



Carolina Coelho da Rosa

**Análise experimental das propriedades
dinâmicas dos bambus das espécies
*guadua, dendrocalamus e aurea***

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, Agosto de 2005



Carolina Coelho da Rosa

**Análise experimental das propriedades
dinâmicas dos bambus das espécies
*guadua, dendrocalamus e aurea***

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

Prof. Khosrow Ghavami

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. João Luis Pascal Roehl

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Felipe José da Silva

Departamento de Engenharia Mecânica e de Materiais - IME

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 29 de agosto de 2005

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

Carolina Coelho da Rosa

Graduou-se em Engenharia Civil na Universidade Federal do Pará (UFPA), em novembro de 2002 .

Ficha Catalográfica

Rosa, Carolina Coelho da

Análise experimental das propriedades dinâmicas dos bambus das espécies guadua, dendrocalamus e aurea / Carolina Coelho da Rosa ; orientador: Khosrow Ghavami. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2005.

103 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Bambu. 3. Phyllostachys aurea. 4. Dendrocalamus giganteus. 5. Guadua angustifolia. 6. Fator de amortecimento. 7. Frequência natural. 8. Análise modal. 9. Propriedades físicas. 10. Propriedades mecânicas. I. Ghavami, Khosrow. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Á minha família.

Agradecimentos

A Deus, por ter me dado muita força.

Ao meu orientador professor Khosrow Ghavami, pela orientação no desenvolvimento deste trabalho.

A CAPES, pelo apoio financeiro.

Aos meus amigos, que estavam sempre ao meu lado nestes anos de mestrado.

À minha família que tinha sempre uma palavra de ajuda e incentivo.

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

Ao Professor Newton Soeiro e ao aluno de mestrado de Engenharia Mecânica da UFPA Alan Raphael que me ajudaram na realização dos ensaios desenvolvidos no Laboratório de Mecânica da UFPA.

Ao aluno Rômulo Reis que me auxiliou na realização do ensaio desenvolvido no Laboratório de Vibrações da PUC-Rio.

Ao Jair Gomes, por todo seu carinho, atenção e ajuda na realização deste trabalho.

Resumo

da Rosa, Carolina Coelho; Ghavami, Khosrow. **Análise experimental das propriedades dinâmicas dos bambus das espécies *guadua*, *dendrocalamus* e *aurea***. Rio de Janeiro, 2005. 103 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O Bambu é classificado como Bambusoideae ou como Bambusaceae que pode ser encontrado em abundância especialmente em regiões tropicais e subtropicais. Estudos mostram que a relação resistência à tração e peso específico do bambu é 2.73 vezes maior que a do aço com a vantagem de ter um baixo consumo de energia e baixo custo em sua produção, além de ser um material renovável e ecológico. O bambu é utilizado nas construções civis por séculos, especialmente em regiões sujeitas aos abalos sísmicos. Essas construções, como as obras construídas na América Latina e Taj Mahal, na Índia, mostram que o bambu possui boa resistência às cargas sísmicas; mesmo com essas evidências, muitas vezes citadas na literatura científica disponível, não encontramos estudos sobre o comportamento dinâmico do bambu nas obras de engenharia. No Brasil, o bambu é encontrado com abundância em quase todo território nacional, são muito reduzidos os estudos sobre suas propriedades e metodologia para emprego; quanto às propriedades dinâmicas praticamente sem referências.

Palavras-Chave

Bambu; *Phyllostachys aurea*; *Dendrocalamus giganteus*; *Guadua angustifolia*; fator de amortecimento; frequência natural; análise modal; propriedades físicas e propriedades mecânicas.

Abstract

da Rosa, Carolina Coelho; Ghavami, Khosrow (Advisor). **Experimental analysis of the dynamic properties of the bamboos of the species *guadua*, *dendrocalamus e aurea*.** Rio de Janeiro, 2005. 103 p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The Bamboo is classified as Bambusoideae or as Bambusaceae that can be found in abundance in tropical and sub-tropical countries. Studies had shown that the relation tensile strength and specific weight of the bamboo is 2.73 greater than that of the steel with the advantage to have a low consumption of energy and low cost in its production, besides being a renewable and ecological material. The bamboo is used in the civil constructions per centuries, especially in earthquake regions. These constructions, as constructed in America Latina and Taj Mahal, in India, show that the bamboo possess good resistance to seismic loads; exactly with this fact many times cited in available scientific literature do not find studies on the dynamic behavior of the bamboo. In Brazil, the bamboo is found with abundance in almost all domestic territory, very is reduced the studies on its properties and methodology for job; how much to the dynamic properties practically without references.

Keywords

Bamboo; *Phyllostachys aurea*; *Dendrocalamus giganteus*; *Guadua angustifolia*; damping factor; natural frequency; modal analysis; physical properties and mechanical properties.

Sumário

1. Introdução	18
1.1 As Vantagens do bambu	19
1.2 A utilização do bambu na Engenharia	20
1.3 Objetivos e motivação	21
1.4 Organização do trabalho	22
2. Revisão bibliográfica	24
2.1 Graus de liberdade	25
2.2 Vibração livre	26
2.2.1 Sistema massa-mola	26
2.2.2 Amortecimento viscoso	28
2.2.2.1 Movimento sub-amortecido	31
2.2.2.2 Movimento criticamente amortecido	32
2.2.2.3 Movimento super amortecido	33
2.3 Propriedades dinâmicas	34
2.3.1 Freqüência natural	35
2.3.2 Amortecimento	35
2.3.2.1 Medição do amortecimento	36
2.3.2.1.1 Métodos de análise	36
2.4 Análise modal	39
2.4.1 Análise modal experimental	40
2.4.1.1 Função Resposta em Freqüência (FRF)	40
2.4.1.1.1. Função Resposta em Freqüência Pontual	42
2.4.1.1.2. Função Resposta em Freqüência de Transferência	42
2.4.1.1.3. Função Resposta em Freqüência Impulsiva	43
2.4.1.2. Métodos de identificação modal	43
2.4.1.2.1. Métodos no domínio do tempo	45
2.4.1.2.2. Métodos no domínio da freqüência	49

2.5. Considerações finais	53
3. Métodos e materiais	54
3.1 Introdução	54
3.2 Massa específica	55
3.3 Módulo de elasticidade à flexão e coeficiente de Poisson	56
3.4 Fator de amortecimento e freqüência natural	58
3.4.1. Via ensaio direto	58
3.4.2. Via análise modal	59
3.4.2.1. Apoios especiais	60
3.4.2.1.1. Condição de contorno 1	60
3.4.2.1.2. Condição de contorno 2	61
4. Apresentação e análise dos resultados	64
4.1 Introdução	64
4.2 Massa específica	64
4.3 Módulo de elasticidade à flexão e coeficiente de Poisson	65
4.4 Fator de amortecimento e freqüência natural	68
4.4.1. Via ensaio direto	68
4.4.1.1. Módulo de elasticidade dinâmico	70
4.4.1.2. Freqüências naturais	71
4.4.2. Via análise modal	75
4.4.2.1. Condição de contorno 1	75
4.4.2.2. Condição de contorno 2	83
5. Conclusões	88
5.1. Síntese das principais indicações numéricas	88
5.2. Enunciado das conclusões	89
6. Referências bibliográficas	91

Apêndice A 94

Apêndice B 98

Lista de figuras

Figura 1.1 - Templo Bambushain em Hongzhou, na China	20
Figura 1.2 – Ponte de bambu	20
Figura 1.3 – Pavilhão de bambu na Expo de Hanover – Alemanha em 2000	21
Figura 1.4 – Ponte de bambu em Stuttgart, na Alemanha	21
Figura 1.5 – Ponte de bambu na Colômbia	21
Figura 1.6 – Ponto de bambu na Colômbia	21
Figura 1.7 – Protótipo de uma casa de bambu usada na Índia para o estudo da resistência ao terremoto	22
Figura 2.1 - Modelo matemático de um sistema com um grau de liberdade	26
Figura 2.2 – Sistema massa-mola sem atrito	26
Figura 2.3 – Exemplo de resposta de um sistema sem amortecimento	28
Figura 2.4 – Sistema massa-mola-amortecedor sem atrito	28
Figura 2.5 – Exemplo de resposta de um sistema sub-amortecido	32
Figura 2.6 – Exemplo de resposta de um sistema criticamente amortecido	33
Figura 2.7 - Exemplo de resposta de um sistema super amortecido	34
Figura 2.8 - Resposta sub-amortecida de um sistema com um grau de liberdade	37
Figura 2.9 – Método da meia potência	38
Figura 2.10 - Função Resposta em Freqüência (FRF) pontual	42
Figura 2.11 – Função Resposta em Freqüência (FRF) de transferência	43
Figura 2.12 – Classificação dos métodos de análise modal	44
Figura 2.13 - Diagrama de Nyquist mostrando o ajuste do círculo	50

Figura 3.1–Dimensões das amostras de bambu para o ensaio de massa específica	55
Figura 3.2 – Corpo de prova de bambu sendo pesado na balança eletrônica com precisão de 0,01 g	56
Figura 3.3 – Determinação peso do corpo de prova através da imersão em água	56
Figura 3.4 – Esquema do ensaio com carga estática	57
Figura 3.5 – Segmento de bambu com carga da extremidade livre	57
Figura 3.6 – Vishay, utilizado para obter as deformações dos segmentos	57
Figura 3.7 – Esquema do ensaio para determinação do fator de amortecimento e frequência natural do segmento em balanço	59
Figura 3.8 – Segmento de bambu em balanço para o ensaio para determinação das propriedades dinâmicas	59
Figura 3.9 – Computador usado para obter as respostas dos segmentos	59
Figura 3.10 – Bambu preso em uma de suas extremidade por um fio	61
Figura 3.11 – Bambu inteiro apoiado sobre as esponjas	62
Figura 3.12 – Obtenção da FRF Pontual	62
Figura 3.13 – Obtenção de uma FRF de Transferência	63
Figura 4.1 – Curvas tensão-deformação superiores obtidas durante o ensaio nos segmentos de bambu	66
Figura 4.2 – Curvas tensão-deformação inferiores obtidas durante o ensaio nos segmentos de bambu.	66
Figura 4.3 – Gráfico de carga-deslocamento das espécies estudadas	67
Figura 4.4 – Resposta no domínio do tempo do primeiro teste realizado no terceiro segmento da espécie <i>Guadua angustifolia</i>	68
Figura 4.5 – Resposta no domínio da frequência do primeiro teste realizado no terceiro segmento da espécie <i>Guadua angustifolia</i>	69
Figura 4.6 - Representação do modelo de elementos finitos utilizado para a viga em estudo	72

Figura 4.7– Comparação entre os resultados das frequências naturais da espécie <i>Dendrocalamus giganteus</i>	73
Figura 4.8 – Comparação entre os resultados das frequências naturais da espécie <i>Phyllostachys aurea</i>	74
Figura 4.9 – Comparação entre os resultados das frequências naturais da espécie <i>Guadua angustifolia</i>	74
Figura 4.10 – Modos de vibração da espécie <i>Guadua angustifolia</i> 1ªAmostra	76
Figura 4.11 – Modos de vibração da espécie <i>Guadua angustifolia</i> 2ªAmostra	77
Figura 4.12 – Modos de vibração da espécie <i>Guadua angustifolia</i> 3ªAmostra	78
Figura 4.13 – Modos de vibração da espécie <i>Dendrocalamus giganteus</i> 1ª Amostra	79
Figura 4.14 – Modos de vibração da espécie <i>Dendrocalamus giganteus</i> 2ª amostra	79
Figura 4.15 – Modos de vibração da espécie <i>Dendrocalamus giganteus</i> 3ªAmostra	80
Figura 4.16 – Modos de vibração da espécie <i>Phyllostachys aurea</i> 1ªAmostra	81
Figura 4.17 – Modos de vibração da espécie <i>Phyllostachys aurea</i> 2ªAmostra	81
Figura 4.18 – Modos de vibração da espécie <i>Phyllostachys aurea</i> 3ªAmostra	82
Figura 4.19 – Modos de vibração da espécie <i>Guadua angustifolia</i>	84
Figura 4.20 – Modos de vibração da espécie <i>Dendrocalamus giganteus</i>	85
Figura 4.21 – Modos de vibração da espécie <i>Phyllostachys aurea</i>	86

Lista de tabelas

Tabela 1.1 – Relação entre a resistência à tração e a massa específica dos materiais	19
Tabela 1.2 - Relação entre energia de produção por unidade de tensão de materiais	19
Tabela 2.1 – Valores experimentais do fator de amortecimento	25
Tabela 4.1 – Valores médios de massa específica de cada corpo de prova e a média da espécie <i>Dendrocalamus giganteus</i>	64
Tabela 4.2 – Valores médios de massa específica de cada corpo de prova e média da espécie <i>Phyllostachys aurea</i>	64
Tabela 4.3 – Valores médios de massa específica de cada corpo de prova e média da espécie <i>Guadua angustifolia</i>	65
Tabela 4.4 – Valores médios do coeficiente de Poisson das espécies estudadas	67
Tabela 4.5 - Módulos de elasticidade à flexão das espécies estudadas	67
Tabela 4.6 – Valores médios do fator de amortecimento e frequência natural das espécies de bambu	70
Tabela 4.7 – Resultado do amortecimento e frequência natural dos segmentos de aço e alumínio	70
Tabela 4.8 – Módulos de Elasticidade dinâmicos obtidos a partir das frequências naturais	71
Tabela 4.9 – Frequências naturais obtidas analiticamente	72
Tabela 4.10 – Frequências naturais obtidas numericamente	73
Tabela 4.11 – Resultados das frequências naturais e fatores de amortecimento da espécie <i>Guadua angustifolia</i>	76
Tabela 4.12 – Resultados das frequências naturais e fatores de amortecimento da espécie <i>Dendrocalamus giganteus</i>	78

Tabela 4.13 – Resultados das frequências naturais e fatores de amortecimento da espécie <i>Phyllostachys aurea</i>	80
Tabela 4.14 – Frequências naturais e fatores de amortecimento do primeiro modo de vibração à flexão da espécie <i>Guadua angustifolia</i>	82
Tabela 4.15 – Frequências naturais e fatores de amortecimento do primeiro modo de vibração à flexão da espécie <i>Dendrocalamus giganteus</i>	83
Tabela 4.16 – Frequências naturais e fatores de amortecimento do primeiro modo de vibração à flexão da espécie <i>Phyllostachys aurea</i>	83
Tabela 4.17 – Resultados das frequências naturais e fatores de amortecimento das amostras de bambu apoiadas sobre uma base elástica	84
Tabela 4.18 – Frequências naturais e fatores de amortecimento do primeiro modo de vibração à flexão das espécies <i>Guadua angustifolia</i> , <i>Dendrocalamus giganteus</i> e <i>Phyllostachys aurea</i>	86
Tabela 5.1 - Relação entre o módulo de elasticidade à flexão e a massa específica dos materiais.	88
Tabela 5.2 – Valores de fator de amortecimentos obtidos através do ensaio direto das espécies estudadas.	89
Tabela 5.3 – Valores de fator de amortecimento obtidos através de análise modal considerando a condição de contorno 1.	89
Tabela 5.4 - Valores de fator de amortecimento obtidos através de análise modal considerando a condição de contorno 2.	89

Lista de símbolos e abreviaturas

Romanos

k	Constante de rigidez
m	Massa
C	Coeficiente de amortecimento
F(t)	Força de excitação em função do tempo
t	Tempo
C _{cr}	Amortecimento crítico
W	Perda de energia por ciclo de oscilação
V	Energia potencial
Ω	Freqüência do carregamento harmônico
p_o	Amplitude do carregamento harmônico
D	Fator dinâmico amplificador
p_{max}	Amplitude da resposta permanente máxima
H(ω)	Função de transferência
x(ω)	Resposta do sistema em função da freqüência
F(ω)	Força de excitação em função da freqüência
x(t)	Deslocamento em função do tempo
$\dot{x}(t)$	Velocidade em função do tempo
$\ddot{x}(t)$	Aceleração em função do tempo
S1GL	Sistema com um grau de liberdade
SVGL	Sistema com vários graus de liberdade
FRF	Função resposta em freqüência
E _f	Módulo de elasticidade à flexão
f	Freqüência natural
DG	<i>Dendrocalamus giganteus</i>
GA	<i>Guadua angustifolia</i>
PA	<i>Phyllostachys aurea</i>

Gregos

ν	Coeficiente de Poisson
$\alpha(\omega)$	Receptância
$\alpha(i\omega)$	Receptância
β	Fator de frequência
δ	Decremento logarítmico
ω_d	Freqüência circular amortecida
σ_t	Resistência à tração
ξ	Fator de amortecimento
ω_n	Freqüência natural circular
ρ	Amplitude da resposta permanente
η	Fator de perda