

Patricia Luna Tamayo

**Estudo teórico experimental das propriedades dinâmicas
do bambu**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: KHOSROW GHAVAMI

Rio de Janeiro

Julho de 2009

Patricia Luna Tamayo

**Estudo teórico experimental das propriedades dinâmicas
do bambu**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Khosrow Ghavami

Orientador

Departamento de Engenharia civil - PUC-Rio

Prof. João Luis Pascal Roehl

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Conrado de Souza Rodrigues

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas de Gerais

Prof. Normando Perazzo Barbosa

Universidade Federal da Paraíba

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 24 de julho de 2009

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, autora e do orientador.

Patricia Luna Tamayo

Graduou-se em Engenharia Civil na Universidade Nacional da Colômbia, em setembro de 2005.

Ficha Catalográfica

Luna Tamayo, Patricia

Estudo teórico experimental das propriedades dinâmicas do bambu / Patricia Luna Tamayo ; orientador: Khosrow Ghavami. – 2009.

97 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Bambu. 3. Propriedades dinâmicas. 4. Amortecimento. 5. Freqüência natural. I. Ghavami, Khosrow. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Este logro é para ti Camilo por ter-me apoiado ao longo destes anos e para
minha família sem vocês este logro não seria uma realidade

Agradecimentos

A Deus por ter me dado muita fortaleza.

Ao Professor Ghavami, pela orientação no desenvolvimento ao longo deste trabalho.

A FAPERJ pelo apoio financeiro.

Ao Professor Hans Weber e ao aluno de doutorado Rômulo Reis, pela ajuda e conselhos na execução dos ensaios dinâmicos desenvolvidos no Laboratório de Vibrações da PUC-Rio.

Ao Luiz Carlos Inglês, pela doação dos colmos de bambu usados neste trabalho.

Ao João Krause pelo auxílio na elaboração dos corpos de prova.

Ao grupo de Materiais e Técnicas Não Convencionais da PUC-Rio, pelos seus conselhos.

Aos técnicos do laboratório de Estruturas e Materiais - LEM da PUC-Rio.

A minha família por ter me dado muita fortaleza à distancia.

Ao Camilo por que juntos recorreremos este caminho e sem você teria sido muito mais complicado.

Resumo

Luna Tamayo, Patrícia; Ghavami, Khosrow. **Estudo teórico experimental das propriedades dinâmicas do bambu**. Rio de Janeiro, 2009. 93p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os estudos realizados durante as últimas três décadas ao respeito do bambu têm sido direcionados à caracterização física, mecânica e microestrutural, das diferentes espécies, sob carga estática. A experiência mostra que as casas e prédios construídos usando-se bambu como elemento estrutural tiveram boa resistência aos abalos sísmicos. O presente trabalho trata-se de uma das primeiras investigações experimentais feitas sobre o comportamento dinâmico do bambu. Foram estudadas as propriedades dinâmicas de sistemas feitos com bambus das espécies *Dendrocalamus Giganteus* e *Phyllostachys Áurea*. As propriedades dinâmicas investigadas correspondem aos valores de amortecimento e frequências naturais de vibração para cada espécie, obtidas através de testes em vibração livre e de testes modais. Com o propósito de estudar a influência do período de armazenamento na resposta dinâmica do material, para os colmos da espécie *Phyllostachys Áurea* foram consideradas cinco variáveis: 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. Além disso, para as duas espécies foi determinada a variação do coeficiente de amortecimento em função da concentração das fibras na espessura do material.

Palavras-chave

Bambu, propriedades dinâmicas, amortecimento, frequência natural.

Abstract

Luna Tamayo, Patrícia; Ghavami, Khosrow (Advisor). **Theoretical and experimental analysis of dynamic properties of bamboo**. Rio de Janeiro, 2009. 93p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The studies carried on during the last three decades with respect to bamboo have been directed to the physical, mechanic and microstructural characterization of different species, under static load. The experience has shown that the houses and buildings constructed using bamboo as structural element have had good resistance to earthquakes. This work is one of the first researches to know the bamboo dynamic behaviour. It was studied the dynamic properties of systems made of bamboo with the species *Dendrocalamus Giganteus* and *Phyllostachys Áurea*. The researched dynamic properties correspond to values of damping and natural frequencies of vibration for each specie, which were gotten through free vibration and modal tests. With the intention to study the influence of the storage period in the dynamic response of the material, for culms of *Phyllostachys Áurea* specie, five variables were considered: culms without treatment cut in March of 2008, without treatment cut in May of 2007, without treatment cut in 2001, with treatment on fire (blowpipe) cut in March of 2008 and with treatment on fire (blowpipe) cut in May of 2007. Furthermore, for the two species was determinate the variation of damping in function of variation of the quantity of fibers along the material thickness.

Keywords

Bamboo, dynamic properties, damping, natural frequency.

Sumário

1. Introdução	14
1.1. Objetivos e estrutura do trabalho	16
2 . Revisão bibliográfica	18
2.1. Graus de liberdade	19
2.2. Tipos de vibração	20
2.2.1. Resposta em vibração livre	20
2.2.1.1. Vibração livre sem amortecimento	21
2.2.1.2. Vibração livre com amortecimento	23
2.3. Medição experimental do coeficiente de amortecimento ξ	27
2.3.1. Método do decremento logarítmico	28
2.4. Análise modal	29
2.4.1. Função de transferência	29
2.4.2. Funções de Resposta em Freqüência (FRF)	30
2.4.2.1. Representação das FRF	31
2.4.3. Métodos de identificação modal	33
2.4.3.1. Método dos polinômios de fração racional (RFP)	34
2.5. Estrutura do bambu	34
2.6. Pesquisas anteriores	35
3 . Metodologia experimental	37
3.1. Introdução	37
3.2. Diâmetro e espessura	38
3.3. Umidade	38
3.4. Módulo de elasticidade à flexão	38
3.5. Fator de amortecimento e freqüência natural de vibração	41
3.5.1. Testes em vibração livre	41
3.5.2. Testes modais	43
3.5.2.1. Bambu apoiado sobre duas esponjas	44
3.5.2.2. Bambu suspenso por fios de nylon	45
4 . Apresentação e análise dos resultados	47

4.1. Introdução	47
4.2. Diâmetro e espessura	47
4.3. Umidade	48
4.4. Módulo de elasticidade à flexão	49
4.5. Fator de amortecimento e frequência natural de vibração	52
4.5.1. Testes em vibração livre	52
4.5.1.1. Frequências naturais teóricas	58
4.5.2. Testes modais	60
4.5.2.1. Bambu apoiado sobre duas esponjas	61
4.5.2.1.1. Cálculo numérico das frequências naturais de vibração	64
4.5.2.2. Bambu suspenso por fios de nylon	66
4.5.2.2.1. Cálculo numérico das frequências naturais de vibração	69
5. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	71
6. Referências bibliográficas	73
APÊNDICE A: FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO MÉTODO DOS POLINÔMIOS DE FRAÇÃO RACIONAL (RFP)	76
APÊNDICE B: CÁLCULO ANALÍTICO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS ANALÍTICAS	83
APÊNDICE C: CÁLCULO NUMÉRICO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS ANALÍTICAS	90

Lista de figuras

Figura 1-1 – (a) e (b) Estruturas de concreto escoradas com colmos de bambu após o terremoto em Armênia - Colômbia no ano de 1999 (Salas, 2006) ..	16
Figura 2-1 - Tipos de carregamento: (a) periódico, (b) não periódico	19
Figura 2-2 - Sistema dinâmico com um grau de liberdade (S1GL)	19
Figura 2-3 - S1GL para vibração livre	20
Figura 2-4 - Resposta em vibração livre para um S1GL sem amortecimento.....	22
Figura 2-5 - Decomposição dos harmônicos da resposta em vibração livre	23
Figura 2-6 - Resposta em vibração livre para um S1GL com amortecimento crítico	24
Figura 2-7 - Resposta em vibração livre para um S1GL subamortecido	26
Figura 2-8 - Resposta em vibração livre para um S1GL superamortecido	27
Figura 2-9 - Definição do decremento logarítmico.....	28
Figura 2-10 - Representação da receptância para S1GL: (a) parte real, (b) parte imaginária. (Maia & Silva, 1997).....	31
Figura 2-11 - Gráfico de Nyquist da receptância. (Maia & Silva, 1997)	32
Figura 2-12 - Diagrama de Bode: (a) magnitude da receptância, (b) fase da receptância (Maia & Silva, 1997).....	32
Figura 2-13 - Gráfico log-log da magnitude da receptância contra a frequência. (Maia & Silva, 1997).....	33
Figura 2-14 - Gráfico log-log da magnitude da FRF contra a frequência: (a) da mobilidade, (b) da aceleração (Maia & Silva, 1997).....	33
Figura 2-15 - Variação da fração volumétrica das fibras na espessura do colmo do bambu da espécie <i>Guadua Angustifolia</i> (Ghavami & Marinho, 2005)....	35
Figura 3-1 - Comprimento e seções transversais dos segmentos de bambu	39
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)	40
Figura 3-3 - Finalização do ensaio para a determinação do módulo de elasticidade à flexão.....	40
Figura 3-4 – Placas de alumínio na extremidade engastada dos segmentos inteiros, fatias internas e externas.....	42
Figura 3-5 – Segmento engastado no suporte metálico usado para o ensaio em vibração livre.....	42

Figura 3-6 - Acelerômetro ENVEDCO modelo 25B S/N BL47 com sensibilidade de 4.7902 mV/g.....	43
Figura 3-7 - Montagem dos testes em vibração livre (para a espécie DG o comprimento L = 550 mm, para PA L = 400 mm).....	43
Figura 3-8 - Martelo ENVEDCO modelo 30927 com sensibilidade de 99.7 mV/lbf, com máxima força impulsiva aplicada de 1.00 lbf.....	44
Figura 3-9 - Montagem do ensaio para a condição do bambu apoiado sobre esponjas: (a) colmo da espécie DG, (b) colmo da espécie PA	45
Figura 3-10 - Execução do ensaio para a condição do bambu apoiado sobre esponjas: (a) colmo da espécie DG, (b) colmo da espécie PA	45
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.	46
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.	46
Figura 4-1 – Carga x deslocamento para a espécie DG.....	49
Figura 4-2 – Carga x deslocamento para a espécie PAST0A	49
Figura 4-3 - Variação do módulo de elasticidade à flexão em função da fração volumétrica das fibras na parede do colmo para a espécie DG.....	51
Figura 4-4 - Variação do módulo de elasticidade à flexão em função da fração volumétrica das fibras na parede do colmo as cinco variações estudadas da espécie PA.....	51
Figura 4-5 - Resposta no domínio do tempo para a fatia média DG-02, segundo teste	52
Figura 4-6 - Resposta no domínio do tempo para o segmento inteiro PAST0A-03, segundo teste	53
Figura 4-7 - Resposta no domínio da frequência para a fatia média DG-01, primeiro teste	54
Figura 4-8 - Resposta no domínio da frequência para a fatia externa PAST0A-02, segundo teste	54
Figura 4-9 - Variação do ξ em função da variação da fração volumétrica das fibras na espessura da parede do colmo, espécie DG	55
Figura 4-10 - Variação do ξ em função da variação da fração volumétrica das fibras na espessura da parede do colmo, para as cinco variáveis da espécie PA.....	56
Figura 4-11 - Variação do ξ em função do tempo de armazenamento para os segmentos inteiro PAST0A, PAST1A e PAST7A	57

Figura 4-12 - Comparação dos resultados experimentais, analíticos e numéricos para a primeira freqüência de vibração dos segmentos da espécie DG.....	60
Figura 4-13 - Comparação dos resultados experimentais, analíticos e numéricos para a primeira freqüência de vibração dos segmentos da espécie PA.....	60
Figura 4-14 - FRF média para colmo de 1.00 m de comprimento com diafragma DG-03, segundo teste	61
Figura 4-15 - FRF média para colmo de 1.00 m de comprimento sem diafragma DG-03, primeiro teste.....	61
Figura 4-16 - FRF média para colmo de 1.00 m de comprimento com diafragma PAST7A-03, primeiro teste.....	62
Figura 4-17 - FRF média para colmo de 1.00 m de comprimento sem diafragma PAST7A-03, segundo teste.....	62
Figura 4-18 - Variação do ξ em função do tempo de armazenamento para colmos de 1.00m de comprimento de PAST0A, PAST1A e PAST7A	64
Figura 4-19 - Comparação dos resultados experimentais e numéricos para a freqüência natural de vibração dos colmos com diafragma	65
Figura 4-20 - Comparação dos resultados experimentais e numéricos para a freqüência natural de vibração dos colmos sem diafragma	66
Figura 4-21 - FRF média para colmo de 0.33 m de comprimento DG-02, primeiro teste	66
Figura 4-22 - FRF média para colmo de 0.20 m de comprimento PAST07A-01, primeiro teste	67
Figura 4-23 - Variação do ξ em função do tempo de armazenamento para colmos de 0.33m de comprimento de PAST0A, PAST1A e PAST7A	68
Figura 4-24 - Comparação dos resultados experimentais e numéricos para a freqüência natural de vibração para colmos suspensos por fios de nylon ..	70

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Coeficiente de amortecimento do bambu para a espécie <i>Dendrocalamus giganteus</i> (Ghavami et al, 2003)	36
Tabela 2.2 - Parâmetros dinâmicos para bambus das espécies <i>Dendrocalamus Giganteus</i> , <i>Phyllostachys Áurea</i> e <i>Guadua Angustifolia</i> (Coelho, 2005)	36
Tabela 4.1 - Resultados das medições dos diâmetros e a espessura dos colmos ensaiados.	47
Tabela 4.2 - Valores médios para as duas espécies de bambu Sanchez (2002)	48
Tabela 4.3 - Teor de umidade para as seis variáveis estudadas	48
Tabela 4.4 - Módulo de elasticidade à flexão para as variáveis estudadas	50
Tabela 4.5 - Coeficiente de amortecimento dos segmentos em vibração livre	55
Tabela 4.6 - Freqüências de vibração dos segmentos em vibração livre	55
Tabela 4.7 - Valores de propriedades físicas e mecânicas usados nos cálculos analíticos e numéricos	58
Tabela 4.8 - Freqüências naturais obtidas analiticamente	59
Tabela 4.9 - Freqüências naturais obtidas numericamente	59
Tabela 4.10 – Coeficientes de amortecimento e freqüência natural de vibração para colmos com e sem diafragma	63
Tabela 4.11 - Freqüências naturais obtidas numericamente para os colmos de 1.00m de comprimento	65
Tabela 4.12 - Coeficientes de amortecimento e freqüência natural de vibração para colmos suspensos por fios de nylon	67
Tabela 4.13 - Freqüências naturais obtidas numericamente	69