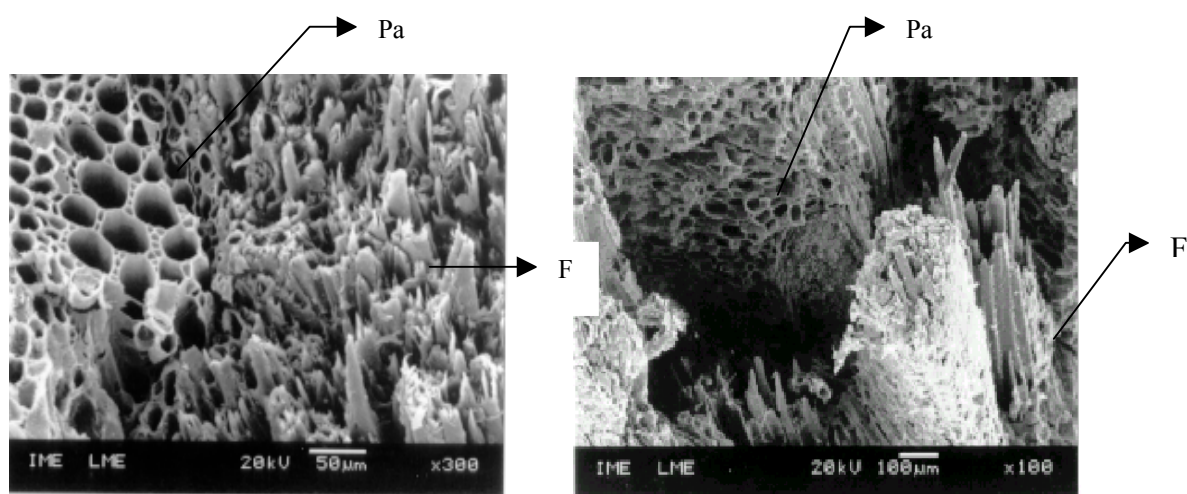


Figura 3.14. Rupturas ocorridas em ensaio de tração.

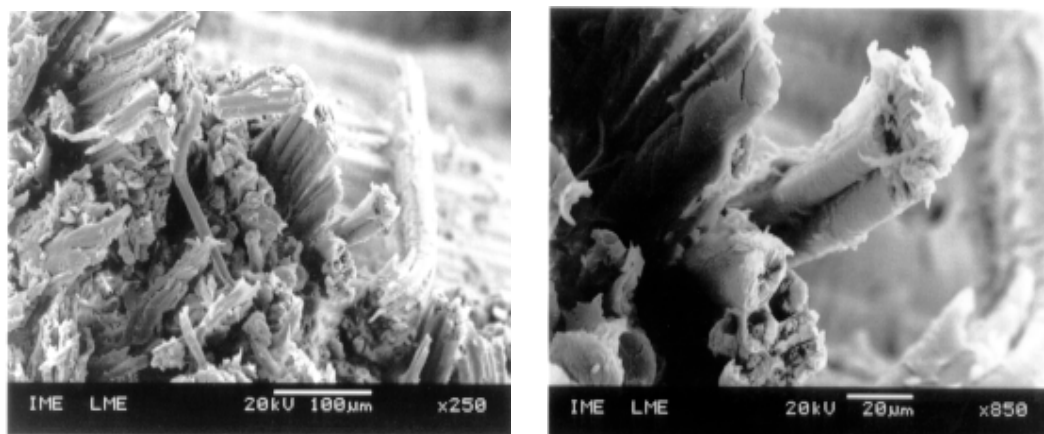
A ruptura das fibras, ocorrida durante o ensaio de tração, pode ser visualizada através de microscopia eletrônica. A sequência de micrografias apresentada a seguir (Figuras 3.15 e 3.16) mostra o modo de ruptura de uma região internodal. As imagens foram processadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica do IME, a escala variável entre 10 μm e 100 μm e fator de ampliação entre 100 e 1000 x.



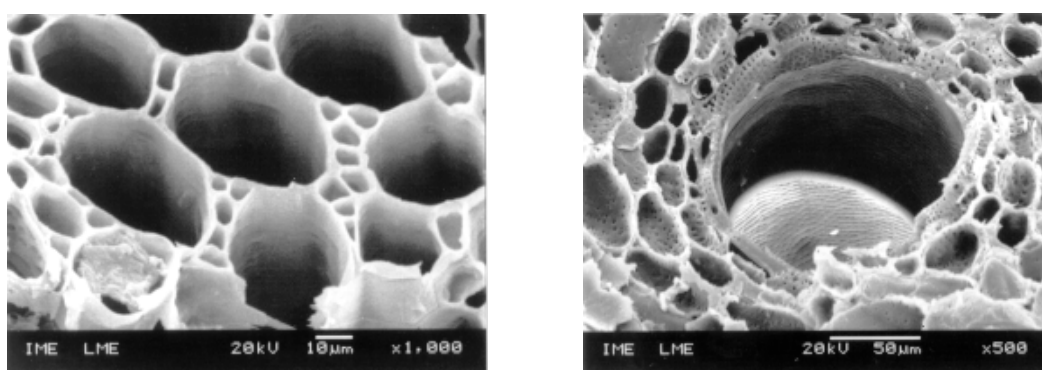
a) Escala 50 μm , fator de ampliação 300 x.

b) Escala 100 μm , fator de ampliação 100 x.

Figura 3.15. Modo de ruptura à tração de amostra extraída da região internodal do colmo de *Phyllostachya aurea*. F – fibra, Pa – Parênquima.



a) Ruptura das fibras durante o ensaio de tração.



b) Vasos condutores da Seiva.

Figura 3.16. Microestrutura de corpo de prova ensaiado a tração.

As imagens comprovam a fratura frágil no parênquima, caracterizada por uma superfície plana, regular. Já nas fibras celulósicas (esclerênquima), nota-se uma grande irregularidade na superfície de fratura. Pela forma em que as fibras estão orientadas entre si, sugere-se um “efeito rebote” após estas serem rompidas bruscamente sob altas deformações. O modo de fratura demonstrado nesta região da microestrutura confirma o papel estrutural do esclerênquima. Além de garantir resistência ao colmo, as fibras, por resistirem à altas deformações garantem elevada tenacidade ao bambu. Imagens complementares à análise do modo de ruptura das fibras são apresentadas no Apêndice A.

As máximas deformações desenvolvidas durante os ensaios ocorreram no sentido longitudinal às fibras naquelas amostras extraídas da parte intermediária e do topo sem nó. Os resultados podem ser avaliados favoravelmente quando são comparados com resultados obtidos por GHAVAMI e MARINHO (2001) ao

estudar a espécie *Dendrocalamus giganteus* e por GHAVAMI e MARINHO (2002) para a espécie *Guadua angustifolia* (ver Tabela 3.5.2). Nos ensaios realizados, a espécie *Phyllostachys aurea* apresentou maior resistência à tração (272,4 MPa) que a espécie *Dendrocalamus giganteus* (159,30 MPa) e a espécie *Guadua angustifolia* (115,80 MPa) para amostras secas de forma natural (secagem ao ar).

Tabela 3.5.2. Comparação da resistência à tração da espécie *Phyllostachys aurea* com outras espécies estudadas na PUC-Rio.

Região do colmo	Dendrocalamus Giganteus		Guadua angustifolia		Phyllostachys aurea	
	$\sigma_{\text{tmáx}}$ (MPa)	E_L (GPa)	$\sigma_{\text{tmáx}}$ (MPa)	E_L (GPa)	$\sigma_{\text{tmáx}}$ (MPa)	E_L (GPa)
Topo s/n	147,1	-	115,8	18,4	272,4±0,08	23,7
Topo c/n	116,3	18,3	64,2	11,2	167,1±0,06	15,2
Intermediário s/n	224,0	-	95,8	18,1	234,8±0,12	20,7
Intermediário c/n	118,8	20,8	82,6	11,1	220,3±0,18	16,3
Base s/n	159,3	23,1	93,4	16,2	193,1±0,09	18,4
Base c/n	73,1	11,7	69,9	15,7	174,7±0,13	19,0

3.5.2. Resistência ao cisalhamento

Os esforços que provocam o deslizamento de um plano sobre outro, podem ocorrer nas peças de bambu paralela, oblíqua ou transversalmente às fibras. Pela própria configuração fibrosa da planta e pela presença de defeitos preexistentes, principalmente de fendas e fissuras de origens variadas, a resistência ao cisalhamento é mínima quando se desenvolve paralelamente às fibras. É por isto que seu uso não é recomendável quando devem resistir a esforços nesta direção. O cisalhamento oblíquo ocorre quando a peça submetida à compressão possui tortuosidade que origina excentricidade na aplicação da carga, ocorrendo rupturas

com ângulo aproximado de 45°. Este tipo de cisalhamento não será analisado neste capítulo. Por último, o cisalhamento transversal às fibras é o mais comum e também o mais fácil de ser determinado. A resistência do bambu neste sentido é maior que quando é solicitado no sentido das fibras, aspecto que será demonstrado no transcurso deste item.

Para a determinação da tensão de cisalhamento interlaminar, utilizam-se as normas para madeira adaptadas para bambu, utilizando corpos de prova com dois cortes. Para a realização destes ensaios os corpos de prova foram preparados com ferramentas convencionais, tendo cuidado dos cortes transversais não ultrapassarem o eixo de simetria (ver Figura 3.17), pois quando isto ocorre o corpo de prova pode romper por esforço de tração, tornando o resultado pouco confiável.

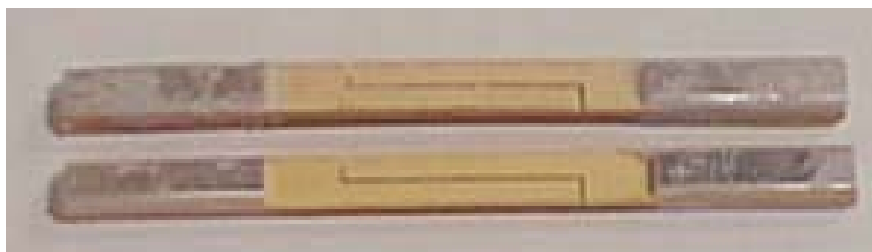


Figura 3.17. Dimensionamento dos cortes transversais com respeito ao eixo de simetria.

Os ensaios de cisalhamento interlaminar foram realizados no ITUC, utilizando a máquina INSTRON 500 com velocidade de aplicação da carga de 1 mm/min, temperatura do local 23 °C e umidade de 60 % (ver Figura 3.18). Foram ensaiados três colmos inteiros secos ao ar, tratados com banho quente e secagem ao fogo respectivamente, analisando amostras extraídas das regiões nodais e internodais da base, intermediária e topo de cada colmo. A Figura 3.19 apresenta a ruptura de uma amostra durante o teste de cisalhamento.



Figura 3.18. Posição da amostra na INSTRON 500



Figura 3.19. Ruptura do corpo de prova.

Os resultados obtidos a partir dos testes são apresentados nas Tabelas 3.5.3, 3.5.4 e 3.5.5. Os valores da tensão aumentam da base para o topo, atingindo o máximo de 4,64 MPa para amostras sem nó extraídas do topo dos colmos. Observa-se que nos corpos de prova sem nó a resistência ao cisalhamento é maior e mantém-se quase uniforme ao longo do colmo. Já nas regiões com nó os resultados são menores.

Os valores podem ser comparados com os resultados apresentados por GHAVAMI e MARINHO (2001), para a espécie *Dendrocalamus giganteus*. Eles obtiveram tensões de 3,56 MPa e 3,37 MPa para corpos de prova com nó e sem nó respectivamente. GHAVAMI e SOUZA (2000) obtiveram valores médios de 3,08 MPa e 3,11 MPa para o *Dendrocalamus giganteus* para corpos de prova com dois e três cortes.

Como pode ser observado na Tabela 3.5.6, a resistência ao cisalhamento não apresentou tendência a aumentar ou diminuir após efetuado o tratamento preservativo nos corpos de prova. As amostras secas ao ar apresentaram tensões máximas na região intermediária e no topo sem nó, sendo da ordem de 4,60 e 4,64 MPa, respectivamente. A maior resistência ao cisalhamento foi atingida pelas amostras secas ao fogo, apresentando valores de 4,64 e 4,70 MPa nas regiões intermediárias e topo sem nó. No caso dos corpos de prova tratados com banho quente, a tensão atingiu valores máximos de 3,88 MPa para a parte intermediária e topo sem nó.

Tabela 3.5.3. Resistência ao cisalhamento interlaminar do bambu *Phyllostachys aurea*. Tipo de tratamento: Secagem ao ar.

Percentual de umidade das amostras: 6 – 8 %.

Região internodal	Corpo de prova	τ (MPa)	τ media (MPa)
Base s/nó	A-1	3,24	3,92 +/- 0,61
	A-2	4,14	
	A-3	4,40	
Base c/nó	A-N1	2,94	3,09 +/- 0,14
	A-N2	3,21	
	A-N3	3,12	
Intermediária s/nó	A-4	4,33	4,61 +/- 0,59
	A-5	4,20	
	A-6	5,28	
Intermediária c/nó	A-N4	3,65	3,40 +/- 0,27
	A-N5	3,11	
	A-N6	3,43	
Topo s/nó	A-7	4,38	4,64 +/- 0,23
	A-8	4,74	
	A-9	4,80	
Topo n/nó	A-N7	4,03	4,10 +/- 0,27
	A-N8	3,87	
	A-N9	4,40	

Tabela 3.5.4 Resistência ao cisalhamento interlaminar do bambu *Phyllostachys aurea*. Tipo de tratamento: Secagem ao fogo.

Percentual de umidade das amostras: 6 – 8 %.

Região internodal	Corpo de prova	τ (MPa)	τ media (MPa)
Base s/nó	F-1	4,88	4,24 +/- 0,56
	F-2	3,99	
	F-3	3,85	
Base c/nó	F-N1	3,82	3,78 +/- 0,18
	F-N2	3,93	
	F-N3	3,59	
Intermediária s/nó	F-4	5,57	4,65 +/- 0,80
	F-5	4,19	
	F-6	4,18	
Intermediária c/nó	F-N4	4,54	4,53 +/- 0,04
	F-N5	4,49	
	F-N6	4,56	
Topo s/nó	F-7	4,15	4,70 +/- 0,62
	F-8	4,59	
	F-9	5,37	
Topo n/nó	F-N7	4,44	4,56 +/- 0,22
	F-N8	4,41	
	F-N9	4,81	

O aumento da resistência ao cisalhamento da base para o topo pode ser explicado pela diminuição da espessura da parede do colmo, a qual LIESE (1998) associa com o aumento da resistência mecânica, especialmente pela parte interna da parede do colmo a qual contém menos parênquima e maior quantidade de fibras. O modo em que ocorreu a ruptura das fibras é apresentado na Figura 3.20. A imagem foi obtida por microscopia eletrônica de varredura no IME com escala de 50 μ m e fatores de ampliação de 350 x e 700 x. Outras imagens obtidas mediante este procedimento são apresentadas no Apêndice A. Como pode ser notado houve deslizamento longitudinal das fibras, com nítidas marcas de impressão do plano fibroso. Ao mesmo tempo ocorreu ruptura por cisalhamento do parênquima e posterior arraste de suas paredes fechando parcialmente as aberturas. Imagens complementares da análise do modo de ruptura das fibras são apresentadas no Apêndice A.

Tabela 3.5.5. Resistência ao cisalhamento interlaminar do bambu *Phyllostachys aurea*. Tipo de tratamento: Banho quente.

Percentual de umidade das amostras: 6 – 8 %.

Região internodal	Corpo de prova	Área (mm ²)	Força (kN)	τ (MPa)	τ media (MPa)
Base s/nó	B-1	365,40	1,51	4,14	3,90 +/- 0,21
	B-2	347,71	1,30	3,74	
	B-3	395,01	1,51	3,82	
Base c/nó	B-N1	376,56	0,94	2,50	3,29 +/- 0,97
	B-N2	370,20	1,44	4,37	
	B-N3	416,79	1,25	3,01	
Intermediária s/nó	B-4	347,13	1,38	3,97	3,88 +/-0,09
	B-5	305,49	1,16	3,79	
	B-6	271,86	1,06	3,89	
Intermediária c/nó	B-N4	370,59	1,33	3,59	3,33 +/-0,27
	B-N5	364,24	1,11	3,05	
	B-N6	339,15	1,13	3,35	
Topo s/nó	B-7	268,40	0,91	3,39	3,88 +/- 0,53
	B-8	276,00	1,06	3,82	
	B-9	257,88	1,14	4,44	
Topo n/nó	B-N7	280,60	0,93	3,32	3,50 +/- 0,39
	B-N8	235,60	0,76	3,24	
	B-N9	199,64	0,79	3,95	

Tabela 3.5.6. Resultados dos ensaios de cisalhamento interlaminar da espécie *Phyllostachys aurea*. Número de amostras ensaiadas: 54.

Percentual de umidade das amostras: 6 – 8 %.

Região internodal	Secagem ao ar	Secagem ao fogo	Banho quente
	τ média (MPa)	τ média (MPa)	τ média (MPa)
Base s/nó	3,92+/- 0,61	4,24+/- 0,56	3,90 +/-0,21
Base c/nó	3,09+/- 0,14	3,78 +/-0,18	3,29 +/-0,97
Intermediária s/nó	4,60+/- 0,59	4,64 +/-0,80	3,88 +/-0,09
Intermediária c/nó	3,40+/- 0,27	4,53 +/-0,04	3,33 +/-0,27
Topo s/nó	4,64+/- 0,23	4,70+/- 0,62	3,88 +/-0,53
Topo c/nó	4,10 +/- 0,27	4,56 +/-0,22	3,50 +/-0,39

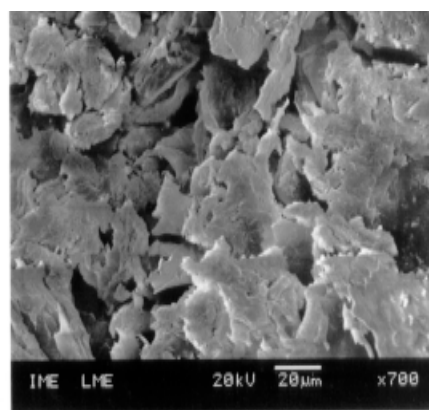
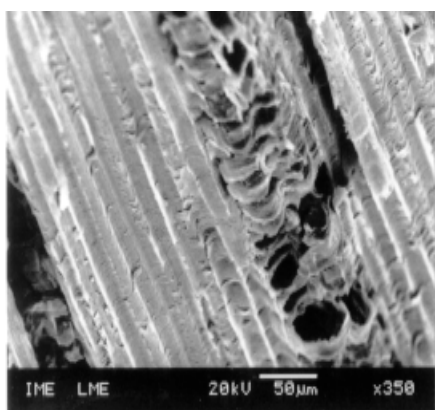


Figura 3.20. Modo de ruptura das fibras no ensaio de cisalhamento interlaminar.

Para a determinação da máxima resistência ao cisalhamento transversal foram analisados 36 corpos de prova, correspondentes a dois colmos inteiros de bambu tratados mediante secagem ao ar, secagem ao fogo e banho quente, analisando de cada colmo, sua base, região intermediária e topo. A Figura 3.21 apresenta as dimensões dos corpos de prova utilizados nos testes.

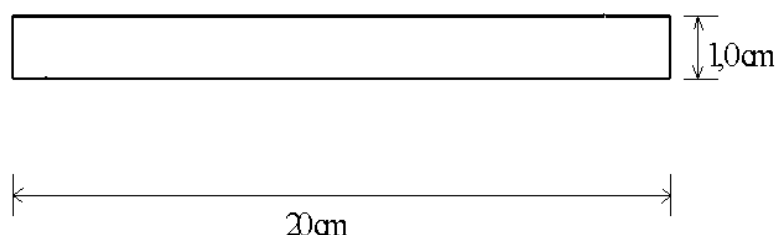


Figura 3.21. Dimensões dos corpos de prova para ensaio de cisalhamento transversal.

Com o objetivo de segurar a peça de modo a não introduzir fenômenos de flexão, foram confeccionadas três peças de aço (ver Figura 3.22) que permitiram a adequada fixação dos corpos de prova na máquina. Os ensaios foram realizados na máquina AMSLER, com aplicação manual da carga até chegar à ruptura do elemento (ver Figura 3.23).

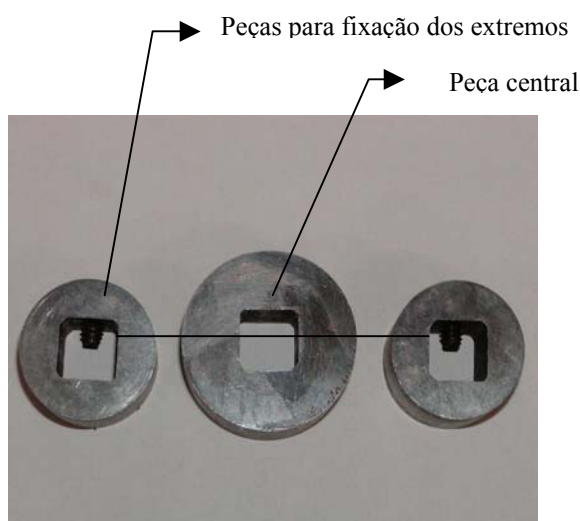


Figura 3.22. Peças de aço para fixação dos corpos de prova na AMSLER.

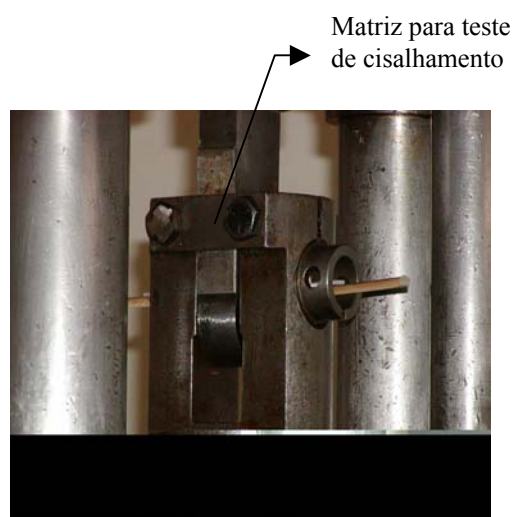


Figura 3.23. Ensaio de cisalhamento transversal.

No ensaio de cisalhamento transversal obtiveram-se valores máximos entre 51 e 54 MPa para corpos de prova correspondentes a região da base e intermediário com nó. No topo a resistência foi ligeiramente menor atingindo valor máximo de 44 MPa. CULZONI (1986), obteve valores entre 49 e 44,7 MPa para as regiões basal, intermediária e topo de colmos de *Dendrocalamus giganteus*, sendo a resistência ao cisalhamento maior na base. Na literatura não

foram encontrados dados da resistência de colmos de *Phyllostachys aurea*, pelo que comparando com outras espécies estudadas na PUC-Rio damos como válidos os resultados obtidos. Os valores de tensão média atingidos durante o ensaio são apresentados na Tabela 3.5.7.

Tabela 3.5.7. Resistência ao cisalhamento transversal da espécie *Phyllostachys aurea*. Número de amostras ensaiadas: 36. Percentual de umidade das amostras: 6 – 8 %.

Região internodal	Secagem ao ar	Secagem ao fogo	Banho quente
	$\tau_{\text{média}}$ (MPa)	$\tau_{\text{média}}$ (MPa)	$\tau_{\text{média}}$ (MPa)
Base s/nó	44,54 +/- 2,50	45,42 +/- 3,94	40,50 +/- 2,98
Base c/nó	51,03 +/- 4,81	47,43 +/- 5,69	53,72 +/- 6,16
Intermediária s/nó	46,99 +/- 5,25	45,59 +/- 2,73	41,18 +/- 5,82
Intermediária c/nó	47,13 +/- 3,85	53,72 +/- 6,21	54,83 +/- 3,17
Topo s/nó	37,84 +/- 5,42	40,57 +/- 6,87	42,78 +/- 4,98
Topo c/nó	44,63 +/- 4,71	44,33 +/- 3,97	48,62 +/- 9,43

Analisando a Tabela 3.5.7, observa-se a similitude dos resultados obtidos para amostras submetidas a tratamentos diferentes. A diferença de outros ensaios mecânicos realizados para *Phyllostachys aurea*, pode notar-se que a tensão cisalhante foi maior nas amostra com nó. Estes resultados foram compatíveis com os resultados apresentados por CULZONI, 1986.

3.5.3. Resistência à compressão

Para determinar a resistência à compressão desta espécie, foram selecionados três colmos, os quais foram submetidos aos mesmos tratamentos utilizados nos itens anteriores. Para o estudo em questão foram cortados dois corpos de prova de cada uma das regiões de cada colmo: base, intermediária e topo, analisando corpos de prova com e sem nó. Os ensaios foram realizados no LEM da PUC-Rio, na máquina AMSLER.

Após o corte dos bambus na altura ideal (altura (L) = diâmetro (D)), foram niveladas as superfícies dos mesmos, e lixadas as faces laterais marcadas, para torná-las lisas e paralelas. Foram colados strain gages tipo L em duas faces opostas, para observar a simetria das deformações (ver Figura 3.24). A carga foi aplicada de forma contínua, registrando-se os valores de deformação a intervalos de 2 kN. A partir dos valores obtidos, plotou-se a curva tensão - deformação, obtendo-se os módulos de elasticidade e coeficiente de Poisson para cada amostra ensaiada. Os resultados obtidos durante os testes são apresentados na Tabela 3.5.8. A Figura 3.25 mostra a ruptura dos corpos de prova nos testes realizados.

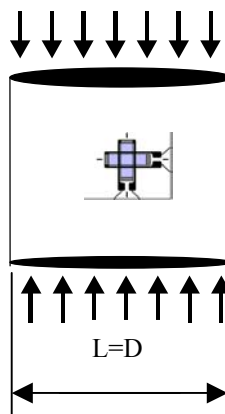


Figura 3.24. Dimensões dos corpos de prova.



Figura 3.25. Ruptura de corpo de prova.

Tabela 3.5.8. Resultados obtidos nos ensaios á compressão do bambu *Phyllostachys aurea*.

Tipo de tratamento		Tipo de amostra					
		Base c/nó	Base s/nó	Intermediária c/nó	Intermediária s/nó	Topo c/nó	Topo s/nó
Secagem ao ar	$P_{\text{máx}}$ (kN)	55,15	52,55	30,31	44,69	30,2	27,12
	$\sigma_c \text{ máx}$ (MPa)	72,63	68,57	51,29	79,86	75,5	67,81
	E_L (GPa)	24,33	21,11	22,73	25,36	22,30	33,11
	ν	0,26	0,21	0,26	0,20	0,20	0,23
Secagem ao fogo	$P_{\text{máx}}$ (kN)	40,10	59,22	32,47	40,70	40,56	28,15
	$\sigma_c \text{ máx}$ (MPa)	62,73	76,26	54,12	69,40	81,42	70,38
	E_L (GPa)	29,41	24,75	25,76	20,55	28,15	32,31
	ν	0,38	0,20	0,35	0,31	0,25	0,32
Banho quente	$P_{\text{máx}}$ (kN)	48,04	49,30	30,17	46,94	32,03	34,70
	$\sigma_c \text{ máx}$ (MPa)	63,56	68,29	50,45	59,03	80,24	86,74
	E_L (GPa)	17,49	23,00	32,20	25,00	11,22	20,00
	ν	0,31	0,22	0,20	0,23	0,25	0,39

Os resultados obtidos nos testes podem ser comparados com os apresentados por GHAVAMI e MARINHO (2001) para a espécie *Dendrocalamus giganteus*, a qual apresentou tensões máximas equivalentes a 96,75 MPa em amostras extraídas do topo sem nó e por GHAVAMI e MARINHO (2002) para a espécie *Phyllostachys pubescens* (Mosó) a qual apresentou a máxima tensão na parte intermediária do colmo sem nó, atingindo valores de 59,97 MPa. Analisando os resultados obtidos para a espécie *Phyllostachys aurea* observa-se neles que os

valores de tensão à compressão obtidos para as amostras secas ao ar apresentaram maior resistência na região intermediária do colmo, atingindo valores de 79,86 MPa nas amostras sem nó. A Tabela 3.5.9 apresenta a comparação dos resultados com espécies estudadas na PUC-Rio.

Tabela 3.5.9. Comparação da resistência à compressão da espécie *Phyllostachys aurea* com outras espécies secas ao ar, estudadas na PUC-Rio.

Região do colmo	Dendrocalamus Giganteus		Phyllostachys pubescens		Phyllostachys aurea	
	σ_c máx (MPa)	E_L (GPa)	σ_c máx (MPa)	E_L (GPa)	σ_c máx (MPa)	E_L (GPa)
Topo s/n	96,75	17,14	53,34	24,87	67,81	33,11
Topo c/n	75,49	17,75	48,39	28,96	75,50	22,30
Intermediária s/n	78,79	18,00	59,97	19,79	79,86	25,36
Intermediária c/n	72,72	26,25	50,54	28,25	51,29	22,73
Base s/n	72,62	26,60	47,60	16,50	68,57	21,11
Base c/n	71,43	20,50	48,44	16,50	72,63	24,33

Observa-se na Tabela 3.5.9 que o *Phyllostachys aurea* apresentou maior resistência à compressão que o *Phyllostachys pubescens* (Mosó) atingindo valores máximos de 79,86 MPa, sendo da ordem de 25 % maior que a resistência à compressão do Mosó. Comparando com a espécie *Dendrocalamus giganteus* a maior diferença apresentou-se nas amostras do topo sem nó, nas quais foram registrados valores de 96,75 MPa para o *Dendrocalamus giganteus* e 67,81 MPa para o *Phyllostachys aurea*, sendo este último 30 % menor.

As deformações máximas ocorridas durante o ensaio foram registradas a intervalos de 2 kN. A partir dos resultados obtidos foram plotadas as curvas tensão – deformação para cada corpo de prova. Nos gráficos observa-se que até um ponto próximo à ruptura a curva apresenta um comportamento quase linear (ver Figura 3.26). A deformação máxima em corpos de prova com nó atingiu valores de

$8,13 \times 10^{-3}$ no sentido longitudinal e 9×10^{-4} no sentido transversal, para amostras da base, $6,82 \times 10^{-4}$ no sentido longitudinal e 0,010 no sentido transversal, para amostras da região intermediária do colmo e 8×10^{-4} no sentido longitudinal e $1,5 \times 10^{-4}$ no sentido transversal de amostras tomadas do topo do colmo (ver Figura 3.27).

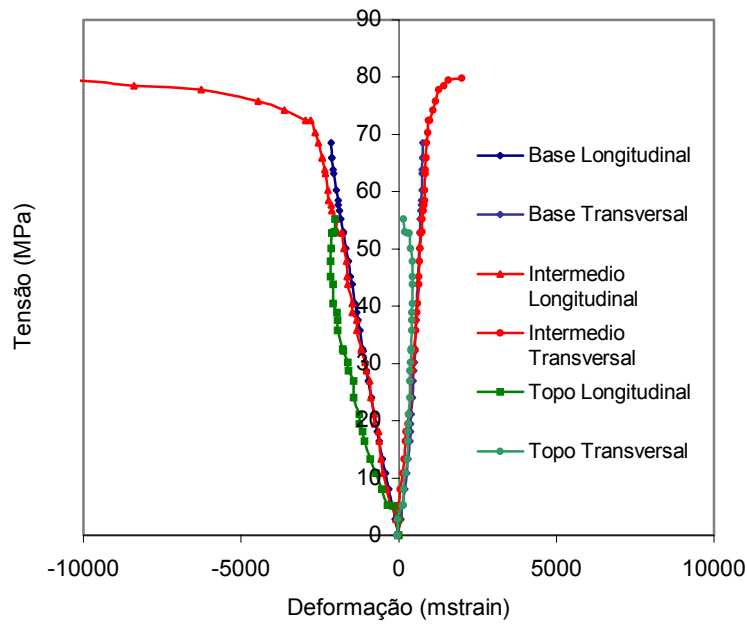


Figura 3.26. Curvas tensão – deformação obtidas no ensaio à compressão.
Amostras sem nó.

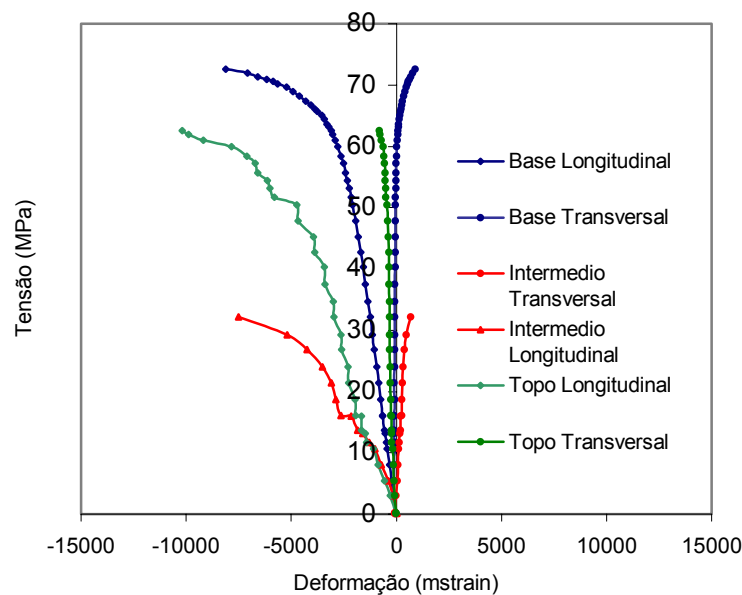


Figura 3.27. Curvas tensão – deformação obtidas no ensaio à compressão.
Amostras com nó.

Os ensaios experimentais realizados para a obtenção das características mecânicas demonstram que o bambu resiste mais aos esforços de tração que aos de compressão. Isto é devido à orientação das fibras de forma paralela ao eixo do colmo. A Tabela 3.5.10 resume a diferença entre a resistência à tração e à compressão para colmos de bambu da espécie *Phyllostachys aurea*, secados ao ar.

Tabela 3.5.10. Diferencias entre a resistência à tração e à compressão para colmos inteiros de bambu da espécie *Phyllostachys aurea*.

Região do colmo	Resistência à tração σ_t (MPa)	Resistência à compressão σ_c (MPa)	σ_c/σ_t
Base s/nó	193,13	68,57	0,35
Base c/nó	174,75	72,63	0,41
Intermediário s/nó	234,80	79,86	0,34
Intermediário c/nó	220,34	51,29	0,23
Topo s/nó	272,42	67,81	0,25
Topo c/nó	167,18	75,50	0,45

Os resultados obtidos são semelhantes aos apresentados por GHAVAMI (1995) para diferentes espécies com uma resistência à tração variável entre 40 e 215 MPa e valores de resistência à compressão aproximadamente 30 % menores, oscilando entre 20 e 120 MPa. CULZONI (1986) e GHAVAMI e SOUZA (2000) obtiveram resultados semelhantes quanto a diferença de valores entre a resistência à tração e à compressão.

3.6. Considerações Finais

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios podem-se fazer algumas considerações:

- Os bambus têm uma complexa estrutura hierárquica e variações físicas de diâmetro do colmo, espessura da parede e comprimento internodal.
- O diâmetro e espessura decrescem uniformemente ao longo do comprimento dos colmos.
- O comprimento internodal atinge seu máximo valor próximo ao ponto médio do comprimento total.
- O processamento digital de imagens forneceu resultados satisfatórios na análise da distribuição das fibras ao longo da espessura da parede do colmo de bambu.
- Os resultados dos ensaios demonstram que o bambu resiste mais aos esforços de tração que aos de compressão, com uma diferença da ordem de 30 %.
- No estudo da resistência ao cisalhamento comprovou-se que o bambu resiste mais ao cisalhamento transversal que ao cisalhamento interlaminar sendo esta aproximadamente 10 % que a resistência ao cisalhamento transversal às fibras.
- As curvas tensão – deformação obtidas nos testes demonstram que o bambu mantém um comportamento quase linear até a ruptura.
- Os tratamentos preservativos aplicados aos colmos estudados não provocaram mudanças nos resultados obtidos nos ensaios mecânicos.