

## 4. Apresentação e análise dos resultados

### 4.1. Introdução

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nos ensaios descritos no capítulo 3, fazendo uma análise de cada um deles incluindo comparações com resultados de pesquisas anteriores.

A nomenclatura usada na apresentação de resultados corresponde a DG para os corpos de prova da espécie *Dendrocalamus Giganteus*; para as cinco variações estudadas da espécie *Phyllostachys Áurea* (PA) a nomenclatura é: PAST0A corpos de prova dos colmos sem tratamento cortados em março de 2008, PAST1A sem tratamento cortados em maio de 2007, PAST7A sem tratamento cortados em 2001, PACT0A com tratamento ao fogo cortados em março de 2008 e PACT1A com tratamento ao fogo cortados em maio de 2007.

### 4.2. Diâmetro e espessura

Os resultados da medição dos diâmetros e as espessuras dos colmos ensaiados são apresentados na Tabela 4.1 que contém os valores médios para cada conjunto de dados.

PROPRIEDADE		DG	PA-I	PA-II	PA-III	PA-IV	PA-V
DIÂMETRO EXTERNO	MEDIA (mm)	98.67	36.14	33.87	49.07	32.75	37.53
	DESVIO PADRÃO	1.20	1.65	1.00	0.42	1.27	1.07
ESPESSURA	MEDIA (mm)	14.17	4.46	4.23	7.48	4.21	4.36
	DESVIO PADRÃO	0.87	0.27	0.30	0.58	0.30	0.41
COMPRIMENTO INTERNODAL	MEDIA (mm)	362.50	221.38	223.38	219.25	210.75	209.88
	DESVIO PADRÃO	49.81	8.57	8.83	7.03	9.09	11.63

Tabela 4.1 - Resultados das medições dos diâmetros e a espessura dos colmos ensaiados.

Embora os colmos usados nas cinco variações estudadas da espécie PA serem do mesmo bambuzal, elas exibem características diferentes. O PAST7A tem um diâmetro externo médio maior quando comparado com as outras quatro amostras da mesma espécie. O mesmo comportamento é observado na espessura. Uma causa deste comportamento é que os colmos das variações

PAST0A, PAST1A, PACT0A e PACT1A foram cortados nos anos 2007 e 2008 pertencendo provavelmente a uma mesma sementeação, já os colmos PAST7A que foram cortados no ano 2001 correspondem a outra.

A espécie PA possui valores menores de diâmetro externo e espessura da parede do que a espécie DG. Sanchez (2002) encontrou um comportamento similar no mapeamento das propriedades físicas das duas espécies; a Tabela 4.2 apresenta os valores encontrados nessa pesquisa, que correspondem à média do colmo todo.

PROPRIEDADE	DG	PA
Diâmetro externo médio (mm)	79.87	36.12
Espessura média da parede (mm)	17.03	2.88

Tabela 4.2 - Valores médios para as duas espécies de bambu Sanchez (2002)

### 4.3. Umidade

A Tabela 4.3 apresenta os valores médios obtidos na determinação do teor de umidade de cada uma das variáveis estudadas; cada valor corresponde à média de 3 corpos de prova ensaiados.

PROPRIEDADE	DG	PA-I	PA-II	PA-III	PA-IV	PA-V
<b>MC (%)</b>						
<b>MEDIA</b>	12.73	13.03	12.88	11.91	11.55	11.27
<b>DESVIO PADRÃO</b>	0.05	0.09	0.13	0.37	0.04	0.26

Tabela 4.3 - Teor de umidade para as seis variáveis estudadas

Comparando os resultados obtidos para as cinco variáveis estudadas da espécie PA, os corpos de prova PAST0A apresentam maior teor de umidade, que vai decrescendo até o menor valor encontrado nos corpos de prova PACT1A. Os corpos de prova para PAST0A, PACT0A PAST1A e PACT1A foram cortados no mesmo ano, mas apresentam umidades diferentes porque os bambus PACT0A e PACT1A têm tratamento ao fogo que reduz a umidade das amostras.

Os resultados obtidos para os corpos de prova que não têm tratamento vão diminuindo de acordo com o tempo de armazenamento, tendo seu maior valor com PAST0A que foi cortado no ano 2008 e o menor com PAST7A que foi cortado no ano de 2001.

#### 4.4. Módulo de elasticidade à flexão

Para a medição do módulo de elasticidade à flexão das seis variáveis de bambu estudadas são feitos testes de segmentos em balanço como foi explicado no capítulo anterior. As Figura 4-1 e Figura 4-2 apresentam os gráficos carga x deslocamento para segmentos das espécies DG e PAST0A.

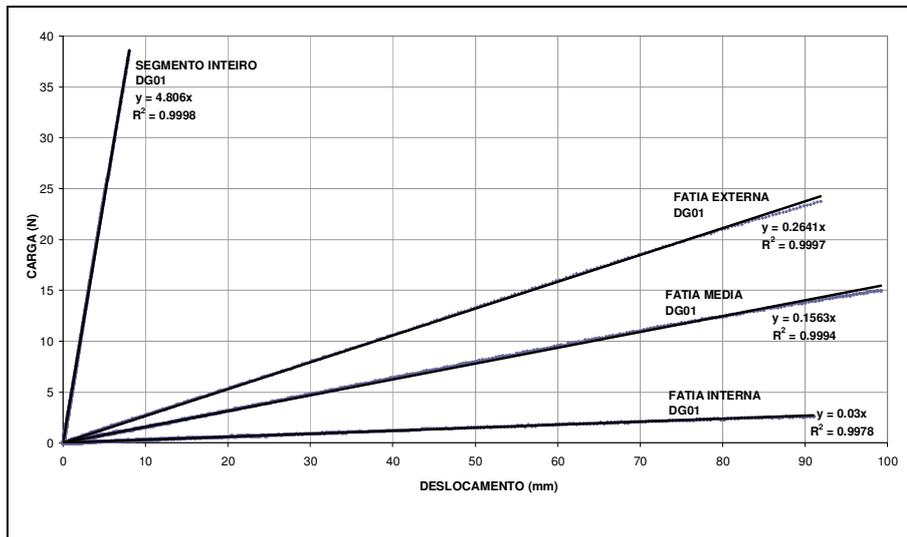


Figura 4-1 – Carga x deslocamento para a espécie DG

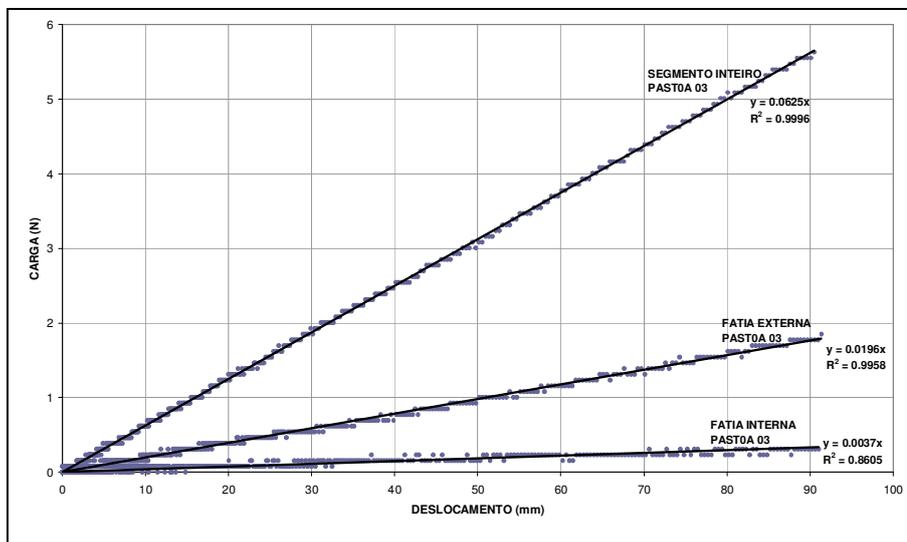


Figura 4-2 – Carga x deslocamento para a espécie PAST0A

Os valores médios calculados para os módulos de elasticidade à flexão para os segmentos inteiros e as fatias das seis variáveis de bambu estudadas são apresentados na Tabela 4.4. Os resultados correspondem à média de 3 corpos de prova ensaiados.

CORPO DE PROVA	DG	DESVIO	PAST0A	DESVIO	PAST1A	DESVIO	PAST7A	DESVIO	PACT0A	DESVIO	PACT1A	DESVIO
	E (GPa)	PADRÃO										
Segmento inteiro	13.872	3.397	15.515	3.783	17.407	0.375	15.766	0.567	13.703	0.405	13.974	1.756
Fatia externa	15.967	0.899	19.843	2.598	19.258	0.743	21.363	1.632	11.834	3.998	11.017	0.798
Fatia media	14.194	0.028	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~
Fatia interna	7.973	1.611	9.813	4.726	9.732	4.773	7.965	1.678	9.684	3.243	9.393	2.356

Tabela 4.4 - Módulo de elasticidade à flexão para as variáveis estudadas

Coelho (2005) encontrou para o módulo de elasticidade à flexão de segmentos da base dos bambus das espécies *Dendrocalamus Giganteus* e *Phyllostachys Áurea* valores de 7.19 GPa e 10.84 GPa respectivamente; estes valores correspondem a ensaios em segmentos em balanço. A diferença dos valores encontrados na presente pesquisa com os valores citados pode estar na seção transversal dos segmentos usados na pesquisa anterior, que não foi mencionada.

Comparando os resultados obtidos para as cinco variações da espécie PA observa-se que os segmentos PACT0A e PACT1A têm menor valor de módulo de elasticidade para o segmento inteiro e para a fatia externa; esse comportamento é causado pelo deterioro das fibras externas com o tipo de tratamento.

A eq. (4.1) indica a variação da fração volumétrica das fibras na espessura da parede do colmo na região basal de bambus da espécie DG (Ghavami & Souza, 2000) e a eq. (4.2) da região basal da espécie PA (Sanchez, 2002). Nas equações (4.1) e (4.2) a posição  $x = 0$  corresponde à fase interna do material e  $x = 1$  à fase externa.

$$V_f(x) = -8.57x^2 + 32.94x + 28.93 \quad (4.1)$$

$$V_f(x) = 30.08x^2 + 22.19x + 17.443 \quad (4.2)$$

Para obter a equação que define a variação do módulo de elasticidade à flexão em função da fração volumétrica das fibras na parede do colmo, são plotados os valores obtidos para cada uma das fatias e depois é feita uma regressão linear. A Figura 4-3 apresenta a variação do módulo de elasticidade a flexão em função da fração volumétrica das fibras para a espécie DG e a Figura 4-4 para as variações estudadas da espécie PA.

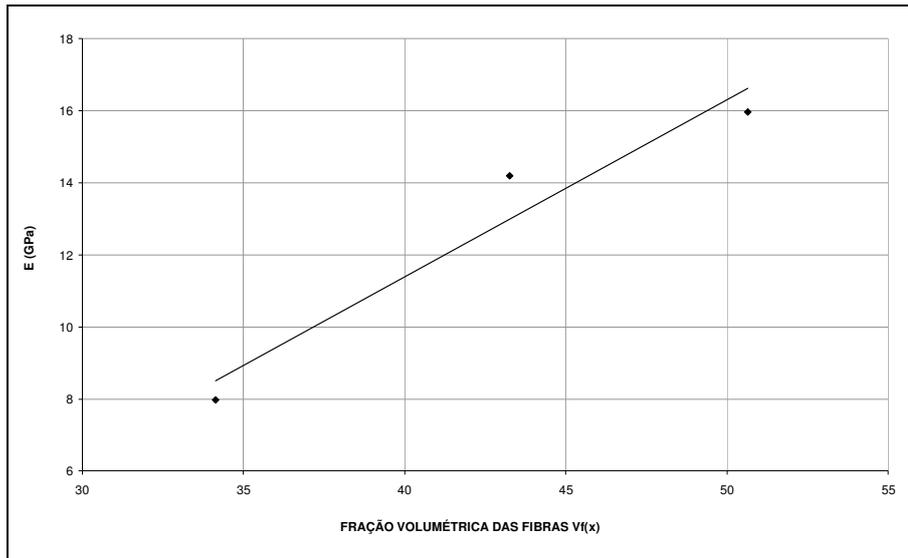


Figura 4-3 - Variação do módulo de elasticidade à flexão em função da fração volumétrica das fibras na parede do colmo para a espécie DG

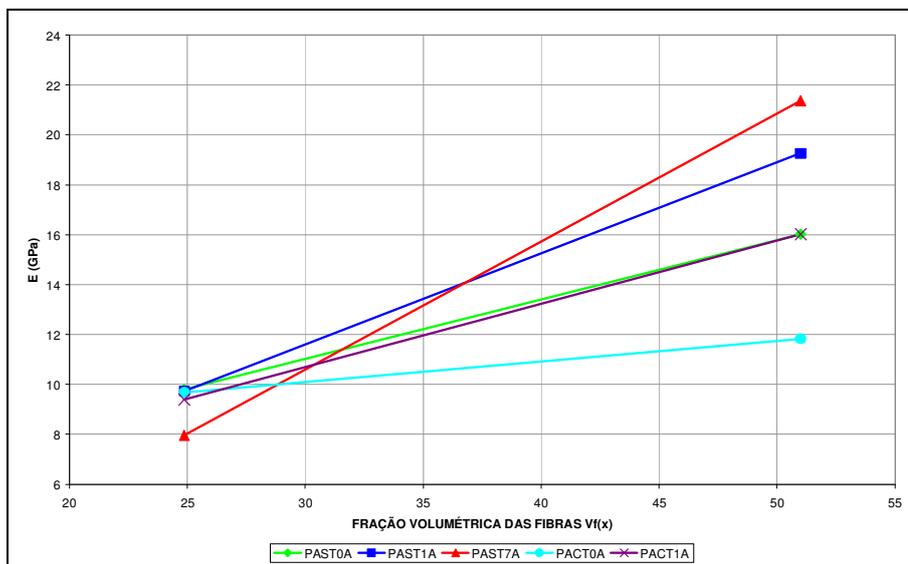


Figura 4-4 - Variação do módulo de elasticidade à flexão em função da fração volumétrica das fibras na parede do colmo as cinco variações estudadas da espécie PA

Para as duas espécies observa-se um incremento no módulo de elasticidade à flexão com o aumento da fração volumétrica das fibras, que para a espécie DG é representado pela equação (4.3) e para as PAST0A, PAST1A, PAST7A, PACT0A e PACT1A pelas equações (4.4), (4.5), (4.6), (4.7) e (4.8) respectivamente. Nas equações (4.3) até (4.8) a posição  $x = 0$  corresponde à fase interna do material e  $x = 1$  à fase externa.

$$E(GPa) = 0.4917V_f(x) - 8.2743 \quad (4.3)$$

$$E(GPa) = 0.2374V_f(x) + 3.9092 \quad (4.4)$$

$$E(GPa) = 0.3645V_f(x) + 0.6669 \quad (4.5)$$

$$E(GPa) = 0.5126V_f(x) - 4.7848 \quad (4.6)$$

$$E(GPa) = 0.0823V_f(x) + 7.638 \quad (4.7)$$

$$E(GPa) = 0.2535V_f(x) + 3.0895 \quad (4.8)$$

## 4.5.

### Fator de amortecimento e frequência natural de vibração

#### 4.5.1.

#### Testes em vibração livre

Neste experimento são ensaiadas 57 amostras, 12 para DG e 9 para cada uma das variações estudadas da espécie PA. Cada corpo de prova é ensaiado quatro vezes, duas para obter a resposta do segmento em vibração livre no domínio do tempo e duas para obter a resposta no domínio da frequência.

As Figura 4-5 e 4-6 mostram a resposta em vibração livre no domínio do tempo de segmentos da espécie DG e PAST0A respectivamente.

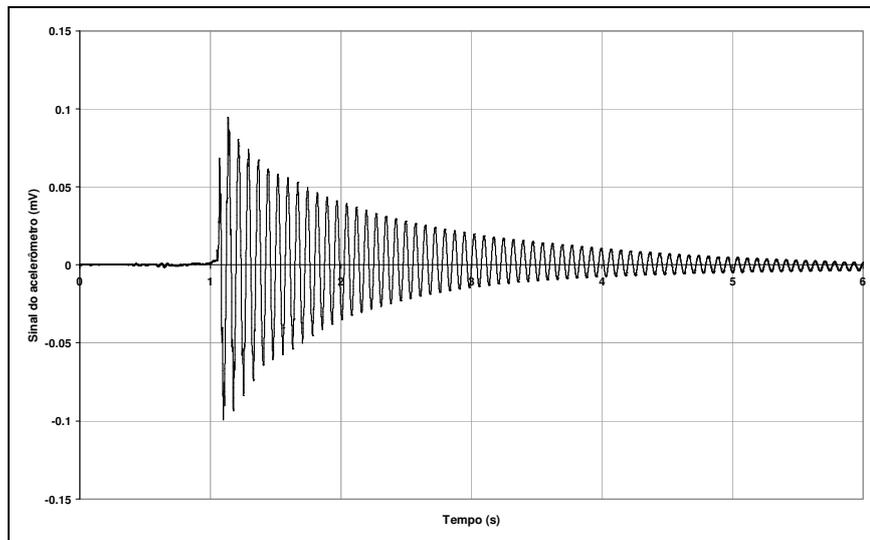


Figura 4-5 - Resposta no domínio do tempo para a fatia média DG-02, segundo teste

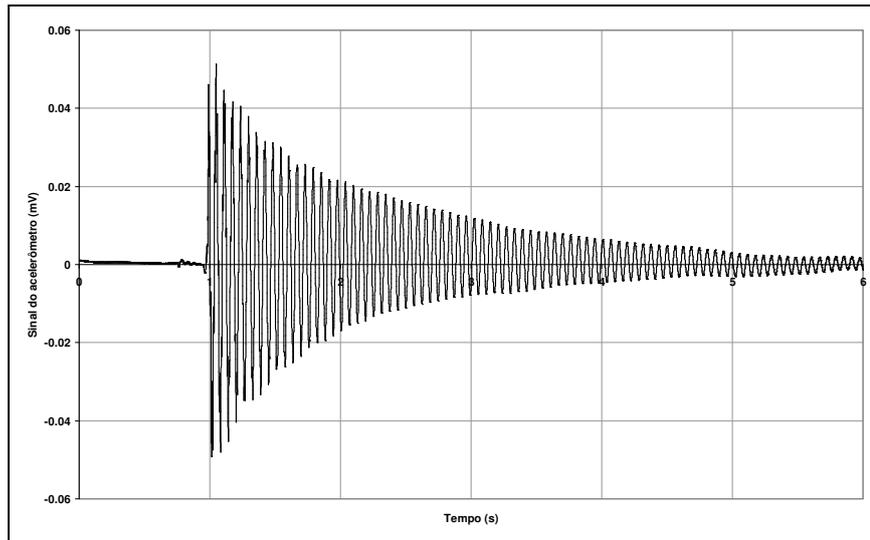


Figura 4-6 - Resposta no domínio do tempo para o segmento inteiro PAST0A-03, segundo teste

Nas duas figuras anteriores observa-se que a condição inicial em deslocamento na extremidade livre do segmento é introduzida aproximadamente no tempo  $t \approx 1.0s$ , tempo até o qual o sinal de resposta captado pelo acelerômetro deveria ser nulo, mas captou algum ruído causado por algum fator externo. Para reduzir ao máximo qualquer mudança introduzida pelo processamento dos dados, nos cálculos é usada diretamente a resposta do acelerômetro aplicando o método do decremento logarítmico entre duas amplitudes separadas 5 ciclos de vibração o valor de coeficiente de amortecimento  $\xi$  corresponde à média dos decrementos calculados (Montalvão et al., 2006).

As Figura 4-7 e 4-8 apresentam a resposta em vibração livre no domínio da frequência para segmentos da espécie DG e PAST0A respectivamente.

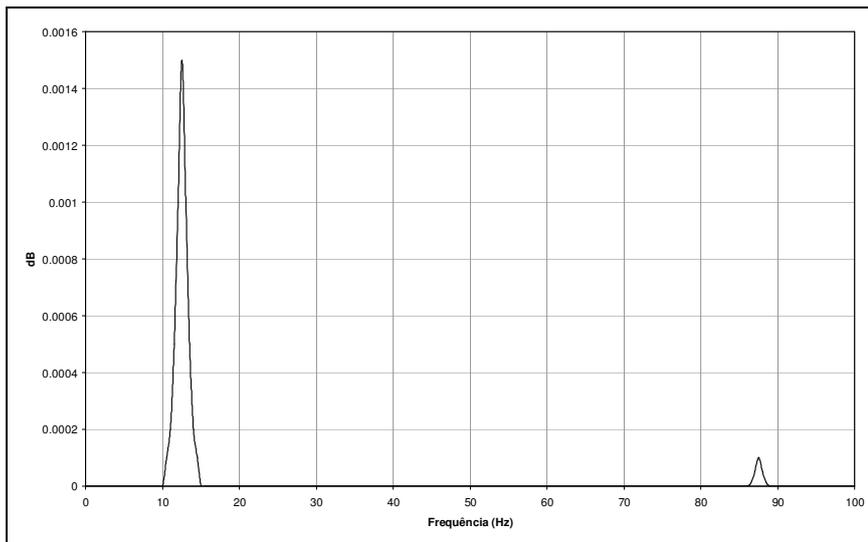


Figura 4-7 - Resposta no domínio da frequência para a fatia média DG-01, primeiro teste

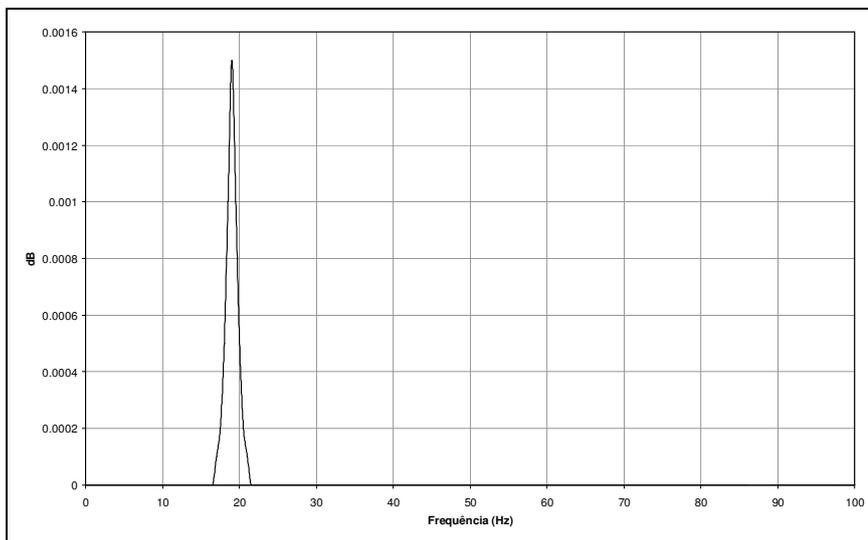


Figura 4-8 - Resposta no domínio da frequência para a fatia externa PAST0A-02, segundo teste

Na Figura 4-7 observa-se que a frequência para o primeiro modo de vibração do corpo de prova DG-01 corresponde a  $f_1 = 12.5Hz$  e do segundo modo de vibração  $f_2 = 87.5Hz$ . Na Figura 4-8 nota-se que a frequência do primeiro modo de vibração do corpo de prova PAST0A-02 corresponde a  $f_1 = 19.0Hz$ . Devido a que a resolução do eixo das frequências no momento do ensaio é ajustada até 100 Hz, não é possível obter a frequência do segundo modo de vibração.

As Tabela 4.5 e 4.6 apresentam os resultados obtidos para coeficiente de amortecimento e frequências naturais de vibração respectivamente, dos

segmentos ensaiados das espécies de bambu estudadas. Os resultados correspondem à média de 6 ensaios.

CORPO DE PROVA	DG	DESVIO	PAST0A	DESVIO	PAST1A	DESVIO	PAST7A	DESVIO	PACT0A	DESVIO	PACT1A	DESVIO
	(%)	PADRÃO	(%)	PADRÃO	(%)	PADRÃO	(%)	PADRÃO	(%)	PADRÃO	(%)	PADRÃO
Segmento inteiro	1.01	0.088	1.33	0.023	1.24	0.035	1.19	0.039	0.97	0.059	0.91	0.078
Fatia externa	1.01	0.054	1.47	0.035	1.34	0.056	1.20	0.032	1.07	0.062	0.96	0.039
Fatia media	1.11	0.045	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~
Fatia interna	1.19	0.045	1.59	0.067	1.46	0.043	1.29	0.029	1.18	0.067	1.15	0.035

Tabela 4.5 - Coeficiente de amortecimento dos segmentos em vibração livre

CORPO DE PROVA	DG			PAST0A	DESVIO	PAST1A	DESVIO	PAST7A	DESVIO	PACT0A	DESVIO	PACT1A	DESVIO
	f <sub>1</sub> (Hz)	f <sub>2</sub> (Hz)	DESVIO PADRÃO	f <sub>1</sub> (Hz)	PADRÃO								
Segmento inteiro	31.50	~	2.35	24.00	3.44	25.50	0.78	29.50	1.78	24.50	1.32	26.00	1.43
Fatia externa	12.50	84.50	1.26	15.50	1.35	18.00	1.98	20.50	0.78	15.00	2.56	17.50	2.27
Fatia media	15.00	88.50	3.67	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~
Fatia interna	9.00	51.50	1.09	12.50	2.37	14.50	1.12	15.00	0.54	13.50	0.44	14.00	1.14

Tabela 4.6 - Freqüências de vibração dos segmentos em vibração livre

As Figura 4-9 e 4-10 apresentam a variação do coeficiente de amortecimento em função da fração volumétrica das fibras para a espécie DG e para as cinco variações estudadas da espécie PA respectivamente.

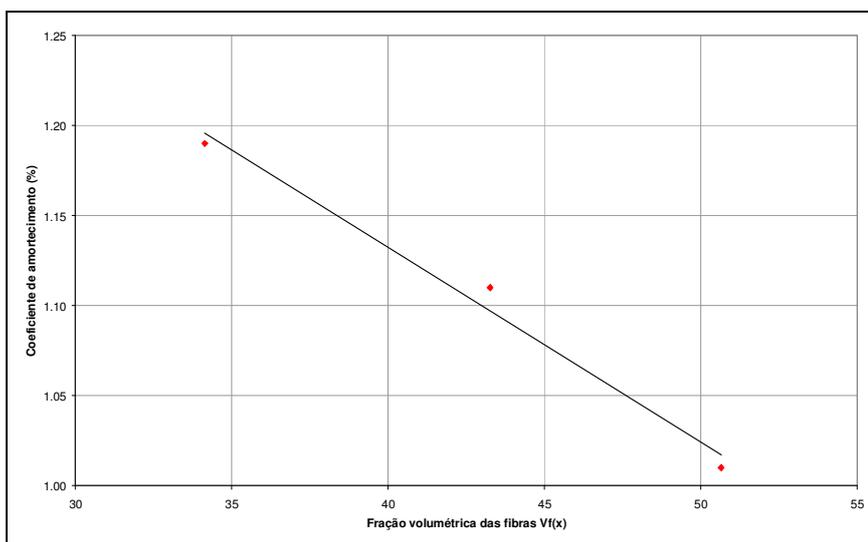


Figura 4-9 - Variação do  $\xi$  em função da variação da fração volumétrica das fibras na espessura da parede do colmo, espécie DG

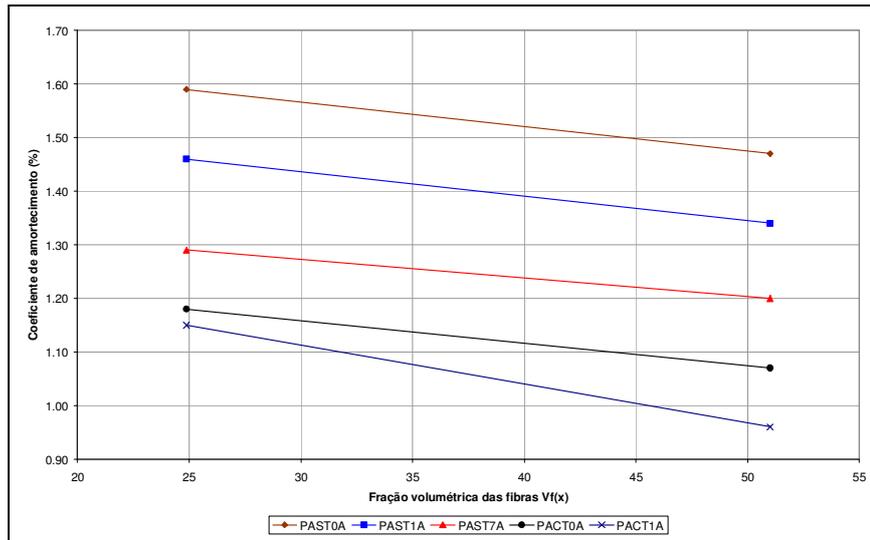


Figura 4-10 - Variação do  $\xi$  em função da variação da fração volumétrica das fibras na espessura da parede do colmo, para as cinco variáveis da espécie PA

Nota-se que o valor do coeficiente de amortecimento aumenta com a diminuição da fração volumétrica das fibras, sendo representado este comportamento pela equação (4.9) para a espécie DG e pelas equações (4.10), (4.11), (4.12), (4.13) e (4.14) para PAST0A, PAST1A, PAST7A, PACT0A e PACT1A respectivamente. Nas equações (4.9) até (4.14) a posição  $x = 0$  corresponde à fase interna do material e  $x = 1$  à fase externa.

$$\xi(\%) = -0.0108V_f(x) + 1.565 \quad (4.9)$$

$$\xi(\%) = -0.0046V_f(x) + 1.7042 \quad (4.10)$$

$$\xi(\%) = -0.0046V_f(x) + 1.5742 \quad (4.11)$$

$$\xi(\%) = -0.0034V_f(x) + 1.3756 \quad (4.12)$$

$$\xi(\%) = -0.0042V_f(x) + 1.2847 \quad (4.13)$$

$$\xi(\%) = -0.0073V_f(x) + 1.3308 \quad (4.14)$$

Comparando os resultados dos segmentos da espécie DG com os valores obtidos por Ghavami et al (2003), que encontrou o valor médio do coeficiente de amortecimento para segmentos da espécie DG igual a  $\xi = 0.55$ , as diferenças podem ser devidas a variações nas dimensões dos segmentos, mas principalmente pelas condições de engaste usadas nas duas pesquisas; na pesquisa do Ghavami et al (2003) o engaste é feito com uma garra metálica, sem garantir a restrição total das rotações no apoio, afetando a resposta dos segmentos; já na presente pesquisa o engaste é garantido com duas placas metálicas parafusadas (Figura 3-5). Coelho (2005) encontrou um valor de

$\xi = 1.52$  para fatias médias da mesma espécie de bambu, sendo este resultado 37% maior quando comparado com o valor do  $\xi$  para fatia média de DG obtido na presente pesquisa, o que pode ser causado pela presença de fungo nos segmentos ensaiados neste trabalho.

Comparando os valores obtidos de  $\xi$  para os segmentos das variações PAST0A, PAST1A e PAST7A, observa-se que o valor do coeficiente de amortecimento diminui com o tempo de armazenamento; este comportamento pode ser devido à estabilização da lignina com o tempo. A Figura 4-11 mostra a variação do  $\xi$  em função do tempo de armazenamento para os segmentos inteiros de PAST0A, PAST1A e PAST7A. Coelho (2005) obteve um valor de  $\xi = 1.32$  para segmentos da mesma espécie, cujo valor concorda com os resultados obtidos neste trabalho, pois nessa pesquisa os colmos tinham 4 anos de armazenamento, sendo o valor do seu  $\xi$  intermediário aos obtidos para PAST1A e PAST7A.

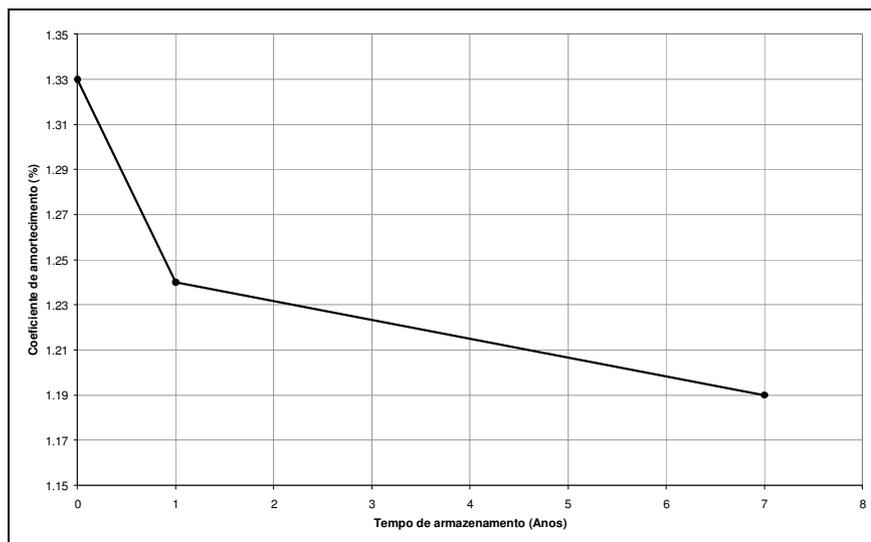


Figura 4-11 - Variação do  $\xi$  em função do tempo de armazenamento para os segmentos inteiro PAST0A, PAST1A e PAST7A

Os valores obtidos para o coeficiente de amortecimento de PACT0A e PACT1A mostram que existe uma redução de 26% no valor quando comparados com os valores das outras variáveis da mesma espécie. Este comportamento deve-se a que o tratamento usado nestes colmos reduz sua umidade e também queima suas fibras externas.

Coelho (2005) encontrou um valor para a frequência natural de vibração de  $f_1 = 8.0Hz$  e  $f_1 = 9.5Hz$  para segmentos da espécie DG e PA respectivamente, menores que os valores obtidos na presente pesquisa; esse comportamento

deve-se a variações nas seções transversais dos segmentos, presença de fungo nos segmentos da espécie DG e principalmente na diferença de módulos de elasticidade dos materiais usados nas duas pesquisas.

Comparando os resultados obtidos do coeficiente de amortecimento para as duas espécies de bambu com valores para segmentos de aço e alumínio encontrados por Coelho (2005) de  $\xi = 0.33\%$  e  $\xi = 0.90\%$  respectivamente, observa-se que a capacidade de dissipação de energia do bambu é maior com respeito à de materiais comumente usados na construção civil.

#### 4.5.1.1. Freqüências naturais teóricas

Para fazer uma comprovação dos valores obtidos experimentalmente das freqüências naturais de vibração para os segmentos é realizado o calculo analítico, usando as equações da teoria de vibrações transversais em vigas (Tse et al, 1979) e o calculo numérico, através do programa SAP 2000<sup>®</sup>.

Nos cálculos analíticos e numéricos são usados os valores de módulo de elasticidade obtidos na presente pesquisa, que para a espécie PA corresponde a média dos valores encontrados para as cinco variações estudadas. Os valores utilizados de coeficiente de Poisson e peso específico correspondem aos valores obtidos na pesquisa de Coelho (2005). A Tabela 4.7 mostra os valores de propriedades físicas e mecânicas usadas nos cálculos.

CORPO DE PROVA	DG			PA		
	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\nu$	E (GPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\nu$	E (GPa)
Segmento inteiro	740	0.26	13.872	808	0.34	15.22
Fatia externa	924	0.26	15.967	930	0.34	16.83
Fatia média	705	0.26	14.194	~	~	~
Fatia interna	626	0.26	7.973	686	0.34	9.38

Tabela 4.7 - Valores de propriedades físicas e mecânicas usados nos cálculos analíticos e numéricos

O cálculo analítico é apresentado no Apêndice A e os resultados são apresentados na Tabela 4.8 onde se mostram as freqüências naturais para os primeiros quatro modos de vibração das vigas em balanço. Nos cálculos o valor da inércia leva em conta a curvatura natural do segmento inteiro e das fatias externa e interna.

CORPO DE PROVA	DG				PA			
	f <sub>1</sub> (Hz)	f <sub>2</sub> (Hz)	f <sub>3</sub> (Hz)	f <sub>4</sub> (Hz)	f <sub>1</sub> (Hz)	f <sub>2</sub> (Hz)	f <sub>3</sub> (Hz)	f <sub>4</sub> (Hz)
Segmento inteiro	29.24	183.23	513.06	1005.39	27.15	170.17	476.48	933.71
Fatia externa	13.32	83.48	233.74	458.04	17.18	107.67	301.46	590.75
Fatia media	14.38	90.09	252.24	494.29	~	~	~	~
Fatia interna	7.62	47.77	133.74	262.08	14.93	93.54	261.90	513.23

Tabela 4.8 - Frequências naturais obtidas analiticamente

Os resultados obtidos no cálculo numérico são apresentados na Tabela 4.9 e no Apêndice B se mostra o código usado no programa SAP 2000®. A modelação numérica é feita levando em conta a curvatura natural do segmento inteiro e das fatias externa e interna.

CORPO DE PROVA	DG				PA			
	f <sub>1</sub> (Hz)	f <sub>2</sub> (Hz)	f <sub>3</sub> (Hz)	f <sub>4</sub> (Hz)	f <sub>1</sub> (Hz)	f <sub>2</sub> (Hz)	f <sub>3</sub> (Hz)	f <sub>4</sub> (Hz)
Segmento inteiro	30.54	189.67	527.15	1025.80	26.59	164.01	453.54	879.53
Fatia externa	13.33	82.58	228.98	444.35	18.14	111.72	308.00	593.84
Fatia media	14.38	89.11	247.11	479.52	~	~	~	~
Fatia interna	7.86	48.69	134.97	261.74	15.76	97.06	267.58	515.91

Tabela 4.9 - Frequências naturais obtidas numericamente

As Figura 4-12 4-13 apresentam a comparação dos resultados obtidos experimentalmente, analiticamente e numericamente para a primeira frequência de vibração das vigas em balanço da espécie DG e PA respectivamente; na Figura 4-13 o valor experimental corresponde à média dos valores encontrados para as cinco variações estudadas da espécie PA. As diferenças encontradas entre os resultados analíticos e numéricos com respeito aos experimentais se devem a que nos cálculos teóricos a seção dos corpos de prova é constante ao longo do comprimento e na realidade existem pequenas variações nas seções transversais ao longo do comprimento.

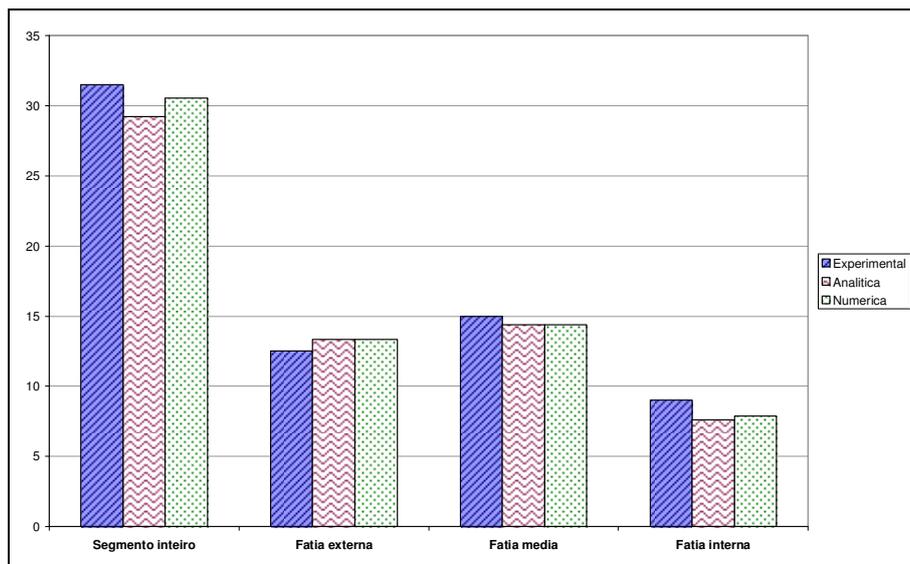


Figura 4-12 - Comparação dos resultados experimentais, analíticos e numéricos para a primeira frequência de vibração dos segmentos da espécie DG

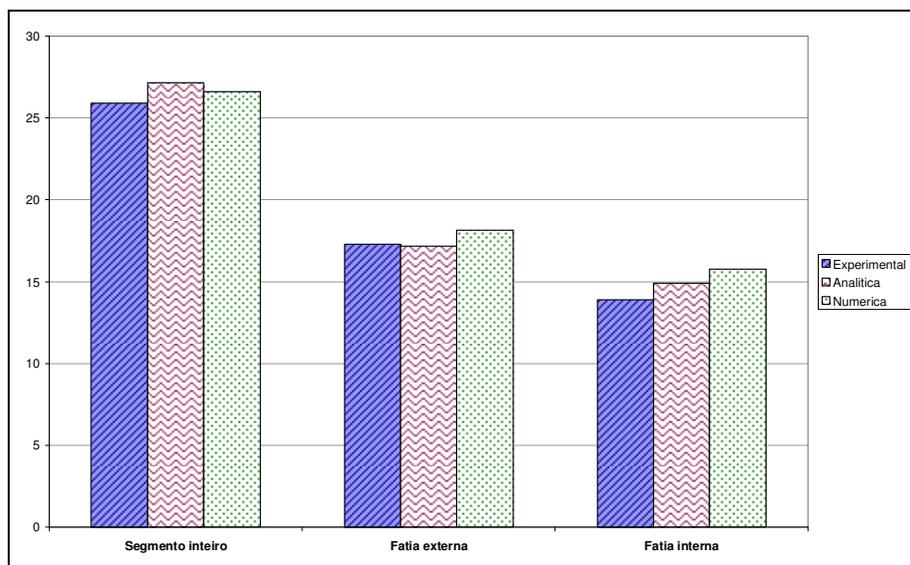


Figura 4-13 - Comparação dos resultados experimentais, analíticos e numéricos para a primeira frequência de vibração dos segmentos da espécie PA

#### 4.5.2. Testes modais

Como foi explicado no capítulo anterior este tipo de teste tem como objetivo a obtenção das Funções de Resposta em Frequência (FRF) que contêm os parâmetros modais de cada um dos colmos ensaiados, lembrando que a FRF usada para obter os parâmetros modais corresponde à média das 12 medições feitas em cada corpo de prova (Richardson & Formenti, 1985).

#### 4.5.2.1. Bambu apoiado sobre duas esponjas

As Figura 4-14 e 4-15 apresentam a FRF média obtida a partir das medições feitas nos 12 pontos de colmos com e sem diafragma da espécie DG respectivamente.

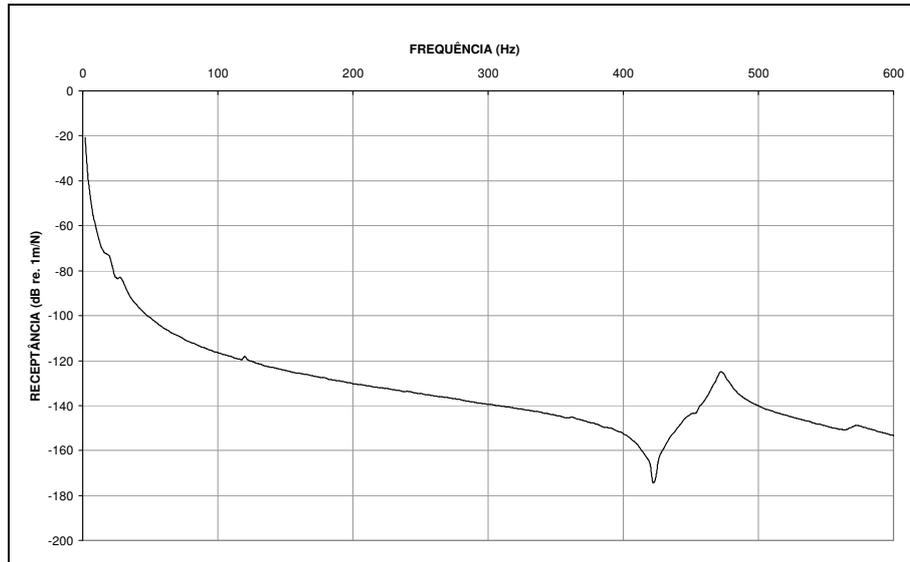


Figura 4-14 - FRF média para colmo de 1.00 m de comprimento com diafragma DG-03, segundo teste

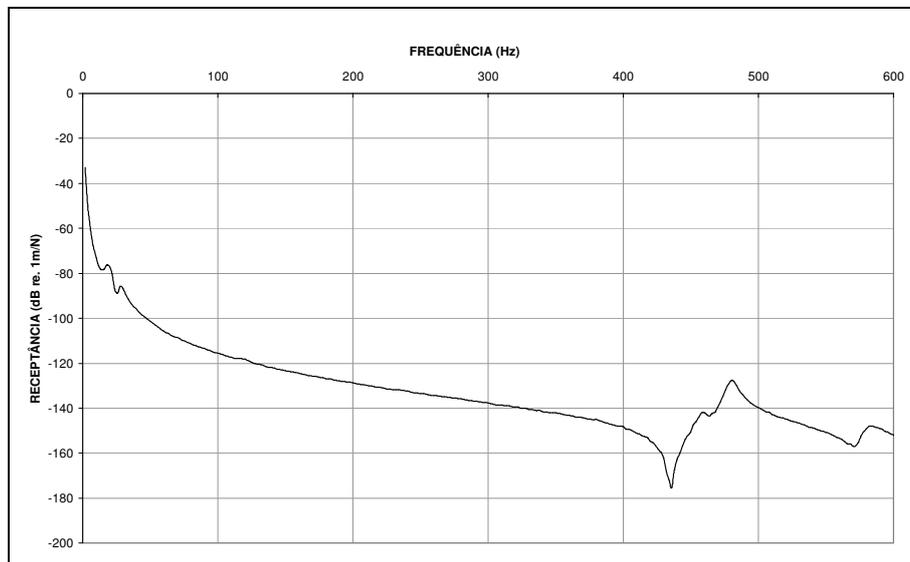


Figura 4-15 - FRF média para colmo de 1.00 m de comprimento sem diafragma DG-03, primeiro teste

As Figura 4-16 e 4-17 apresentam a FRF média obtida a partir das medições feitas nos 12 pontos de colmos com e sem diafragma da espécie PAST7A respectivamente.

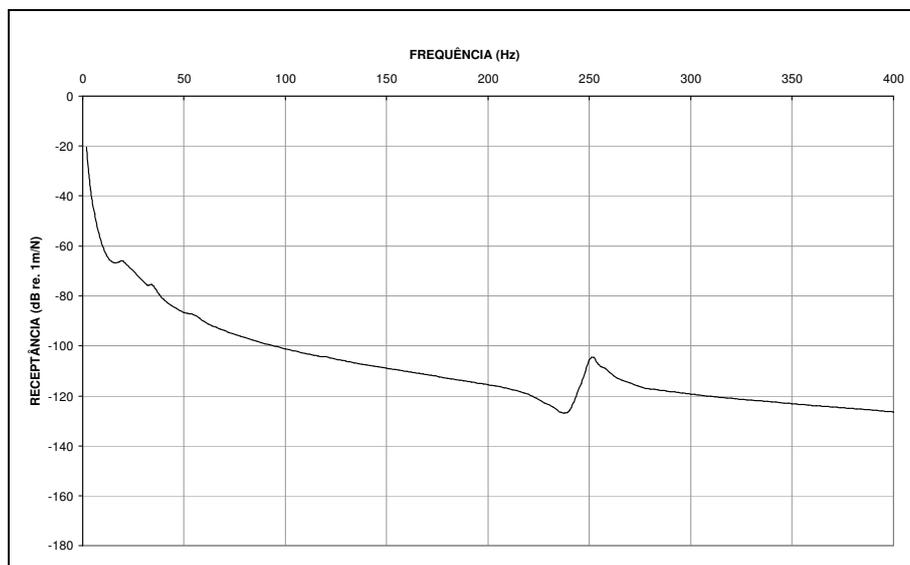


Figura 4-16 - FRF média para colmo de 1.00 m de comprimento com diafragma PAST7A-03, primeiro teste

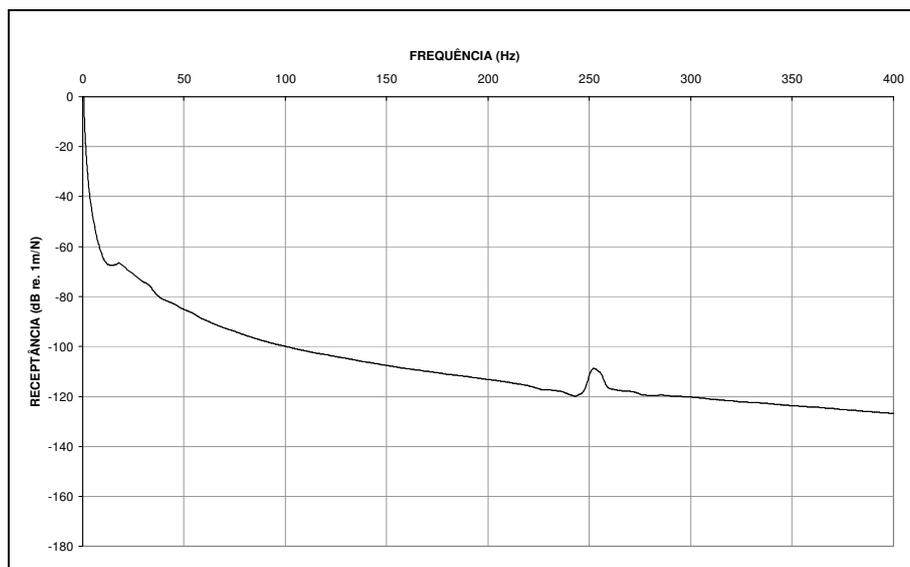


Figura 4-17 - FRF média para colmo de 1.00 m de comprimento sem diafragma PAST7A-03, segundo teste

A Tabela 4.10 apresenta os resultados obtidos para coeficiente de amortecimento e frequências naturais de vibração para colmos com e sem das espécies de bambu estudadas; os resultados correspondem à média de 6 ensaios.

CORPO DE PROVA	COM DIAFRAGMA				SEM DIAFRAGMA			
	(%)	DESVIO PADRÃO	$f_o$ (Hz)	DESVIO PADRÃO	(%)	DESVIO PADRÃO	$f_o$ (Hz)	DESVIO PADRÃO
DG	1.35	0.045	462.28	8.117	1.19	0.042	468.02	9.906
PAST0A	1.26	0.027	157.13	5.484	1.04	0.049	166.05	6.671
PAST1A	1.05	0.151	179.56	11.840	0.83	0.096	182.61	9.677
PAST7A	0.82	0.112	272.58	21.402	0.67	0.071	274.03	20.774
PACT0A	0.94	0.069	165.84	6.676	0.85	0.098	169.82	6.295
PACT1A	0.93	0.118	186.36	13.040	0.80	0.129	192.46	7.912

Tabela 4.10 – Coeficientes de amortecimento e freqüência natural de vibração para colmos com e sem diafragma

Coelho (2005), encontrou o valor médio do coeficiente de amortecimento para colmos de 1.00 m de comprimento com diafragma da espécie DG como sendo  $\xi = 1.75\%$  e para PA  $\xi = 0.96\%$  e da freqüência natural de vibração de  $f_o = 567.65Hz$  e  $f_o = 254.10Hz$  para a espécie DG e PA respectivamente. As diferenças destes valores com os obtidos na presente pesquisa devem-se a presença de fungo no material ensaiado da espécie DG, possíveis variações nas seções transversais e longitudinais dos colmos, teores de umidade e na diferença de módulos de elasticidade dos materiais usados nas duas pesquisas.

Retirar o diafragma dos colmos traz um efeito desfavorável no comportamento dinâmico do material, pois diminui o coeficiente de amortecimento em 15%.

Comparando os valores obtidos de  $\xi$  para os colmos das variáveis PAST0A, PAST1A e PAST7A, observa-se que o valor do coeficiente de amortecimento diminui com o tempo de armazenamento causado pela estabilização da lignina com o tempo; esse comportamento também é observado nos resultados obtidos nos testes em vibração livre de segmentos em balanço. A Figura 4-18 mostra a variação do  $\xi$  em função do tempo de armazenamento para os colmos com e sem diafragma de PAST0A, PAST1A e PAST7A. O resultado obtido por Coelho (2005) concorda com os resultados obtidos neste trabalho, pois nessa pesquisa os colmos tinham 4 anos de armazenamento, sendo o valor do seu  $\xi$  intermediário aos obtidos para PAST1A e PAST7A.

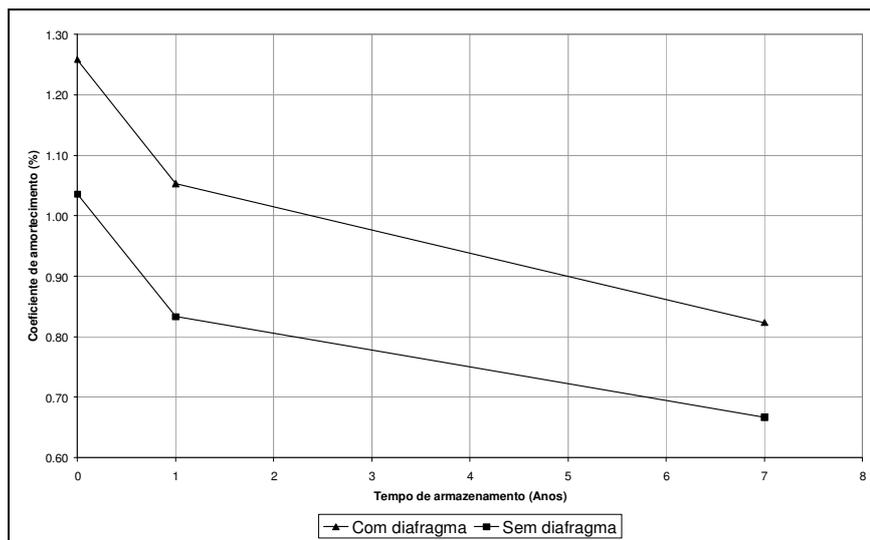


Figura 4-18 - Variação do  $\xi$  em função do tempo de armazenamento para colmos de 1.00m de comprimento de PAST0A, PAST1A e PAST7A

Os valores obtidos para o coeficiente de amortecimento dos colmos com e sem diafragma de PACT0A mostram que existe uma redução 21% quando comparados com os valores obtidos para PAST0A; a redução observada nos resultados dos colmos de PACT1A quando comparados com o valor de PAST1A é de 8%. Este comportamento deve-se a que o tratamento usado nesses colmos reduz sua umidade e também queima suas fibras externas, diminuindo a sua capacidade de dissipar energia.

Comparando os valores obtidos para freqüências naturais de vibração dos colmos com e sem diafragma, nota-se que existe um aumento nela, produzido pela redução de massa e de rigidez do sistema com a retirada do diafragma dos colmos.

#### 4.5.2.1.1.

##### Cálculo numérico das freqüências naturais de vibração

Para fazer uma comprovação dos valores obtidos experimentalmente das freqüências naturais de vibração, para os colmos é realizado o cálculo numérico, através do programa SAP 2000<sup>®</sup>, onde são usados os valores de propriedades físicas e mecânicas para o segmento inteiro, definidos na Tabela 4.7. Os resultados obtidos no cálculo numérico são apresentados na Tabela 4.11 e no Apêndice B se mostra o código usado no programa.

CORPO DE PROVA	COM DIAFRAGMA $f_o$ (Hz)	SEM DIAFRAGMA $f_o$ (Hz)
DG	357.35	357.58
PA	143.72	143.72

Tabela 4.11 - Frequências naturais obtidas numericamente para os colmos de 1.00m de comprimento

As Figuras 4-19 e 4-20 apresentam a comparação dos resultados obtidos experimentalmente e numericamente para a frequência natural de vibração dos colmos da espécie DG e PA respectivamente; nas figuras o valor experimental para PA corresponde à média dos valores encontrados para as cinco variações estudadas. As diferenças encontradas entre os resultados numéricos com respeito aos experimentais se devem a que na análise numérica só foi levada em conta uma única distribuição dos diafragmas, quando na realidade os colmos ensaiados tinham distribuições diferentes; além disso, no cálculo numérico o diafragma foi modelado com as mesmas propriedades físicas e mecânicas do colmo, e é impossível levar em conta a umidade própria do colmo e as variações na sua estrutura devidas a presença de fungos (espécie DG).

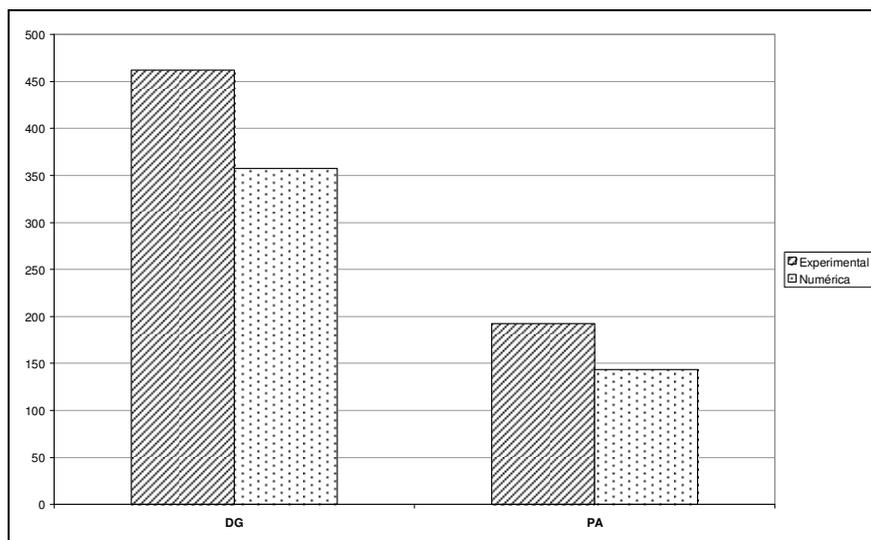


Figura 4-19 - Comparação dos resultados experimentais e numéricos para a frequência natural de vibração dos colmos com diafragma

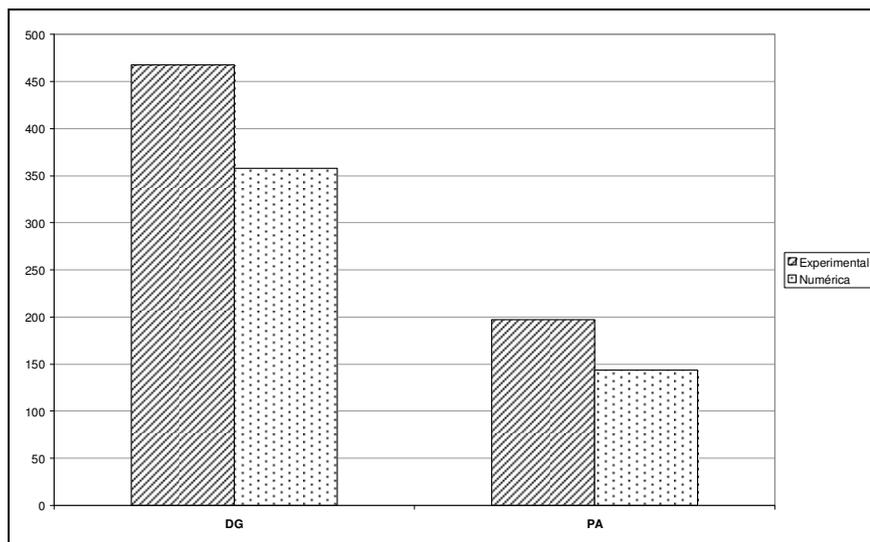


Figura 4-20 - Comparação dos resultados experimentais e numéricos para a frequência natural de vibração dos colmos sem diafragma

#### 4.5.2.2. Bambu suspenso por fios de nylon

A Figura 4-21 e 4-22 apresentam a FRF média obtidas a partir das medições feitas nos 12 pontos de colmos de 0.33 m e 0.20 m das espécies DG e PA respectivamente.

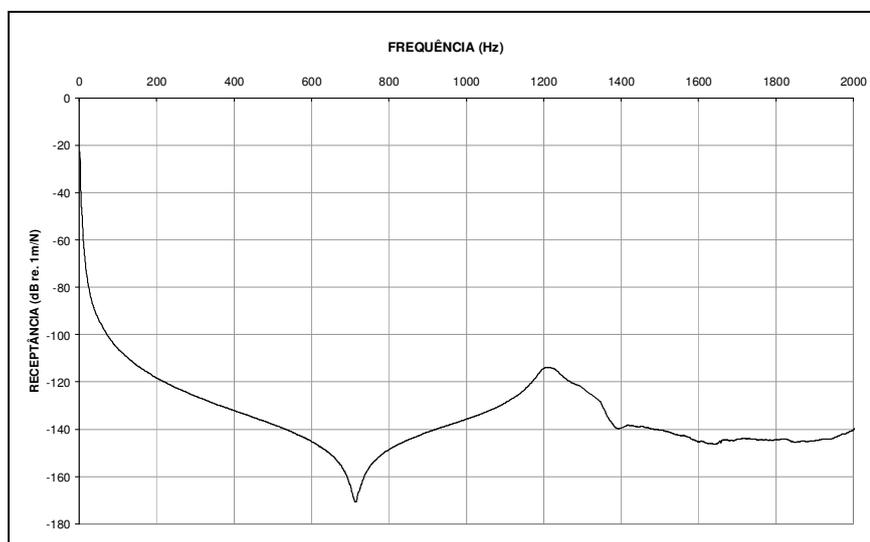


Figura 4-21 - FRF média para colmo de 0.33 m de comprimento DG-02, primeiro teste

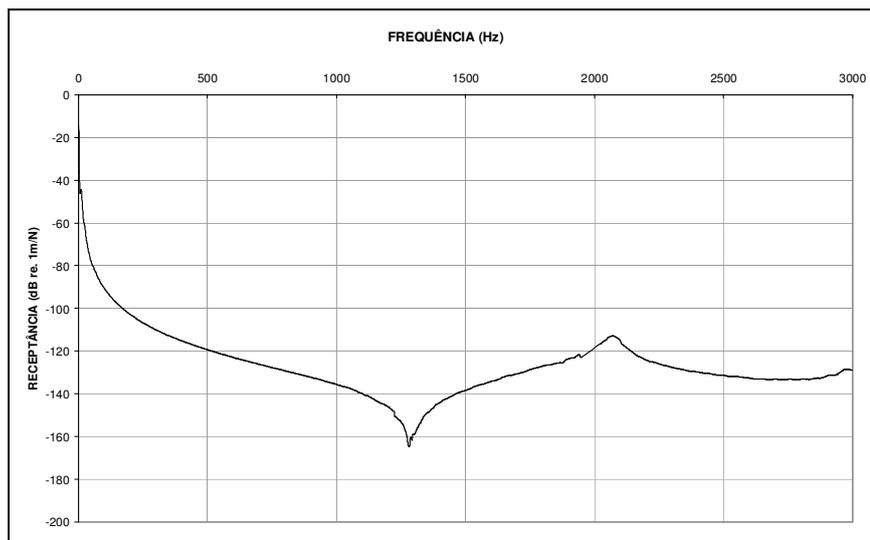


Figura 4-22 - FRF média para colmo de 0.20 m de comprimento PAST07A-01, primeiro teste

A Tabela 4.12 apresenta os resultados obtidos para coeficiente de amortecimento e frequências naturais de vibração para colmos suspensos por fios de nylon das espécies de bambu estudadas; os resultados correspondem à média de 6 ensaios.

CORPO DE PROVA	$\xi$ (%)	DESVIO PADRÃO	$f_o$ (Hz)	DESVIO PADRÃO
DG	1.56	0.050	1202.63	34.408
PAST0A	1.32	0.094	1451.91	145.028
PAST1A	1.14	0.060	1565.13	49.602
PAST7A	0.95	0.097	1966.24	113.737
PACT0A	1.09	0.064	2819.18	50.037
PACT1A	1.13	0.059	1643.40	176.526

Tabela 4.12 - Coeficientes de amortecimento e frequência natural de vibração para colmos suspensos por fios de nylon

Coelho (2005) encontrou o valor do coeficiente de amortecimento para colmos de 0.33 m de comprimento da espécie DG como sendo  $\xi = 1.89\%$  e para PA  $\xi = 1.05\%$  e da frequência natural de vibração de  $f_o = 2890.99\text{Hz}$  e  $f_o = 856.90\text{Hz}$  para a espécie DG e PA respectivamente que correspondem a um ensaio só. A diferença dos valores de  $\xi$  e  $f_o$  dos colmos da espécie DG obtido na presente pesquisa com respeito ao valor obtido por Coelho (2005) deve-se a presença de fungo no material ensaiado, possíveis variações nas seções transversais e longitudinais dos colmos, teores de umidade e a diferença de módulos de elasticidade dos materiais usados nas duas pesquisas.

O valor obtido da frequência natural de vibração para colmos de 0.33 m de comprimento da espécie PA por Coelho (2005) é 55% menor quando comparado com o valor médio de  $f_o$  de todas as variações estudadas da mesma espécie na presente pesquisa, devendo-se a diferença no comprimento dos colmos o que traz um aumento na massa do sistema e por tanto diminui a frequência de vibração; além disso existem variações nos módulos de elasticidade dos materiais ensaiados nas duas pesquisas.

Comparando os valores obtidos de  $\xi$  para os colmos das variações PAST0A, PAST1A e PAST7A, observa-se que o valor do coeficiente de amortecimento diminui com o tempo de armazenamento podendo ser causado pela estabilização da lignina com o tempo; este comportamento também é observado nos resultados obtidos nos testes em vibração livre de segmentos em balanço e nos testes modais de colmos apoiados sobre esponjas. A Figura 4-23 mostra a variação do  $\xi$  em função do tempo de armazenamento para os colmos com e sem diafragma de PAST0A, PAST1A e PAST7A. O resultado obtido por Coelho (2005) concorda com os resultados obtidos neste trabalho, pois nessa pesquisa os colmos tinham 4 anos de armazenamento, sendo o valor do seu  $\xi$  intermediário aos obtidos para PAST1A e PAST7A.

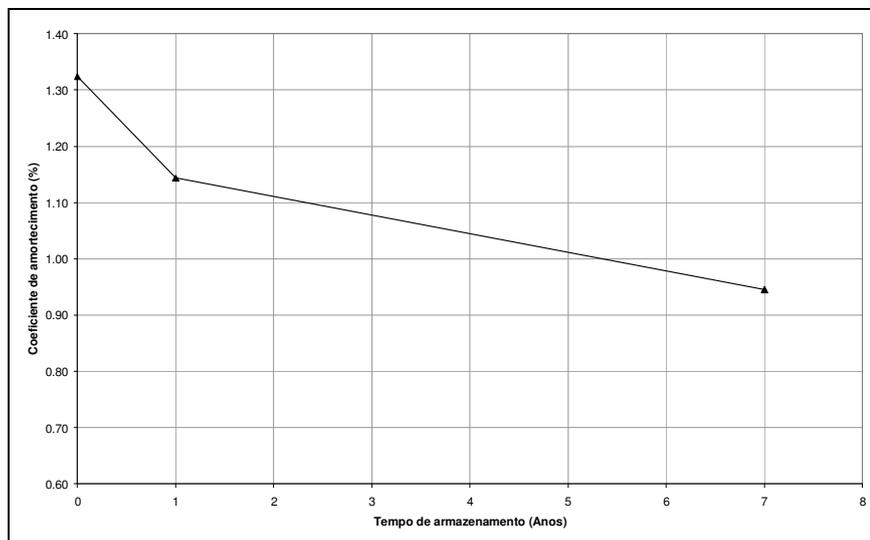


Figura 4-23 - Variação do  $\xi$  em função do tempo de armazenamento para colmos de 0.33m de comprimento de PAST0A, PAST1A e PAST7A

Os valores obtidos para o coeficiente de amortecimento dos colmos de PACT0A mostram que existe uma redução 17% quando comparados com os valores obtidos para PAST0A, porque o tratamento usado nestes colmos reduz sua umidade e também queima suas fibras externas, diminuindo a sua

capacidade de dissipar energia. Comparando os valores obtidos para PACT1A e PAST1A a redução é de 2%.

#### 4.5.2.2.1. Cálculo numérico das freqüências naturais de vibração

Para fazer uma comprovação dos valores obtidos experimentalmente das freqüências naturais de vibração para os colmos é realizado o cálculo numérico, através do programa SAP 2000®, onde são usados os valores de propriedades físicas e mecânicas para o segmento inteiro, definidos na Tabela 4.7. Os resultados obtidos no calculo numérico são apresentados na Tabela 4.13 e no Apêndice B se mostra o código usado no programa.

CORPO DE PROVA	$f_o$ (Hz)
DG	1430.20
PA	1625.20

Tabela 4.13 - Freqüências naturais obtidas numericamente

A Figura 4-24 apresenta a comparação dos resultados obtidos experimentalmente e numericamente para a freqüência natural de vibração dos colmos da espécie DG e PA respectivamente; nas figuras o valor experimental para PA corresponde à média dos valores encontrados para as cinco variações estudadas. As diferenças encontradas entre os resultados numéricos com respeito aos experimentais devem-se a que a análise numérica é feita com um diâmetro médio sem levar em conta as variações existentes entre os colmos ensaiados; além disso, numericamente é impossível introduzir as variações na estrutura dos colmos devidas a presença de fungos (espécie DG).

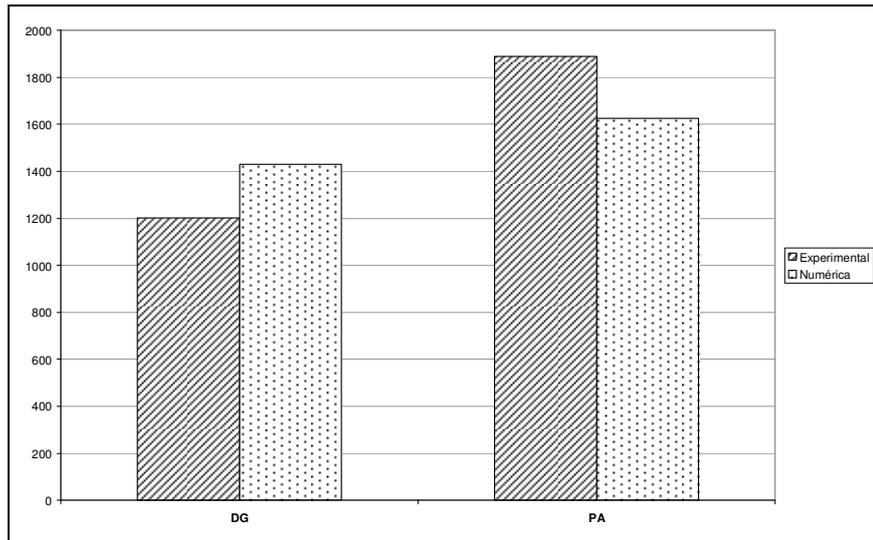


Figura 4-24 - Comparação dos resultados experimentais e numéricos para a frequência natural de vibração para colmos suspensos por fios de nylon