

## 4.

### Apresentação e análise dos resultados

#### 4.1.

##### Introdução

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios mostrados no capítulo 3.

#### 4.2.

##### Massa Específica

Os resultados de massa específica para as três espécies estudadas, *Dendrocalamus giganteus*, *Phyllostachys aurea* e *Guadua angustifolia* são apresentados nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3, respectivamente. A seção transversal do bambu foi dividida em 4 partes para as espécies *Dendrocalamus giganteus* e *Guadua angustifolia* e 2 partes para a espécie *Phyllostachys aurea*, onde CP1 é a parte interior e CP2 a exterior.

Tabela 4.1 – Valores médios de massa específica de cada corpo de prova e a média da espécie *Dendrocalamus giganteus*.

Corpo de Prova	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )
CP 1	626
CP 2	666
CP 3	744
CP 4	924
Média	740

Tabela 4.2 – Valores médios de massa específica de cada corpo de prova e a média da espécie *Phyllostachys aurea*.

Corpo de Prova	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )
CP 1	686
CP 2	930
Média	808

Tabela 4.3 – Valores médios de massa específica de cada corpo de prova e a média da espécie *Guadua angustifolia*.

Corpo de Prova	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )
CP 1	600
CP 2	610
CP 3	759
CP 4	989
Média	740

Os resultados mostram que a massa específica varia de acordo com a concentração das fibras, já que os CP 1 são os corpos de prova que apresentam as menores concentrações de fibras e os CP 4 apresentam maior concentração de fibras. Sendo que quanto maior a concentração de fibras, o corpo de prova apresenta, maior a massa específica.

Os dados encontrados sobre massa específica na literatura foram de CULZONI (1986) da espécie *Dendrocalamus giganteus* que apresenta um valor de 860 kg/m<sup>3</sup> para base de bambu. O ensaio realizado por CULZONI não levou em consideração a concentração de fibras como neste.

Para a espécie *Phyllostachys aurea*, XAVIER (2003) encontrou valores de 627 kg/m<sup>3</sup>, mas a determinação da massa específica foi baseada na norma NBR 7190/97, da ABNT (1997) – Projeto de estrutura de madeira, que apresenta algumas diferenças, pois o volume considerado neste caso é o volume saturado das amostras.

#### 4.3.

#### Módulo de elasticidade à flexão e coeficiente de Poisson

Foram realizados em duas amostras de cada espécie conforme apresentado no item 3.3, sendo que a legenda significa: DG é *Dendrocalamus giganteus*, PA é *Phyllostachys aurea* e GA é *Guadua angustifolia*. A deformação superior longitudinal é representada por SL e a deformação superior transversal é representada por ST. A deformação inferior longitudinal é IL e a deformação inferior transversal é IT.

As curvas tensão-deformação obtidas a partir do ensaio dos segmentos de bambu são apresentadas na Figura 4.1.

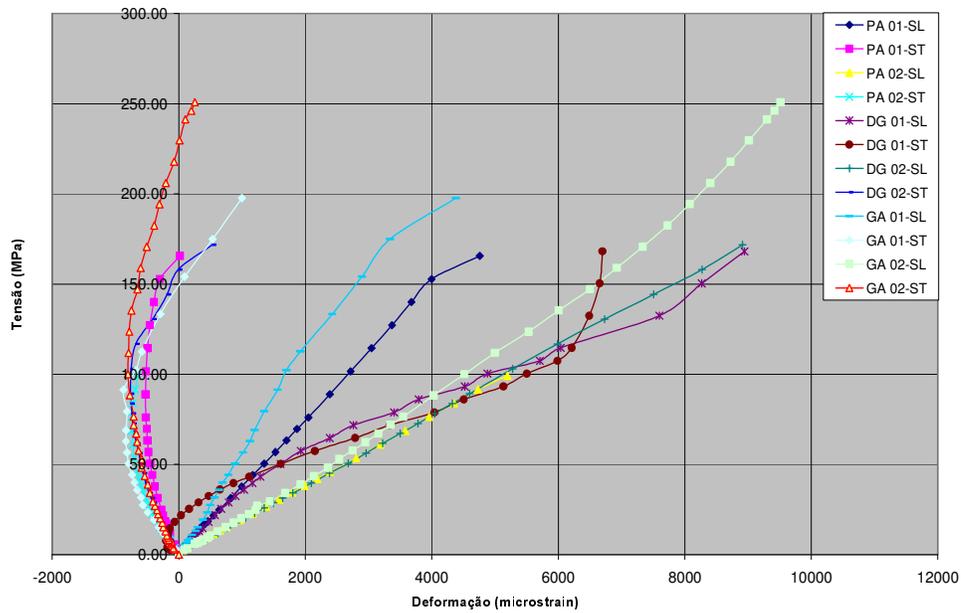


Figura 4.1 – Curvas tensão-deformação superiores obtidas durante o ensaio nos segmentos de bambu.

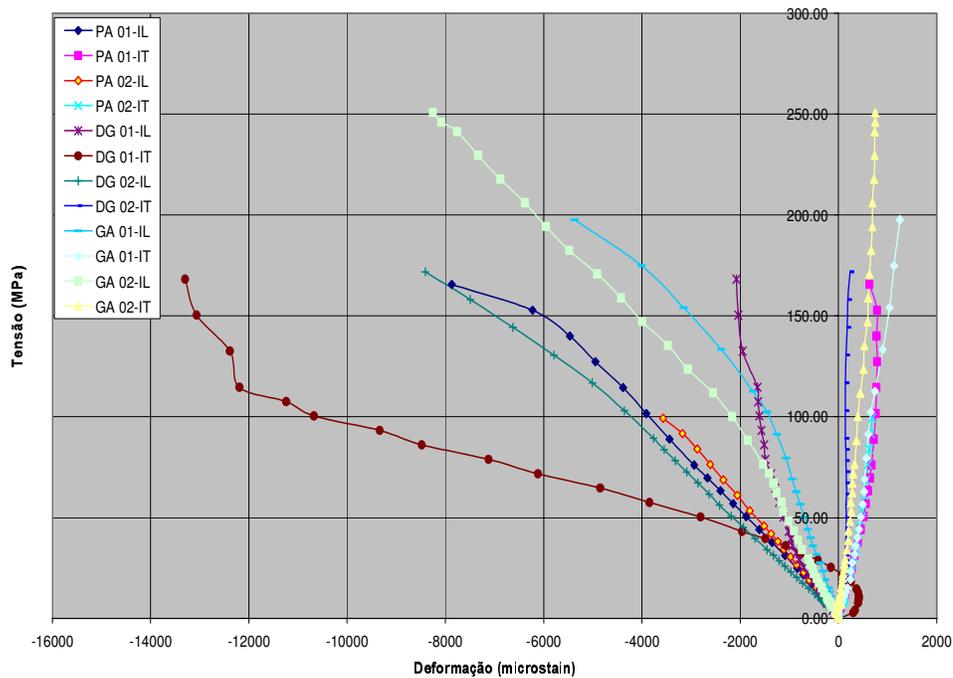


Figura 4.2 – Curvas tensão-deformação inferiores obtidas durante o ensaio nos segmentos de bambu.

Como alguns resultados não apresentavam coerência, pode ter ocorrido o descolamento do strain gage durante o ensaio ou este não foi colado

exatamente a  $90^\circ$  graus. Então foram considerados somente os valores coerentes e somente até o limite de proporcionalidade, sendo posteriormente calculada a média aritmética desses valores. Esses coeficientes de Poisson calculados são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Valores médios do coeficiente de Poisson das espécies estudadas.

Espécie	$\nu$
<i>Dendrocalamus giganteus</i>	0,24
<i>Phyllostachys aurea</i>	0,34
<i>Guadua angustifolia</i>	0,23

O gráfico de carga-deslocamento das espécies estudadas é apresentado na Figura 4.3.

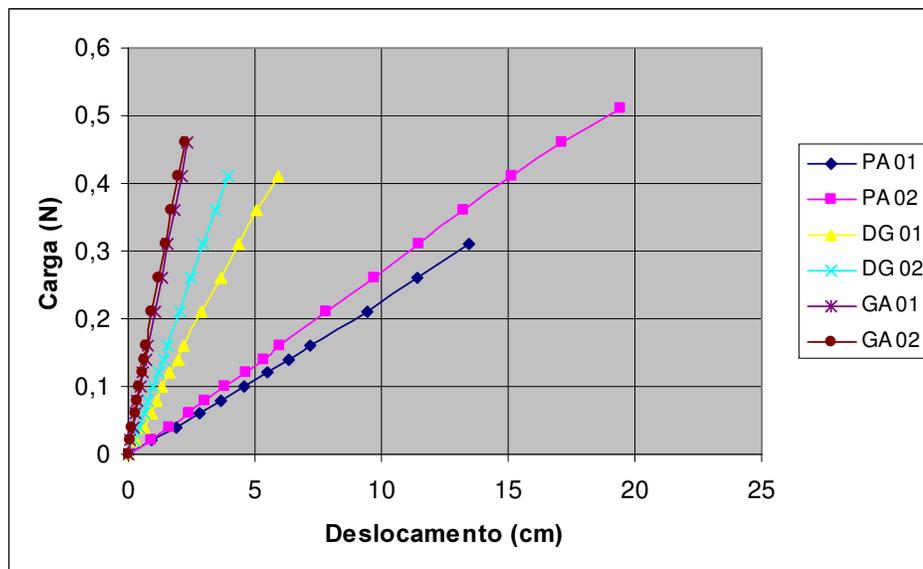


Figura 4.3 – Gráfico de carga -deslocamento das espécies estudadas.

O módulo de elasticidade foi calculado pela equação (3.3). Os valores dos módulos de elasticidade obtidos são apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Módulos de elasticidade à flexão das espécies estudadas.

Espécies	$E_f$ (GPa)
<i>Dendrocalamus giganteus</i>	7,19
<i>Phyllostachys aurea</i>	10,84
<i>Guadua angustifolia</i>	11,54

CULZONI (1986) encontrou para o módulo de elasticidade à flexão de base de *Dendrocalamus giganteus* o valor de 10,57 GPa em ensaios de flexão simples em três pontos.

#### 4.4.

#### Fator de amortecimento e frequência natural

##### 4.4.1.

##### Via ensaio direto

Neste experimento são realizados três testes em cada um dos oito segmentos de cada espécie de bambu utilizados. Obteve-se neste experimento a resposta no domínio do tempo e no domínio da frequência.

Submetendo-se o segmento a uma condição inicial de deslocamento, no domínio do tempo o sinal captado pelo acelerômetro foi obtido, conforme mostrado na Figura 4.4, que é um exemplo de resposta no domínio do tempo.

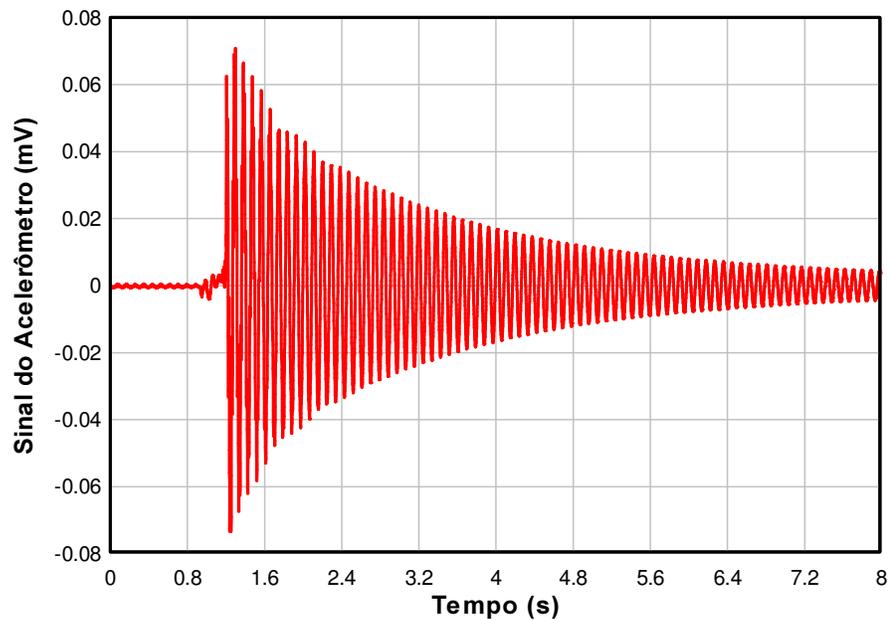


Figura 4.4 – Resposta no domínio do tempo do primeiro teste realizado no terceiro segmento da espécie *Guadua angustifolia*.

Nota-se que a condição inicial foi realizada em aproximadamente  $t \cong 1.2s$ . Até esse instante o sinal de resposta deveria ser uma linha reta em

zero, mas o acelerômetro captou algum ruído causado pela vibração de outra coisa que não a do segmento. Para obter o fator de amortecimento do sistema ( $\xi$ ) aplica-se o método do decremento logarítmico. Obtendo o decremento logarítmico para cada período, calcula-se a média dos decrementos.

Aplica-se a mesma condição inicial de deslocamento no segmento e no domínio da frequência. O sinal do acelerômetro é captado, conforme mostra a Figura 4.5, que é um exemplo de resposta no domínio da frequência.

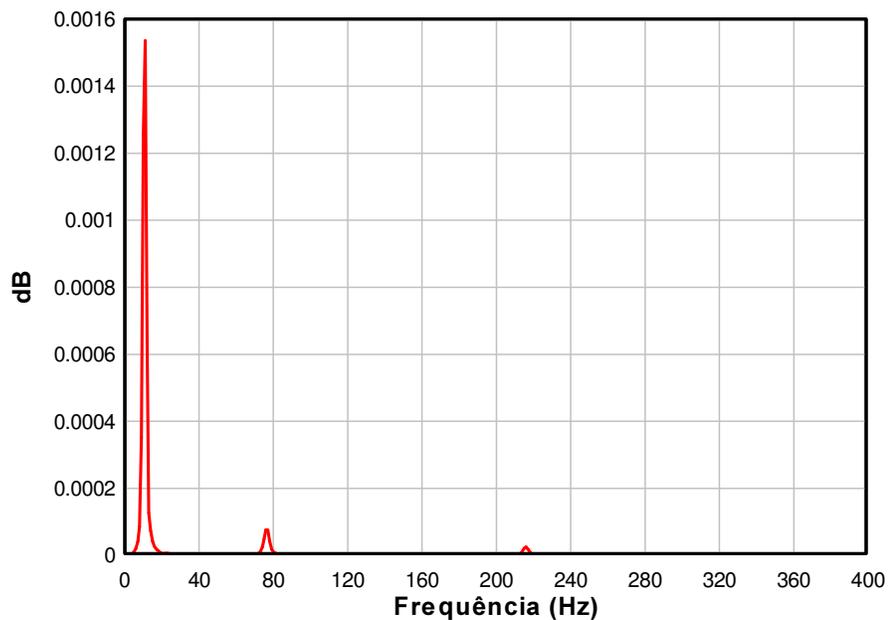


Figura 4.5 – Resposta no domínio da frequência do primeiro teste realizado no terceiro segmento da espécie *Guadua angustifolia*.

Nota-se que neste caso, a primeira frequência natural do segmento é  $f_1 = 11$  Hz e a segunda frequência natural é  $f_2 = 76$  Hz.

Os resultados de fatores de amortecimento e frequências naturais ( $f$ ) são apresentados na Tabela 4.6. Os resultados são uma média aritmética. Somente foi possível obter a primeira e a segunda frequência natural. As frequências referentes ao primeiro modo de vibração são representadas por  $f_1$  e as referentes ao segundo modo são representadas por  $f_2$ .

Tabela 4.6 – Valores médios do fator de amortecimento e frequência natural das espécies de bambu.

Espécie	$f_1$ (Hz)	$f_2$ (Hz)	$\xi$ (%)
<i>Dendrocalamus giganteus</i>	8,0	53,95	1,518
<i>Phyllostachys aurea</i>	9,5	69,47	1,322
<i>Guadua angustifolia</i>	11,25	76,50	0,989

Os resultados de fator de amortecimento e frequência natural apresentados são referentes aos sistemas utilizados.

Como comparação, o mesmo experimento foi realizado em segmentos de aço e alumínio. Os segmentos de aço e de alumínio apresentavam as mesmas dimensões dos segmentos de bambu. Os valores de fator de amortecimento encontrados são a média aritmética de três ensaios realizados em cada amostra. Os resultados são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Resultado do amortecimento e frequência natural dos segmentos de aço e alumínio.

Material	f (Hz)	$\xi$ (%)
Aço	20,5	0,332
Alumínio	12,5	0,899

Comparando-se os resultados das espécies de bambu com os outros materiais observa-se que o amortecimento é maior e frequência natural menor, que era o esperado.

Comparando-se os valores de fator de amortecimento encontrados, com os valores apresentados por GHAVAMI et. al. (2002) que para o Espécime 1 é 0,5895 % e para o Espécime 2 é 0,5112 % , pode-se notar que os fatores de amortecimento apresentados neste trabalho são maiores. Isso pode ter acontecido devido à diferença entre os comprimentos dos segmentos analisados, o que pode influenciar nos valores do fator de amortecimento devido ao não-linearidade do bambu. Assim, é provável que tenha havido a falta de cuidado durante o ensaio, já que o ensaio realizado para a apresentação daquele trabalho foi muito rápido e realizado em somente duas amostras.

#### 4.4.1.1.

##### **Módulo de elasticidade dinâmico**

Obtidas as frequências naturais experimentais podemos fazer o cálculo do Módulo de Elasticidade dinâmico para a primeira frequência natural, obtido

através da equação (4.2) da teoria de vibrações transversais de vigas, para vigas em balanço.

$$E_d = \frac{3,1935f^2L^4\rho A}{I} \quad (4.2)$$

Onde:

$E_d$  = módulo de elasticidade dinâmico

$f$  = frequência natural

$L$  = comprimento

$M_{eb}$  = massa específica

$A$  = seção transversal

$I$  = momento de inércia

Os módulos de elasticidade dinâmicos são apresentados na Tabela 4.8:

Tabela 4.8 – Módulos de Elasticidade dinâmicos obtidos a partir das frequências naturais.

Espécie	$E_d$ (GPa)
<i>Dendrocalamus giganteus</i>	8,28
<i>Phyllostachys aurea</i>	9,87
<i>Guadua angustifolia</i>	10,81

Comparando-se os valores dos módulos de elasticidade dinâmicos com os módulos de elasticidade à flexão obtidos no item 4.3 observa-se que os valores apresentam uma boa aproximação,

#### 4.4.1.2.

##### **Frequências naturais**

Para fazer uma comparação dos valores das frequências naturais encontradas experimentalmente foi realizado um cálculo analítico, através do programa Mathcad 2001 e um cálculo numérico, através do programa ANSYS 8.0 para obtenção das frequências naturais.

Nos cálculos analíticos e numéricos foram utilizados os valores de coeficiente de Poisson, massa específica e módulo de elasticidade à flexão, encontrados neste trabalho.

As frequências naturais foram obtidas analiticamente através das equações da teoria de vibrações transversais de vigas. O cálculo analítico é apresentado no Apêndice A. Os valores são apresentados na Tabela 4.9. A

tabela mostra os modos e as freqüências naturais de vibração para os segmentos DG (*Dendrocalamus giganteus*), PA (*Phyllostachys aurea*) e GA (*Guadua angustifolia*).

Tabela 4.9 – Freqüências naturais obtidas analiticamente.

Modos de vibração da viga	Freqüências naturais (Hz)		
	DG	PA	GA
1° modo	8,88	10,43	11,25
2° modo	55,62	65,36	70,47
3° modo	155,75	183,01	197,32

A Figura 4.6 mostra o modelo de elementos finitos utilizado para discretizar o segmento e os dados necessários para a solução do problema. O cálculo numérico é apresentado no Apêndice B.

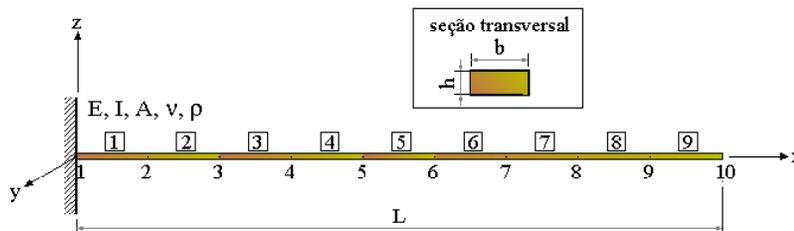


Figura 4.6 - Representação do modelo de elementos finitos utilizado para a viga em estudo

As freqüências naturais obtidas através do programa ANSYS 8.0 são apresentadas na Tabela 4.10. Foi obedecida à mesma nomenclatura utilizada no cálculo analítico.

Tabela 4.10 – Freqüências naturais obtidas numericamente.

Modos de vibração da viga	Freqüências naturais (Hz)		
	DG	PA	GA
1° modo	8,96	10,53	11,35
2° modo	56,17	65,99	71,15
3° modo	157,29	184,83	199,27

Observa-se que os valores de freqüências naturais obtidas numericamente e analiticamente são muito próximos para as freqüências naturais referentes a cada modo.

**Comparação de resultados (Analítico, Numérico e Experimental)**  
 freqüências naturais de vibração (modos) da viga em balanço

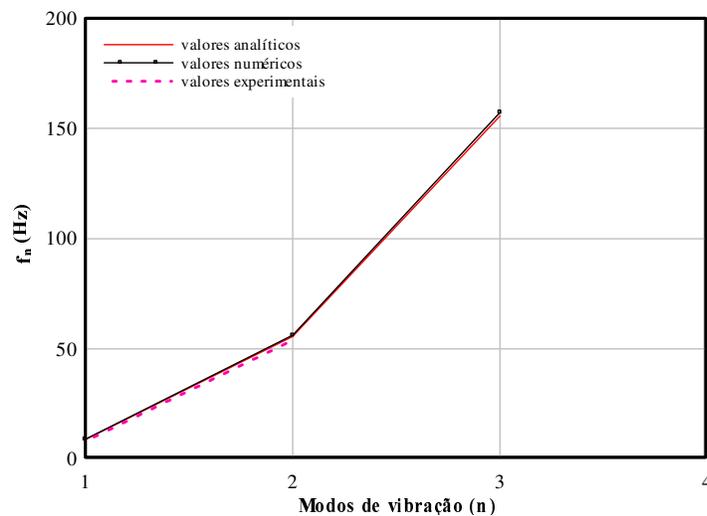


Figura 4.7– Comparação entre os resultados das freqüências naturais da espécie *Dendrocalamus giganteus*.

**Comparação de resultados (Analítico, Numérico e Experimental)**  
 freqüências naturais de vibração (modos) da viga em balanço

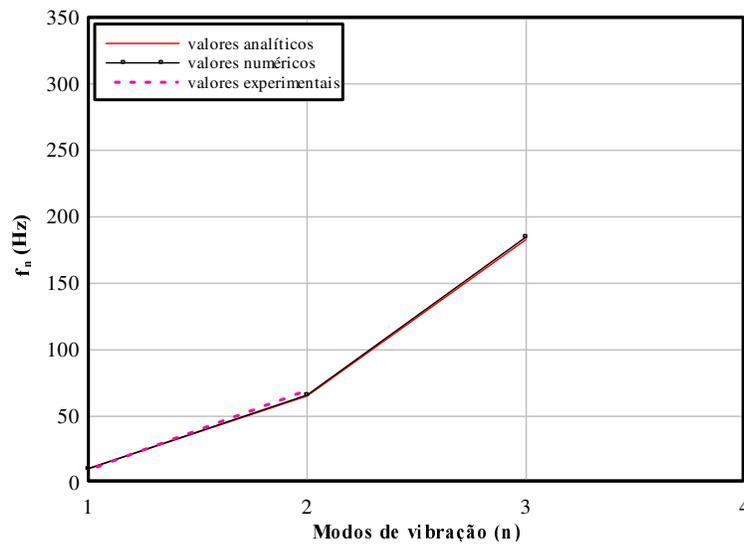


Figura 4.8 – Comparação entre os resultados das freqüências naturais da espécie *Phyllostachys aurea*.

**Comparação de resultados (Analítico, Numérico e Experimental)**  
 freqüências naturais de vibração (modos) da viga em balanço

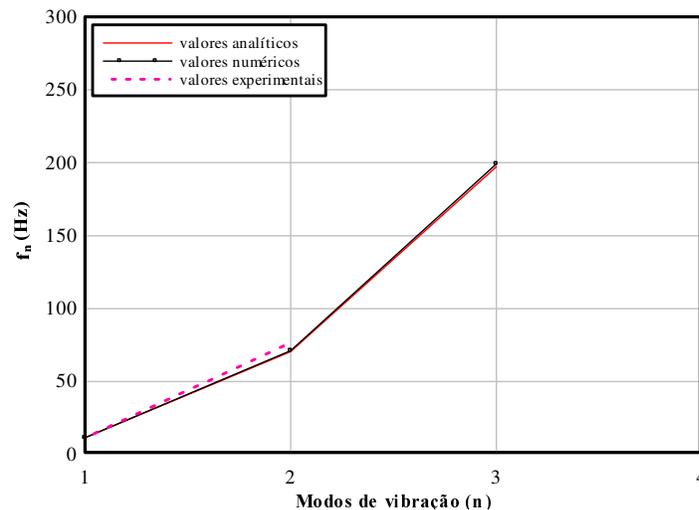


Figura 4.9 – Comparação entre os resultados das freqüências naturais da espécie *Guadua angustifolia*.

Comparando-se os resultados analíticos e numéricos com os resultados experimentais nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9, nota-se que os valores são todos próximos.

#### 4.4.2.

##### Via análise modal

Os ensaios foram realizados conforme descrito no Capítulo 3 – Métodos e materiais, depois de obtidas as FRF Pontual e de Transferência que estão no domínio da frequência, foi utilizado o programa Test.lab para obter as frequências naturais, fatores de amortecimento e modos de vibração dos bambus.

O programa Test.lab utiliza o método da Exponencial Complexa, que atua no domínio do tempo, para a extração modal. O programa faz uma combinação de todas as FRF obtidas somando a influência de cada uma na solução geral.

O objetivo principal é obter as frequências naturais referentes ao primeiro modo de vibração à flexão e os respectivos fatores de amortecimento.

##### 4.4.2.1.

##### Condição de contorno 1

Os valores das frequências naturais e fator de amortecimento das amostras de bambu com comprimentos de 0.33 metros são apresentados nas Tabelas 4.11, 4.12 e 4.13. As frequências naturais e fatores de amortecimento estão relacionados a cada modo de vibração. Para cada espécie foram ensaiadas três amostras. Sendo que a GA é da espécie *Guadua angustifolia* a DG é da espécie *Dendrocalamus giganteus* e a PA é espécie *Phyllostachys aurea*. As Figuras 4.10 a 4.18 ilustram os modos de vibração encontrados para cada espécie. Os modos de vibração gerados pelo programas estão numerados de acordo com as frequências naturais encontradas para cada amostra depois de feita a combinação de todas as FRF. Com este tipo de apoio não se restringe a vibração de corpo rígido. Vários modos de vibração estão relacionados a este modo de vibrar.

Tabela 4.11 – Resultados das frequências naturais e fatores de amortecimento da espécie *Guadua angustifolia*.

Modos de Vibração (n)	GA					
	1ª Amostra		2ª Amostra		3ª Amostra	
	f (Hz)	$\xi_r$ (%)	f (Hz)	$\xi_r$ (%)	f (Hz)	$\xi_r$ (%)
1	744,73	2,16	794,24	2,15	812,29	1,58
2	814,47	1,95	1119,60	1,92	1475,58	1,87
3	1910,67	1,96	2027,98	2,09	2110,11	2,35
4	2225,94	1,47	2494,67	3,51	2580,89	1,99
5	2991,84	2,02	2705,76	1,93	2832,17	2,19
6	-	-	3000,45	1,60	2908,98	1,18

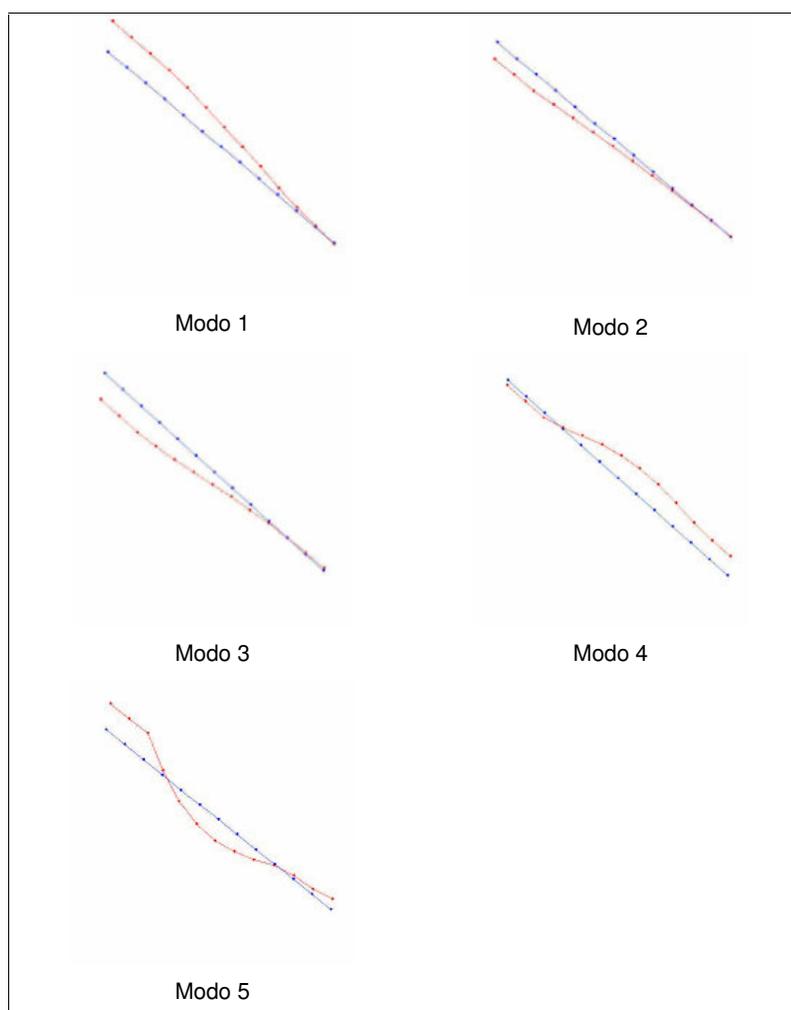


Figura 4.10 – Modos de vibração da espécie *Guadua angustifolia* 1ª Amostra.

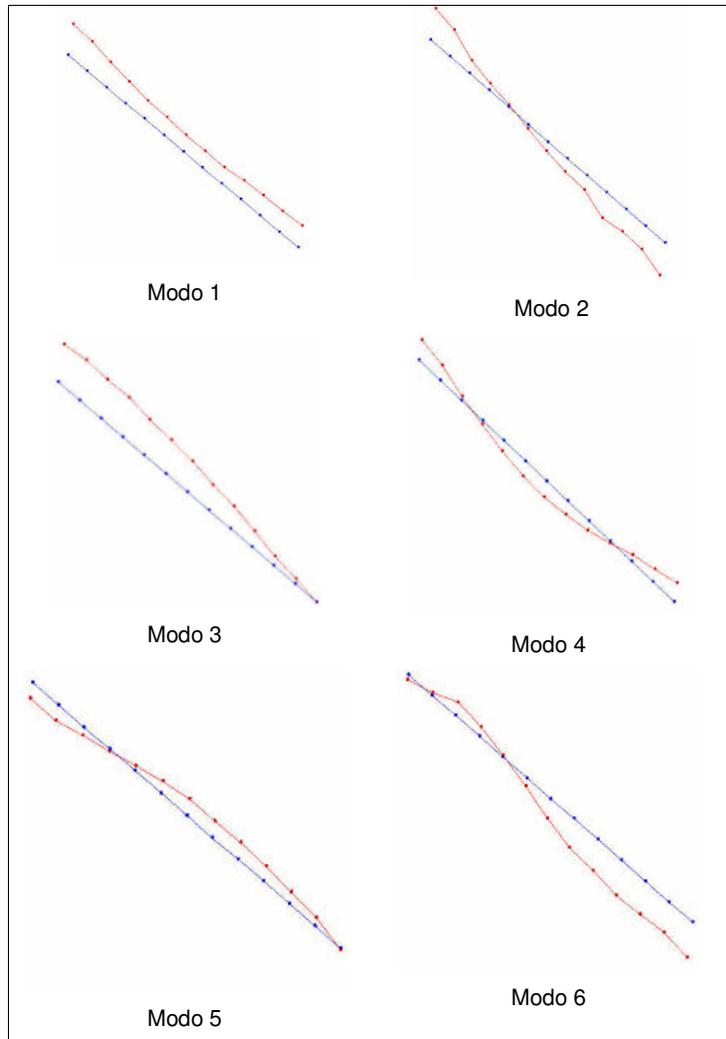


Figura 4.11 – Modos de vibração da espécie *Guadua angustifolia* 2ª Amostra.

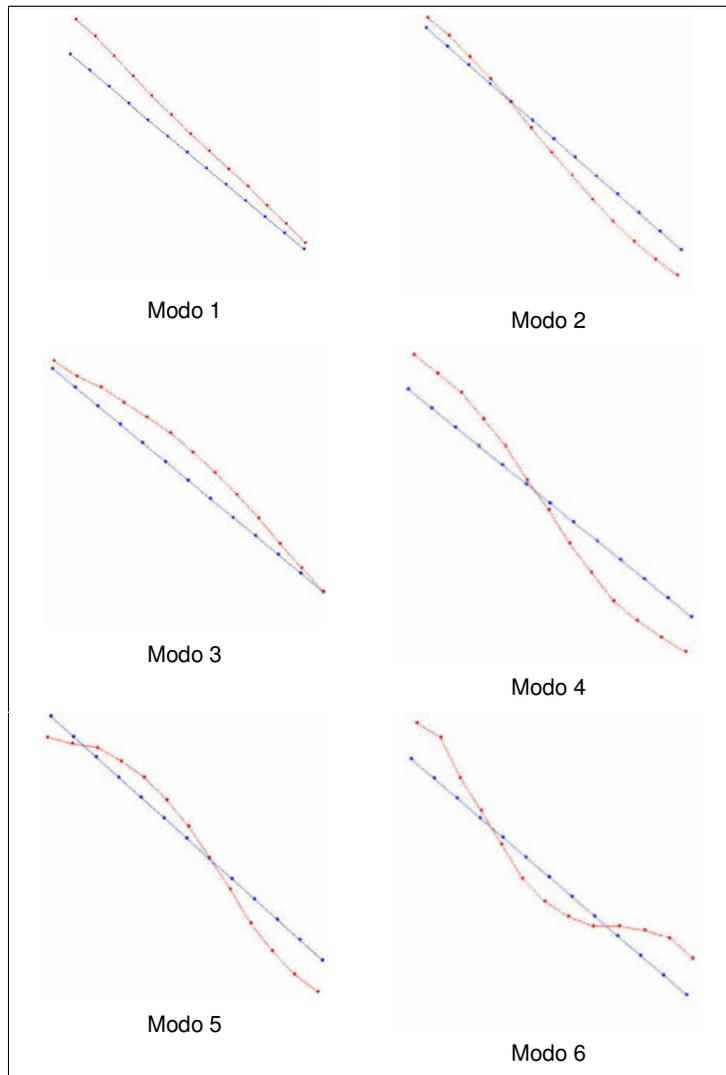


Figura 4.12 – Modos de vibração da espécie *Guadua angustifolia* 3ª Amostra.

Tabela 4.12 – Resultados das frequências naturais e fatores de amortecimento da espécie *Dendrocalamus giganteus*.

Modos de Vibração (n)	2ª amostra					
	1º Amostra		2º Amostra		3º Amostra	
	f (Hz)	$\xi_r$ (%)	f (Hz)	$\xi_r$ (%)	f (Hz)	$\xi_r$ (%)
1	964,41	2,0200	1029,87	1,86	1008,47	1,96
2	1152,69	1,90	2612,55	1,91	2001,59	1,55
3	2890,99	1,89	2851,83	1,48	2610,78	2,05
4	2958,83	1,17	-	-	-	-

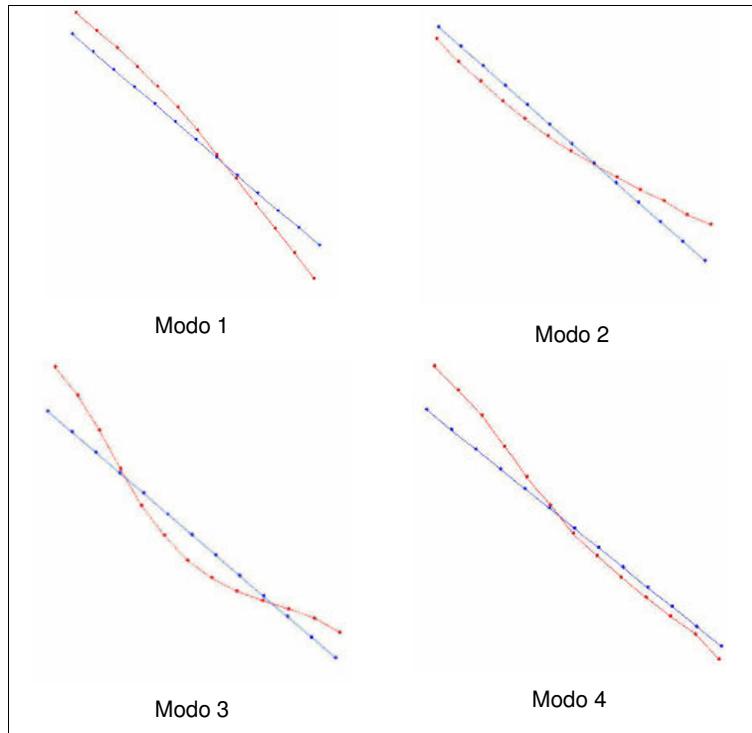


Figura 4.13 – Modos de vibração da espécie *Dendrocalamus giganteus* 1ª Amostra.

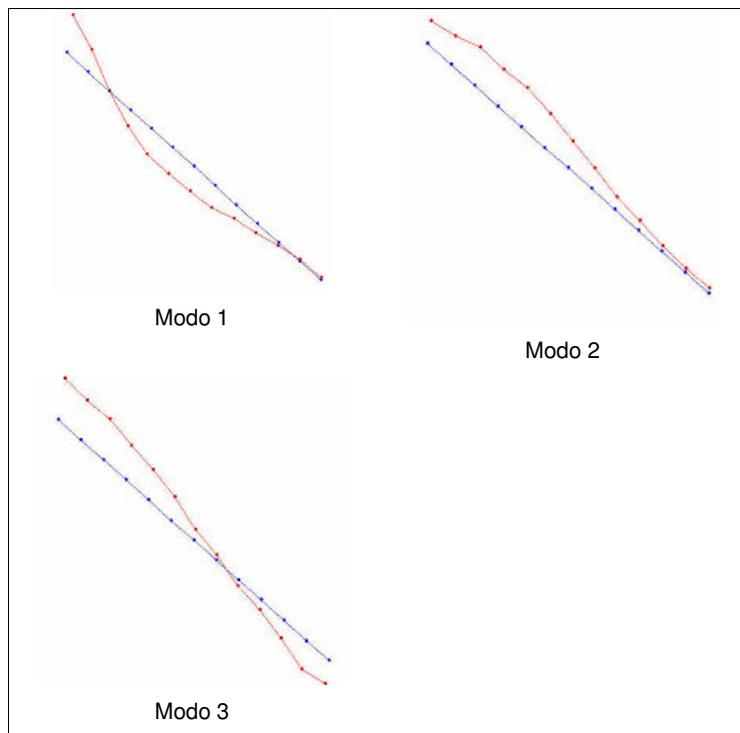


Figura 4.14 – Modos de vibração da espécie *Dendrocalamus giganteus* 2ª Amostra.

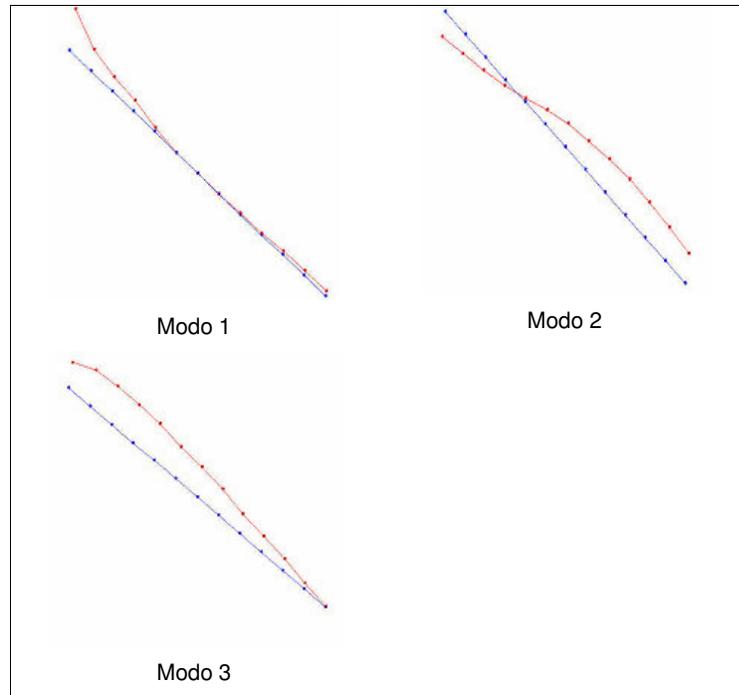


Figura 4.15 – Modos de vibração da espécie *Dendrocalamus giganteus* 3ª Amostra.

Tabela 4.13 – Resultados das frequências naturais e fatores de amortecimento da espécie *Phyllostachys aurea*.

Modos de Vibração (n)	PA					
	1º Amostra		2º Amostra		3º Amostra	
	f (Hz)	$\xi_r$ (%)	f (Hz)	$\xi_r$ (%)	f (Hz)	$\xi_r$ (%)
1	557,18	13,98	633,29	6,34	856,90	1,05
2	816,50	1,43	842,40	1,12	1073,60	1,54
3	1001,22	1,97	1095,44	1,05	1185,15	1,37
4	1386,99	1,32	1436,17	1,12	1517,84	1,14

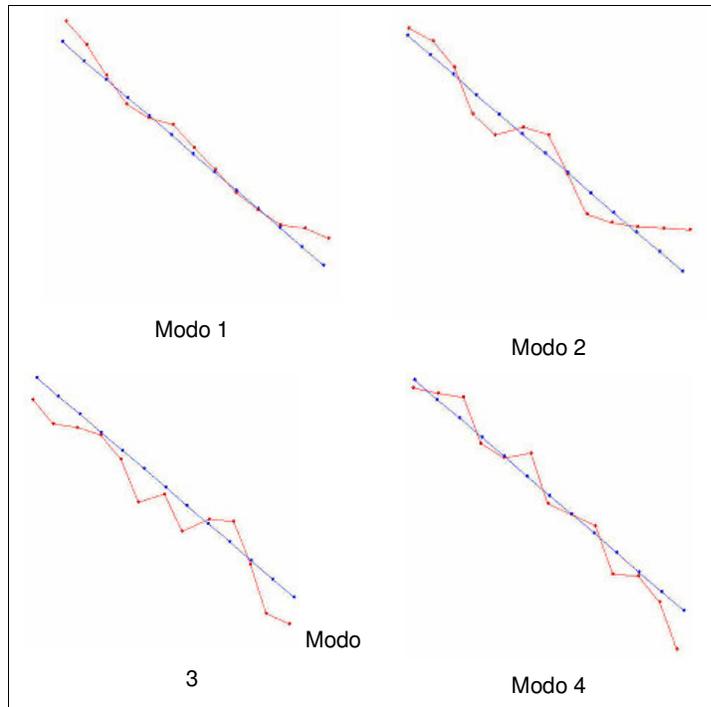


Figura 4.16 – Modos de vibração da espécie *Phyllostachys aurea* 1ª Amostra.

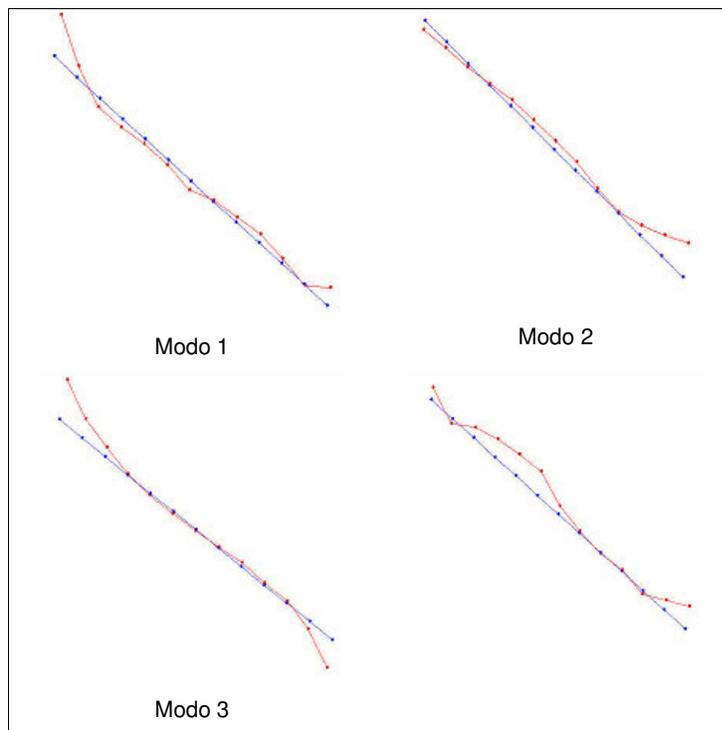


Figura 4.17 – Modos de vibração da espécie *Phyllostachys aurea* 2ª Amostra.

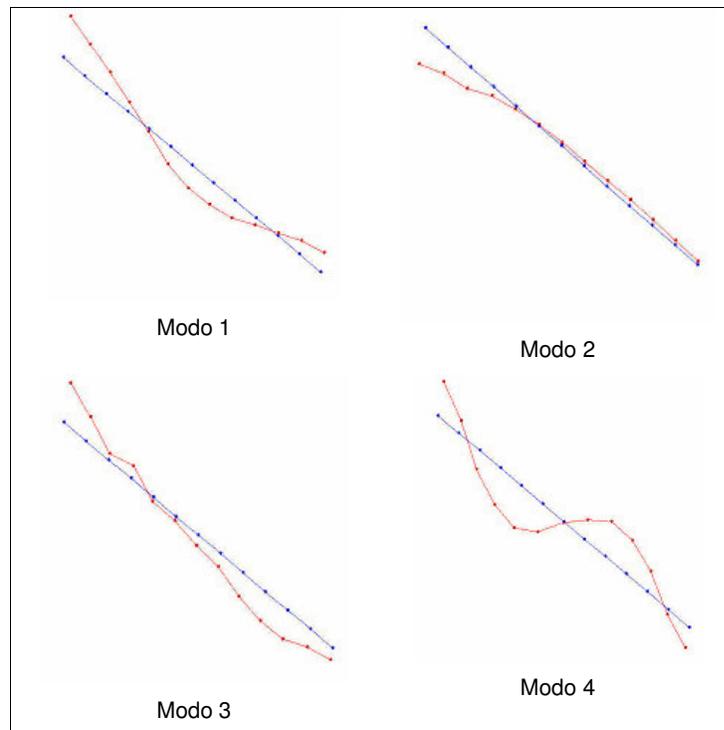


Figura 4.18 – Modos de vibração da espécie *Phyllostachys aurea* 3ª Amostra.

Nota-se que a uma boa quantidade de modos de vibração são referentes ao movimento de corpo rígido, como Translações e Rotações em torno dos eixos, mas só o que interessa são as vibrações do primeiro modo de vibração à flexão.

As Tabelas 4.14, 4.15 e 4.16 mostram as freqüências naturais e fatores de amortecimento encontrados.

Tabela 4.14 – Freqüências naturais e fatores de amortecimento do primeiro modo de vibração à flexão da espécie *Guadua angustifolia*.

Amostra	f (Hz)	$\xi$ (%)	Modo que foi extraído
GA – 1ª Amostra	2991,84	2,02	5
GA – 2ª Amostra	2494,64	3,51	4
GA – 3ª Amostra	2908,98	1,18	6

Tabela 4.15 – Freqüências naturais e fatores de amortecimento do primeiro modo de vibração à flexão da espécie *Dendrocalamus giganteus*.

Amostra	f (Hz)	$\xi$ (%)	Modo que foi extraído
DG – 1° Amostra	2890,99	1,89	3
DG – 2° Amostra	-	-	-
DG – 3° Amostra	-	-	-

Tabela 4.16 – Freqüências naturais e fatores de amortecimento do primeiro modo de vibração à flexão da espécie *Phyllostachys aurea*.

Amostra	f (Hz)	$\xi$ (%)	Modo que foi extraído
PA – 1° Amostra	-	-	-
PA – 2° Amostra	-	-	-
PA – 3° Amostra	856,90	1,05	1

Nota-se que na Tabela 4.14 a Amostra GA – 2° Amostra, apresenta uma freqüência natural diferente das dos outros modos. Isso pode ter acontecido devido à influência dos modos de vibração de corpo rígido que ocorrem gerando erros na resposta. Por esse motivo foi desconsiderado este valor de fator de amortecimento. Calculando a média dos os outros dois valores obtem-se um valor de fator de amortecimento igual a 1,60 % para a espécie *Guadua angustifolia*. Para a espécie *Dendrocalamus giganteus* e *Phyllostachys aurea* por não ter sido encontrada a vibração do primeiro modo de vibração à flexão, foi considerado somente o fator de amortecimento dos modos encontrados, sendo portanto o amortecimento de 1,89 % e 1,05 % respectivamente.

#### 4.4.2.2.

##### Condição de contorno 2

Os resultados de fator de amortecimento e freqüências naturais para cada modo de vibração são apresentados na Tabela 4.14. GA é da espécie *Guadua angustifolia*, DG é da espécie *Dendrocalamus giganteus* e PA é espécie *Phyllostachys aurea*. As Figuras 4.19, 4.20 e 4.21 ilustram os modos de vibração encontrados para cada amostra.

Tabela 4.17 – Resultados das freqüências naturais e fatores de amortecimento das amostras de bambu apoiadas sobre uma base elástica.

Modos de Vibração (n)	GA		DG		PA	
	f (Hz)	$\xi_r$ (%)	f (Hz)	$\xi_r$ (%)	f (Hz)	$\xi_r$ (%)
1	439,15	1,97	550,49	1,16	254,10	0,96
2	520,66	1,31	567,65	1,75	616,22	1,10
3	540,16	1,20	774,32	1,56	634,50	0,83
4	857,55	0,30	880,38	1,74	870,20	1,01
5	891,79	1,87	932,20	1,36	890,75	0,94
6	1074,21	1,83	1285,76	2,03	1047,96	2,97

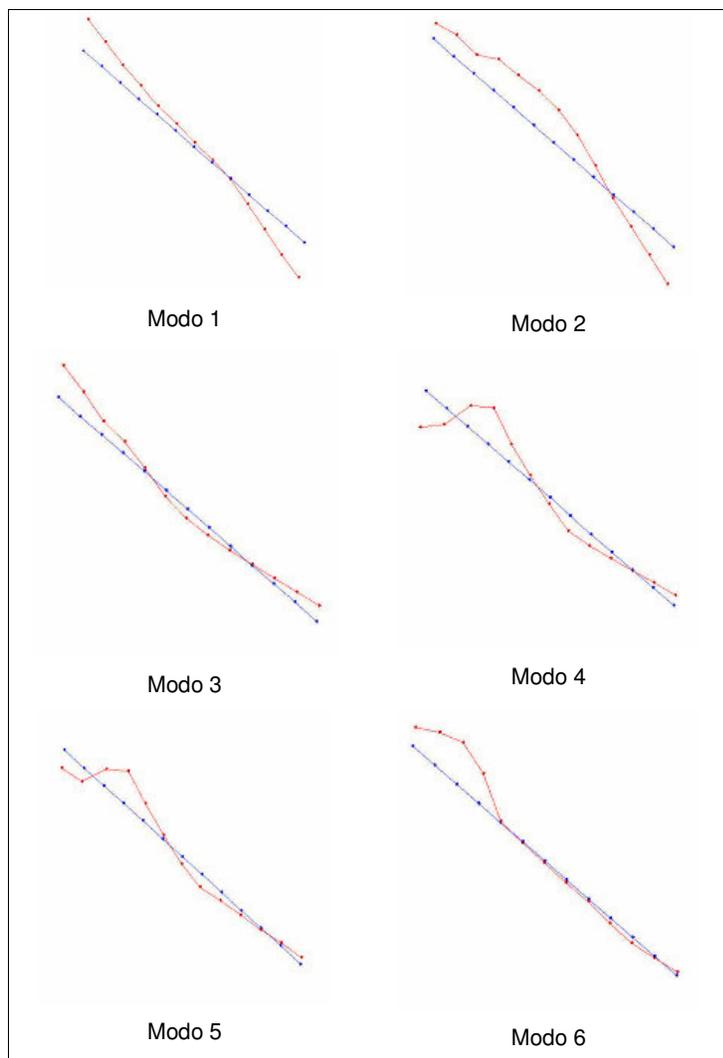


Figura 4.19 – Modos de vibração da espécie *Guadua angustifolia*.

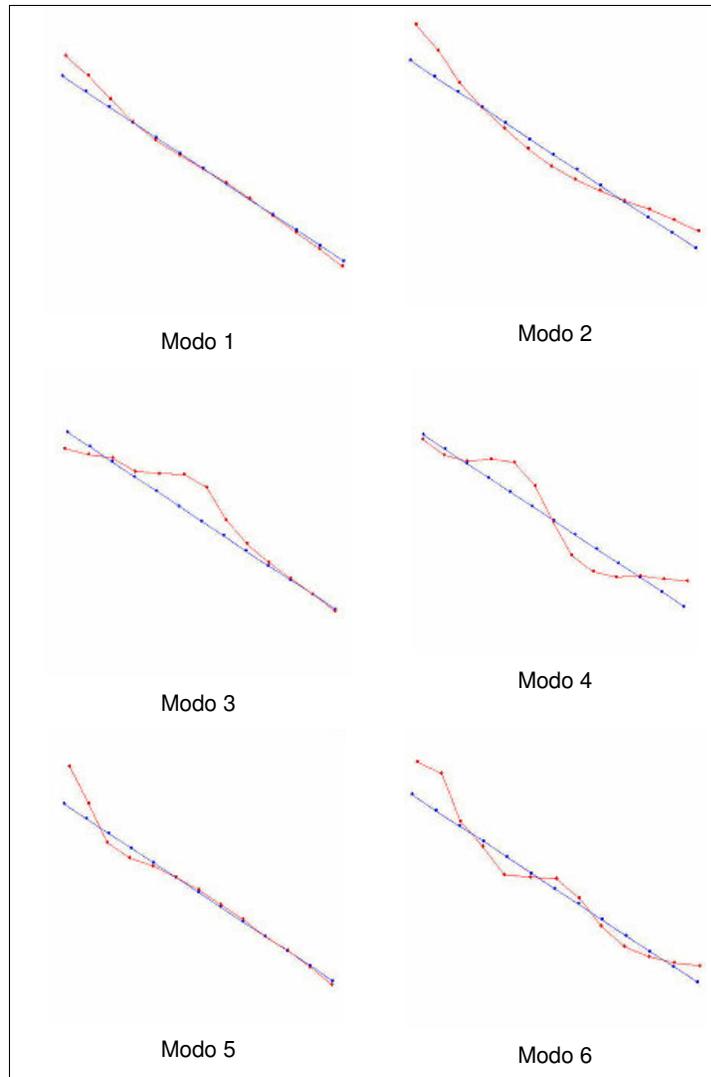


Figura 4.20 – Modos de vibração da espécie *Dendrocalamus giganteus*.

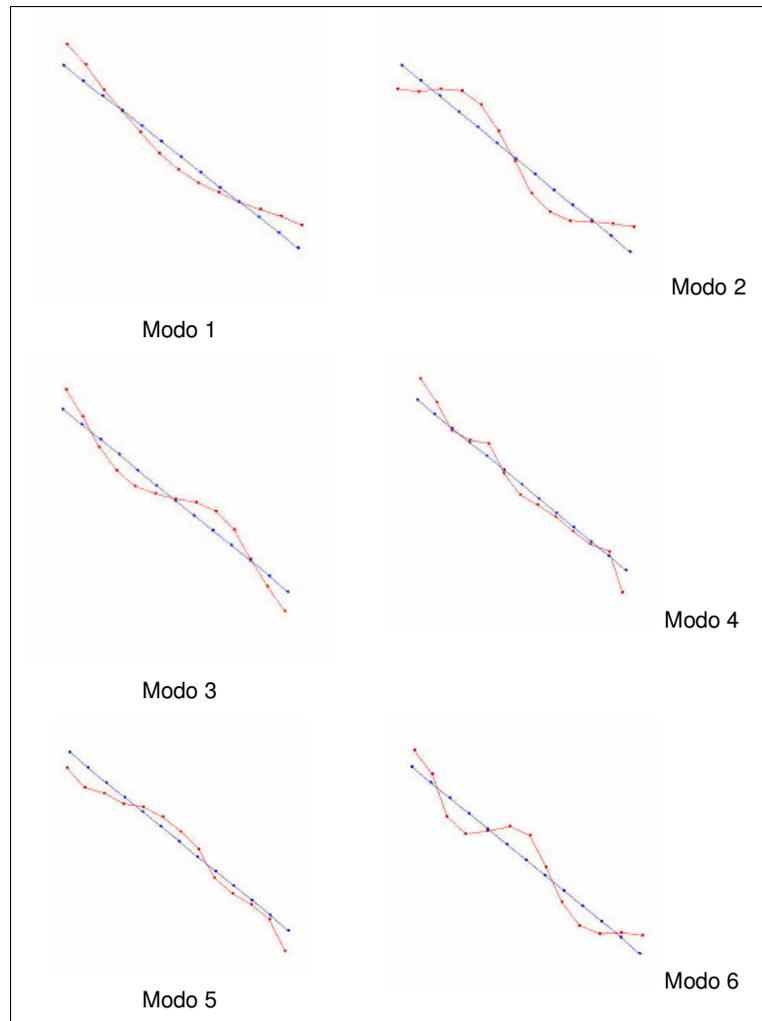


Figura 4.21 – Modos de vibração da espécie *Phyllostachys aurea*.

Tabela 4.18 – Frequências naturais e fatores de amortecimento do primeiro modo de vibração à flexão das espécies *Guadua angustifolia*, *Dendrocalamus giganteus* e *Phyllostachys aurea*.

Amostra	f (Hz)	$\xi$ (%)	Modo que foi extraído
GA	540,16	1,20	3
DG	567,65	1,75	2
PA	254,10	0,96	1

Neste ensaio, verifica-se que para as amostras analisadas foi obtido o modo de vibração desejado e, portanto os valores de fator de amortecimento encontrados são de 1,20 % para espécie *Guadua angustifolia*, 1,75 % para a espécie *Dendrocalamus giganteus* e 0,96 % para espécie *Phyllostachys aurea*.

Comparando-se estes valores de fator de amortecimento encontrados com os valores de fator de amortecimento obtidos no experimento do bambu preso por um fio, obteve-se apresentam coerência entre eles.