

3. Metodologia experimental

3.1. Introdução

Os ensaios foram desenvolvidos no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) do Departamento de Engenharia Civil, no Laboratório de Vibrações do Departamento de Engenharia Mecânica, ambos da PUC-Rio, e no *Instituto de Extensión e Investigaciones* (IEI) da *Universidad Nacional de Colombia*. Os bambus ensaiados são das espécies *Dendrocalamus Giganteus* (DG) e *Phyllostachys Áurea* (PA).

Os bambus da espécie DG pertencem ao bambuzal da PUC-Rio e foram cortados no dia 20 de Março de 2008, aproximadamente 40 cm acima do nível do solo. Para facilitar o transporte dos colmos, cada bambu foi dividido em segmentos de 3 m de comprimento aproximadamente e armazenados em posição vertical no LEM durante um período de 3 semanas.

Para os bambus da espécie PA são estudadas cinco variações: colmos sem tratamento cortados em março de 2008, sem tratamento cortados em maio de 2007, sem tratamento cortados em 2001, com tratamento ao fogo (maçarico) cortados em março de 2008 e com tratamento ao fogo (maçarico) cortados em maio de 2007. Os bambus dessa espécie pertencem ao bambuzal localizado na cidade Bananal no estado de São Paulo; os colmos cortados nos anos de 2007 e 2008 são divididos em segmentos de 2 m de comprimento e armazenados em posição vertical no LEM por um período de 5 semanas. Os colmos cortados no ano de 2001 foram usados na pesquisa desenvolvida por Sanchez (2002) e armazenados em posição vertical no LEM desde esse ano.

Devido ao fato de as propriedades do bambu variarem ao longo do seu comprimento, os colmos são normalmente divididos em três partes: base, meio e topo. Na presente pesquisa, são estudadas somente as partes basais dos colmos de bambu.

3.2. Diâmetro e espessura

A medição do diâmetro e da espessura dos colmos ensaiados é feita segundo o procedimento da norma ISO/TC 165 N314 Daté: 2001-11-28. Para cada seção transversal, o diâmetro é determinado duas vezes em direções perpendiculares e a espessura é medida quatro vezes, nos mesmos pontos onde é avaliado o diâmetro.

3.3. Umidade

A determinação do teor de umidade é feita segundo o procedimento da norma ISO/TC 165 N315 Daté: 2001-12-07. São preparadas amostras de 25 mm de comprimento por 25 mm de largura aproximadamente com espessura igual à espessura da parede do colmo; cada amostra é pesada e levada ao forno a uma temperatura de 102°C para secagem.

Após 24 horas de iniciado o processo de secagem deve ser registrado o novo peso de cada amostra em intervalos de duas horas até obter uma diferença inferior a 0.01 g entre duas medições consecutivas.

Sendo m_o a massa inicial da amostra e m a massa após da secagem, o teor de umidade MC de cada amostra é calculado com a eq. (3.1):

$$MC(\%) = \frac{m_o - m}{m} \times 100 \quad (3.1)$$

A medição do teor de umidade é feita para cada uma das espécies de bambu estudadas com três amostras para cada uma delas, sendo no total ensaiadas 18 amostras. Esses ensaios são realizados no *Instituto de Extensión e Investigaciones* (IEI) da *Universidad Nacional de Colombia*.

3.4. Módulo de elasticidade à flexão

A determinação do módulo de elasticidade à flexão é feita em segmentos com nós para cada uma das espécies estudadas na presente pesquisa. Devido ao fato do bambu ser um material funcionalmente graduado, i.e., a fração volumétrica das fibras varia ao longo da espessura da parede do colmo, a variação do módulo de elasticidade é determinada em função da concentração das fibras. Assim, além de se determinar o módulo de elasticidade para

segmentos inteiros, são ensaiadas fatias com diferentes volumes de fibras para as seis variáveis de bambu pesquisadas.

As amostras da espécie DG são divididas em três fatias, externa, meia e interna, contendo a primeira o maior volume de fibras e a última o menor; o segmento inteiro tem uma seção transversal de 40 mm x 13 mm, a fatia externa de 40 mm x 6 mm, a fatia do meio 40 mm x 6 mm e a fatia interna 40 mm x 4 mm, todos com um comprimento livre de 550 mm. Devido ao fato que os bambus da espécie PA possuem menor espessura, são divididos em duas fatias, externa e interna, tendo a primeira delas a maior concentração de fibras; a seção transversal do segmento inteiro é de 15 mm x 6 mm, da fatia externa e interna 15 mm x 4 mm, todas com comprimento livre de 400 mm. No total são ensaiadas 57 amostras, três por cada tipo de corpo de prova. Um esquema dos comprimentos e seções transversais dos segmentos é apresentado na Figura 3-1.

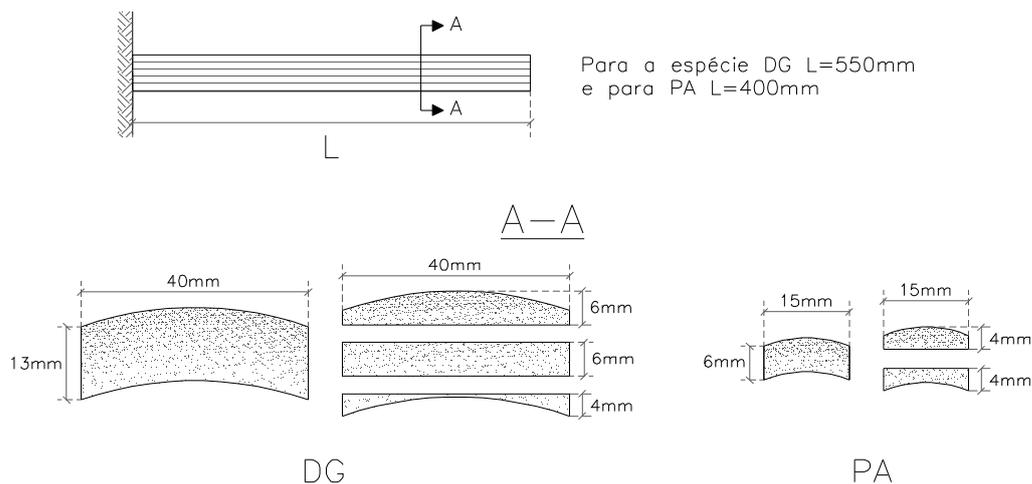


Figura 3-1 - Comprimento e seções transversais dos segmentos de bambu

Com cada corpo de prova é formado um sistema em balanço, engastando o segmento usando-se uma garra metálica. Na extremidade livre do segmento é aplicado o carregamento através da máquina EMIC DC3000, com uma velocidade de aplicação da carga de 10 mm/s, sendo registrado o deslocamento, em milímetros, no mesmo ponto. Um esquema do ensaio é apresentado nas Figura 3-2 e Figura 3-3.

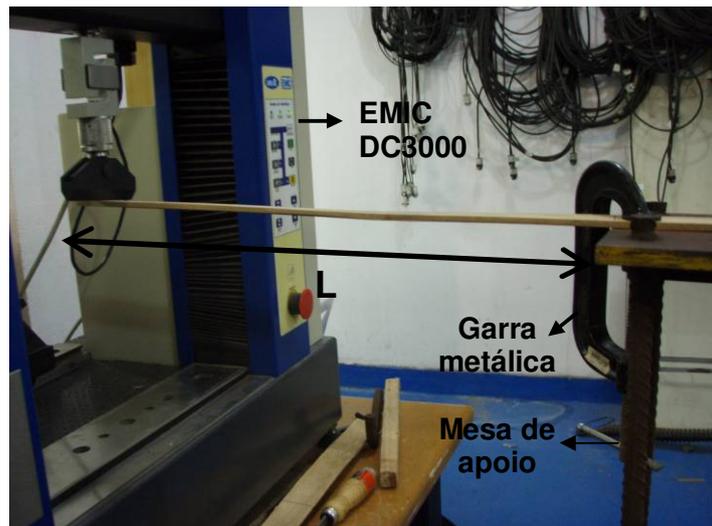


Figura 3-2 - Ensaio para a determinação de módulo de elasticidade à flexão (para a espécie DG o comprimento $L = 550$ mm, para PA $L = 400$ mm)



Figura 3-3 - Finalização do ensaio para a determinação do módulo de elasticidade à flexão

Os corpos de prova da espécie DG têm um nó localizado 230 mm respeito ao engaste; as amostras da espécie PA têm dois nós localizados 75 mm e 285 mm respeito do engaste, aproximadamente.

Com os dados de carga e deslocamento obtidos dos ensaios foram construídos gráficos de carga x deslocamento, e o módulo de elasticidade à flexão foi obtido a partir da relação apresentada na eq. (3.2), onde L é o comprimento livre do segmento, dito anteriormente, I é a inércia da seção transversal e a relação P/y corresponde à tangente da curva carga x deslocamento obtida experimentalmente:

$$E = \frac{P L^3}{y 3I} \quad (3.2)$$

O cálculo da inércia I é feita pelo programa AUTOCAD, levando em conta a curvatura natural dos segmentos, digitalizando uma fotografia da cada seção transversal.

Esses ensaios são desenvolvidos no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

3.5. Fator de amortecimento e frequência natural de vibração

Para a determinação experimental dos fatores de amortecimento e frequências naturais de vibração das duas espécies de bambu são usadas duas metodologias: a primeira delas consiste em testes em vibração livre de segmentos de bambu em balanço e a segunda em testes modais de colmos para diferentes condições de contorno. Esses ensaios são desenvolvidos no Laboratório de Vibrações do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

3.5.1. Testes em vibração livre

Os testes em vibração livre têm como objetivo a obtenção da resposta nesse tipo de vibração de segmentos em balanço das duas espécies de bambu. Para a determinação da variação das propriedades dinâmicas em função da concentração de fibras na espessura da parede do colmo, são usadas as mesmas fatias empregadas na determinação do módulo de elasticidade à flexão (Figura 3-1), sendo cada fatia ensaiada duas vezes.

Para restringir ao máximo os deslocamentos e rotações no engaste, cada segmento é fixado a um suporte metálico usando duas placas, parafusadas entre elas (Figura 3-5); para registrar a resposta dos segmentos em vibração livre é colado um acelerômetro, marca ENDEVCO modelo 25B S/N BL47 com sensibilidade de 4.7902 mV/g (Figura 3-6), na extremidade livre com ajuda de parafina e fita adesiva. O sinal enviado pelo acelerômetro é captado em um computador com ajuda do software HP 3556A.

Pelo fato dos segmentos inteiros, as fatias externas e internas terem a curvatura natural dos colmos de bambu, é necessário colar-lhes duas placas de alumínio na extremidade engastada com o objetivo de garantir uma superfície

plana que pudera ser segurada pelas duas placas metálicas, como mostra a Figura 3-4; a cola usada para fixar as placas de alumínio é massa plástica.

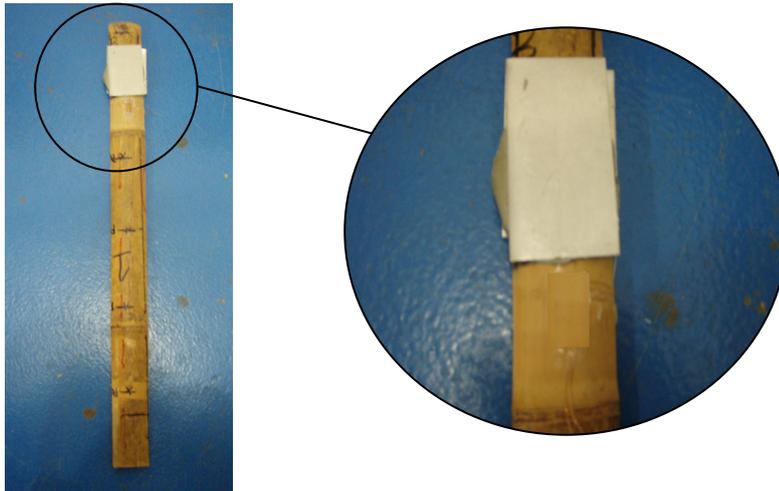


Figura 3-4 – Placas de alumínio na extremidade engastada dos segmentos inteiros, fatias internas e externas.

O torque usado nos parafusos do engaste é de 18 N-m para todos os corpos de prova (segmentos inteiros e fatias).

São introduzidas condições iniciais em deslocamento na extremidade livre do segmento e suficientemente grandes para se obterem sinais de boa qualidade (sem ruído), mas ainda dentro da região de comportamento linear das vibrações. As respostas dos segmentos são avaliadas tanto no domínio do tempo quanto da frequência, o primeiro com a finalidade de obter o comportamento de decaimento livre e o segundo para obter a frequência natural de vibração do sistema.

O valor do coeficiente de amortecimento é obtido usando-se o método do decremento logarítmico (eq. (2.46)) empregando as amplitudes de movimento obtidas a partir da resposta no domínio do tempo do segmento.

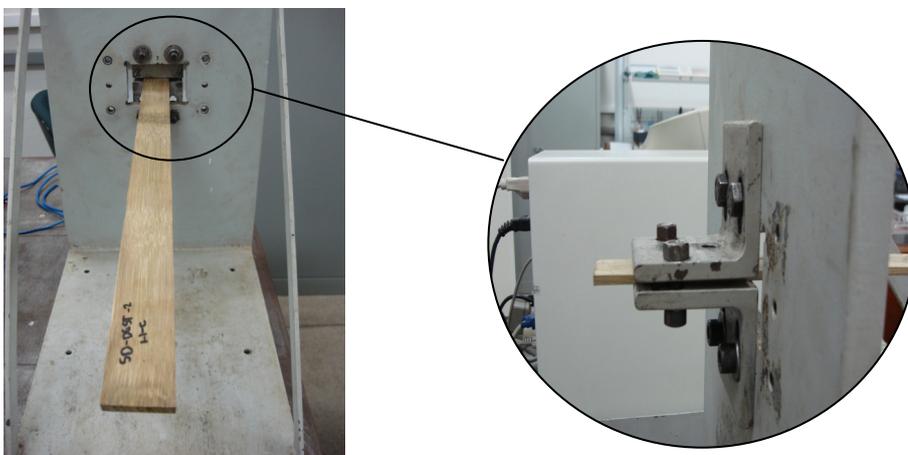


Figura 3-5 – Segmento engastado no suporte metálico usado para o ensaio em vibração livre.



Figura 3-6 - Acelerômetro ENVEDCO modelo 25B S/N BL47 com sensibilidade de 4.7902 mV/g.

Um esquema da montagem geral deste tipo de ensaios é apresentado na Figura 3-7.

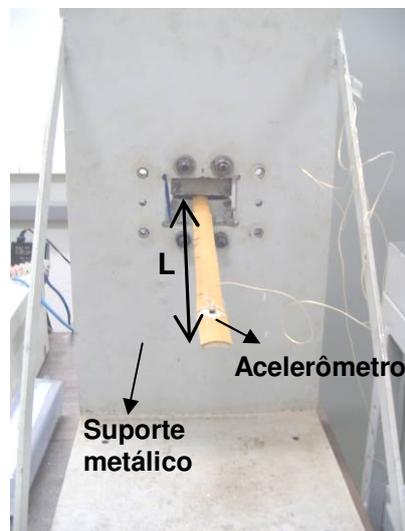


Figura 3-7 - Montagem dos testes em vibração livre (para a espécie DG o comprimento $L = 550$ mm, para PA $L = 400$ mm)

3.5.2. Testes modais

Este tipo de teste tem como objetivo a determinação das Funções de Resposta em Frequência (FRF) de colmos das duas espécies de bambu para duas condições de contorno: na primeira delas os colmos de bambu são apoiados sobre duas esponjas e na segunda os colmos são suspensos por fios de nylon; essas condições de contorno assemelham uma análise livre-livre apresentando baixa interferência das condições de contorno na resposta dinâmica dos sistemas (Maia & Silva, 1997).

Cada colmo de bambu é dividido em 12 pontos eqüidistantes, sendo colado um acelerômetro no ultimo ponto (ponto 12) com ajuda de parafina e fita

adesiva; uma força de impacto é aplicada em cada ponto usando um martelo marca ENDEVCO modelo 30927 com sensibilidade de 99.7 mV/lbf sendo sua máxima força impulsiva aplicada de 1.00 lbf (Figura 3-8); o acelerômetro usado nesse tipo de ensaio é o mesmo empregado nos testes de vibração livre. O sinal enviado pelo acelerômetro e o martelo é captado em um computador com ajuda do software HP 3556A, que realiza as análises dos dois sinais utilizando a Transformada Rápida de Fourier para obterem-se as FRF para os diferentes pontos de excitação.

A FRF usada para obterem-se os parâmetros modais dos colmos corresponde a média das 12 medições feitas em cada corpo de prova (Richardson & Formenti, 1985), sendo ajustada pelo método dos polinômios de fração racional (RFP) aplicando um algoritmo computacional desenvolvido por Gutierrez (2002) que trabalha no programa MATLAB®.



Figura 3-8 - Martelo ENVEDCO modelo 30927 com sensibilidade de 99.7 mV/lbf, com máxima força impulsiva aplicada de 1.00 lbf

3.5.2.1. Bambu apoiado sobre duas esponjas

Nesta condição de contorno são usados colmos de 1.00 m de comprimento para as duas espécies pesquisadas. Com o objetivo de estudar a influência da presença do diafragma na resposta dinâmica dos colmos, são ensaiados colmos com e sem diafragma. Os corpos de prova usados na condição sem diafragma correspondem aos mesmos utilizados na condição com diafragma que após serem ensaiados são preparados.

Nesse tipo de testes são ensaiados três colmos para cada variável estudada, sendo ensaiado cada corpo de prova duas vezes para as condições com e sem diafragma respectivamente. A Figura 3-9 mostra a montagem do ensaio e a Figura 3-10 apresenta a execução do mesmo.

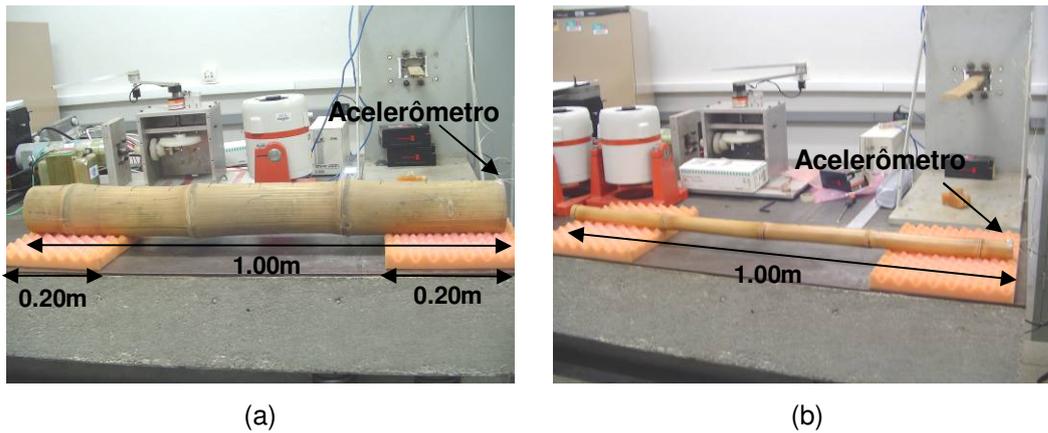


Figura 3-9 - Montagem do ensaio para a condição do bambu apoiado sobre esponjas: (a) colmo da espécie DG, (b) colmo da espécie PA

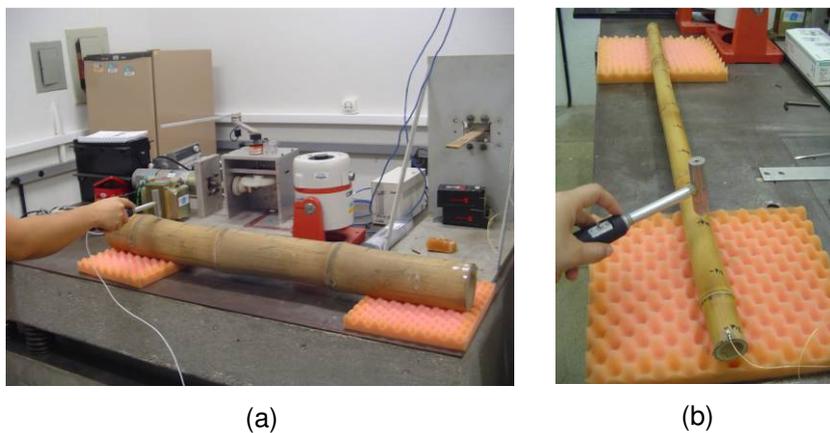


Figura 3-10 - Execução do ensaio para a condição do bambu apoiado sobre esponjas: (a) colmo da espécie DG, (b) colmo da espécie PA

3.5.2.2. Bambu suspenso por fios de nylon

Nesta condição de contorno são usados colmos de 0.33 m de comprimento para a espécie DG e de 0.20 m de comprimento para a espécie PA, porque o comprimento internodal médio para as duas espécies é diferente e o objetivo de este tipo de teste é obter a resposta dinâmica dos colmos sem nós.

São ensaiados três colmos para cada variável estudada, sendo ensaiado cada corpo de prova duas vezes. A Figura 3-11 mostra a montagem do ensaio e Figura 3-12 a apresenta a execução do mesmo.

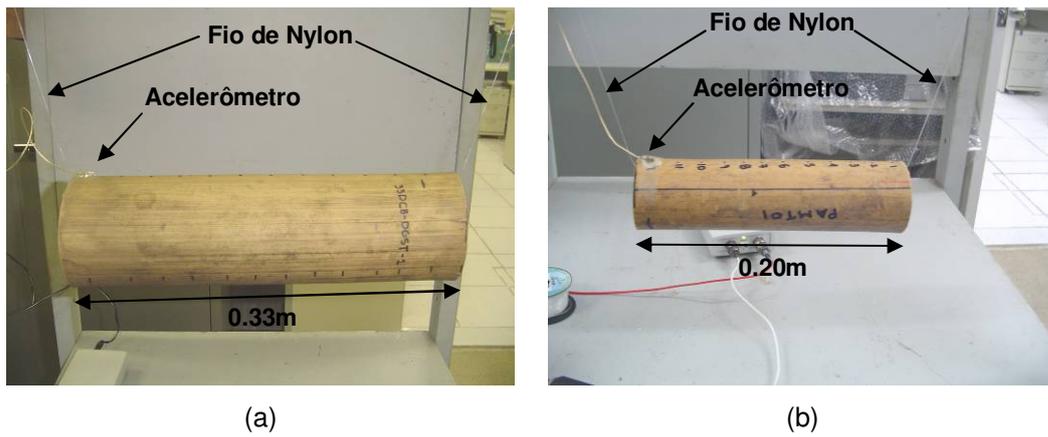


Figura 3-11 - Montagem do ensaio para a condição do bambu suspenso por um fio de nylon: (a) colmo da espécie DG, (b) colmo da espécie PA.

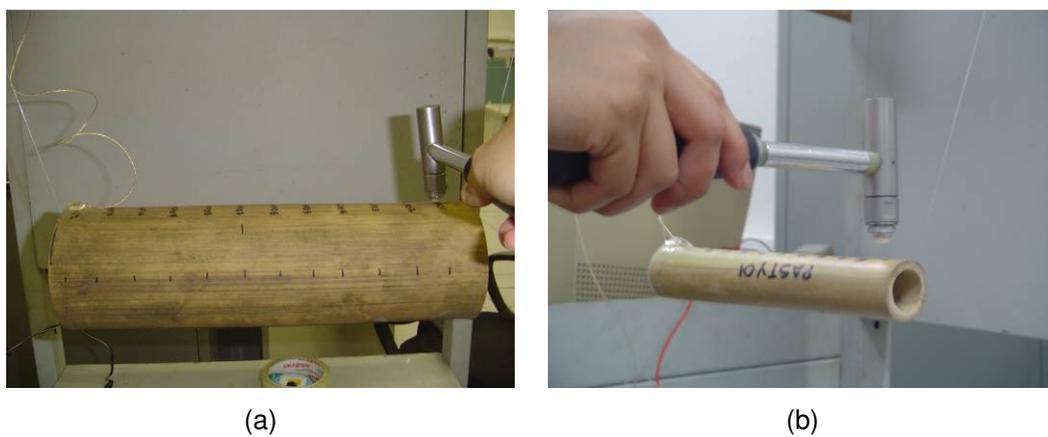


Figura 3-12 - Execução do ensaio para a condição do bambu suspenso por um fio de nylon: (a) colmo da espécie DG, (b) colmo da espécie PA.