



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**  
Centro de Tecnologia e Ciências  
Faculdade de Engenharia

Leonardo Ferreira de Miranda

**Avaliação da Resposta Estrutural Dinâmica de Edifícios em Aço  
com Base em Monitoração Experimental e Modelagem Numérica**

Rio de Janeiro  
2019

Leonardo Ferreira de Miranda

**Avaliação da Resposta Estrutural Dinâmica de Edifícios em Aço com Base em  
Monitoração Experimental e Modelagem Numérica**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Orientadores: Prof. Dr. José Guilherme Santos da Silva  
Prof. Dr. Gilvan Lunz Debona

Rio de Janeiro  
2019

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

M672 Miranda, Leonardo Ferreira de.  
Avaliação da resposta estrutural dinâmica de edifícios em aço com base em monitoração experimental e modelagem numérica / Leonardo Ferreira de Miranda. – 2019.  
182f.

Orientadores: José Guilherme Santos da Silva, Gilvan Lunz Debona.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Análise estrutural (Engenharia) - Teses. 3. Edifícios - Teses. 4. Aço - Estruturas - Teses. 5. Método dos elementos finitos - Teses. I. Silva, José Guilherme Santos da. II. Debona, Gilvan Lunz. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 624.04

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Leonardo Ferreira de Miranda

**Avaliação da Resposta Estrutural Dinâmica de Edifícios em Aço com Base em  
Monitoração Experimental e Modelagem Numérica**

Dissertação de mestrado apresentada,  
como requisito parcial para obtenção  
do título de Mestre, ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil,  
da Universidade do Estado do Rio de  
Janeiro. Área de concentração:  
Estruturas.

Aprovado em: 25 de outubro de 2019.

Banca Examinadora:



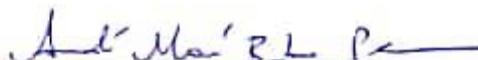
---

Prof. Dr. José Guilherme Santos da Silva (Presidente / Orientador)  
Faculdade de Engenharia – UERJ



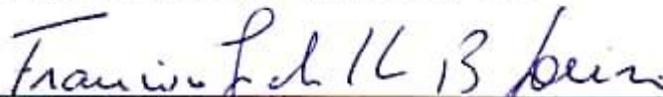
---

Prof. Dr. Gilvan Lunz Debona (Orientador)  
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ



---

Prof. Dr. André Maués Brabo Pereira  
Universidade Federal Fluminense - UFF



---

Prof. Dr. Francisco José da Cunha Pires Soeiro  
Faculdade de Engenharia - UERJ

Rio de Janeiro  
2019

## DEDICATÓRIA

A Jeová, por me proporcionar os meios necessários. A minha família, que sempre me apoiou e me incentivou a continuar acreditando.

## **AGRADECIMENTOS**

A Jeová, por me dar a saúde e os meios necessários para eu atingir mais esta conquista.

Aos meus pais, Fernandes Barbosa de Miranda e Sônia Maria Ferreira de Miranda, pelo amor, carinho, pelo apoio moral e por todo o esforço e sacrifício para me proporcionar o suporte financeiro necessário durante toda a minha vida, que me permitiu me dedicar aos estudos e tornou possível a realização de mais este sonho.

Aos meus irmãos, Leandro Miranda e Fernanda Miranda, aos meus cunhados, Rodrigo da Silva e Janine Miranda, aos meus sobrinhos, João Arthur Miranda, Miguel Fernandes Miranda e Helena Fernanda Miranda, e a minha namorada, Letícia Medeiros por, juntamente com meus pais, serem meu alicerce, sempre me incentivando a persistir, mesmo nos momentos em que eu não acreditava mais.

Um agradecimento especial ao meu orientador, professor José Guilherme Santos da Silva, pela paciência, convívio e valiosas contribuições dadas ao longo da elaboração deste trabalho, incentivando à minha trajetória profissional na área de Estruturas.

Quero, também, agradecer ao professor, e também orientador, Gilvan Lunz Debona, pelo seu valioso tempo, disposição, conselhos e apoio técnico fornecido durante a elaboração desta dissertação de mestrado.

Um agradecimento muito especial a engenheira e amiga Fernanda Fernandes Campista, por se importar e ter estado ao meu lado em um momento difícil.

Aos engenheiros, e amigos, Vencislau Manuel Quissanga, Carolina Andrea Sánchez Guerrero e Felipe Almeida de Souza, pelas valiosas ajudas ao longo deste período, nos ensaios experimentais.

Aos professores e funcionários do PGECIV - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, pelos conhecimentos e auxílio sempre que necessário.

Aos amigos do programa de pós-graduação, por todo tempo de convívio, e a todos que, de alguma forma, contribuíram para a execução desta dissertação de mestrado.

Gostaria de agradecer ao suporte financeiro fornecido pelas Agências de Fomento à Pesquisa do país: CAPES, CNPq e FAPERJ.

Insanidade é continuar fazendo sempre a mesma coisa  
e esperar resultados diferentes.

*Albert Einstein*

## RESUMO

MIRANDA, Leonardo Ferreira de. *Avaliação da resposta estrutural dinâmica de edifícios em aço com base em monitoração experimental e modelagem numérica*. 2019. 182f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2019.

Neste trabalho, a resposta dinâmica de um edifício em aço de cinco andares construído em laboratório foi determinada com base em monitoração experimental dinâmica e análises numéricas. A monitoração experimental dinâmica possibilita a extração dos parâmetros modais (frequências naturais, modos de vibração e coeficientes de amortecimento). Esses parâmetros são relevantes para a caracterização do sistema estrutural e são calculados com base nos sinais experimentais de acelerações, velocidades e deslocamentos. Para validar a resposta dinâmica, os resultados numéricos e experimentais foram correlacionados e apresentados em termos de parâmetros modais, funções no domínio do tempo e funções de resposta em frequência (FRFs). Desta forma, o modelo numérico utilizado para a análise dinâmica do edifício em aço adotou as técnicas usuais de refinamento de malha presentes nas simulações de modelagem de elementos finitos (MEF) implementadas no programa ANSYS. Os pilares de aço foram representados por elementos de pórtico tridimensionais, onde os efeitos de torção e flexão são considerados, e as lajes foram representadas por elementos de casca. Uma análise de vibração forçada foi realizada e a resposta dinâmica do edifício, quando submetida a cargas de impacto, foi comparada com a resposta estrutural real do modelo do edifício em aço. Com base na boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais, as conclusões enfatizam a relevância da monitoração experimental dinâmica, a fim de caracterizar e ajustar o MEF desenvolvido do edifício.

Palavras-chave: Edifícios; Análise estrutural dinâmica; Monitoração experimental dinâmica; Modelagem de elementos finitos.

## ABSTRACT

MIRANDA, Leonardo Ferreira de. *dynamic structural response evaluation of steel buildings based on experimental monitoring and numerical modeling*. 2019. 182f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2019.

In this work, the dynamic response of a 5-story steel building constructed in laboratory was determined based on dynamic experimental monitoring and numerical analyses. The dynamic experimental monitoring makes possible the extraction of modal parameters (natural frequencies, vibration modes and damping coefficients). These parameters are relevant for the characterization of the structural system, and are calculated based on the accelerations, velocities and displacements experimental signals. To validate the dynamic response, both numerical and experimental results were correlated and presented in terms of modal parameters, time history functions and frequency response functions (FRFs). This way, the numerical model used for the steel building dynamic analysis adopted the usual mesh refinement techniques present in finite element modelling (FEM) simulations implemented in the ANSYS program. The floor steel columns were represented by three-dimensional gantry elements, where flexural and torsional effects are considered, and the slabs were represented by shell elements. A forced vibration analysis was carried out and the dynamic response of the building, when subjected to impact loads, was compared with the actual structural response of the steel building model. Based on the good agreement between the numerical and experimental results, the conclusions emphasize the relevance of the dynamic experimental monitoring in order to characterize and adjust the developed FEM of the building.

Keywords: Buildings; Dynamic structural analysis; Dynamic experimental monitoring; Finite element modelling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Edifício Burj Khalifa - Fonte: <a href="http://www.gulfbusiness.com">www.gulfbusiness.com</a> .....	22
Figura 2 – Edifício Millennium Pallace - Fonte: <a href="http://www.buildin.com.br">www.buildin.com.br</a> .....	24
Figura 3 – Situações típicas de vibrações, MOREIRA, 2002, p.11. ....	26
Figura 4 – Torre de telecomunicações, RIBEIRO et al. (2009). ....	27
Figura 5 – Ponte rodoviária, ANDRADE, TRAUTWEIN e BITTENCOURT (2013)....	28
Figura 6 – Modelo do edifício, MARQUES, CANDEIAS e COSTA (2014). ....	29
Figura 7 – Modelo do pórtico, BOLINA et al. (2014).....	30
Figura 8 – Modelo instrumentado, PEREIRA, MAGLUTA e ROITMAN (2015) .....	31
Figura 9 – Igreja Nossa Senhora das Dores, BRANDÃO et al. (2016).....	32
Figura 10 – Reservatório de água elevado, MESQUITA et al. (2016).....	33
Figura 11 – Esquema do edifício, PIERDICCA et al. (2017). ....	35
Figura 12 – Modelo do edifício em HDF, BASTOS et al. (2018). ....	36
Figura 13 – Passarela da Rua Osvaldo Aranha, I. SILVA e J. SILVA (2018).....	37
Figura 14 – Passarela que conecta os edifícios da UERJ, DEBONA e SILVA (2019) .....	38
Figura 15 – Vista tridimensional da estrutura .....	42
Figura 16 – Vista frontal da estrutura .....	43
Figura 17 – Vista lateral da estrutura. ....	43
Figura 18 – Vista superior da estrutura. ....	44
Figura 19 – Detalhe das conexões dos pilares com as lajes.....	44
Figura 20 – Detalhe das conexões dos pilares com a placa de base.....	45
Figura 21 – Detalhe do engastamento da placa de base da estrutura .....	45
Figura 22 – Orientação considerada para os eixos do modelo estrutural .....	45
Figura 23 – Projeto estrutural. Dimensões: centímetros, exceto onde indicado.....	46
Figura 24 – Projeto estrutural: Planta do Pav. Térreo. Dimensões: milímetros. ....	46
Figura 25 – Projeto estrutural: Planta do Pav. Tipo. Dimensões: milímetros .....	47
Figura 26 – Projeto estrutural: Planta da Cobertura. Dimensões: milímetros.....	47
Figura 27 – Vista tridimensional do MEF. Dimensões: centímetros. ....	50
Figura 28 – Vistas em elevação do MEF. Dimensões: centímetros. ....	51
Figura 29 – Vista superior do MEF. Dimensões: centímetros. ....	51
Figura 30 – Acelerômetro Dytran (transdutor de aceleração capacitivo).....	56

Figura 31 – Acelerômetro Dytran. Conector fêmea (esq.) / Conector macho (dir.).	57
Figura 32 – Acelerômetro Kyowa (transdutor de aceleração resistivo).	58
Figura 33 – Acelerômetro Kyowa. Conector macho (esq.) / Conector fêmea (dir.).	58
Figura 34 – Sistema ADS 2002 – vista frontal.	59
Figura 35 – Sistema ADS 2002 – vista traseira.	59
Figura 36 – Sistema ADS 2002 acoplado ao computador.	60
Figura 37 – Software AqDados.	60
Figura 38 – Software AqDAnalysis.	61
Figura 39 – PDV 100. Vista superior.	61
Figura 40 – PDV 100. Vista lateral.	62
Figura 41 – PDV 100. Vista inferior.	62
Figura 42 – PDV 100. Vistas.	62
Figura 43 – PDV 100. Placa de identificação.	63
Figura 44 – PDV 100. Sistema de aquisição de dados (USB).	63
Figura 45 – PDV 100. Conexões de saída e alimentação.	63
Figura 46 – PDV 100. Detalhes.	64
Figura 47 – PDV 100 conectado ao sistema de aquisição.	65
Figura 48 – Software Polytec Vibrometer Software.	65
Figura 49 – Detalhes de um martelo de impacto, BILOSOVÁ (2011, p. 81)	66
Figura 50 – Força de impacto e espectro, BILOSOVÁ (2011, p. 81)	67
Figura 51 – Martelo ICP® IMPACT HAMMER 086C03 PCB Piezotronics	68
Figura 52 – Martelo de impacto 5802A Dytran Instruments da marca Dytran	68
Figura 53 – Smartphone Motorola modelo Moto G - 2ª Geração	69
Figura 54 – Interface do software Tracker	70
Figura 55 – Smartphone iPhone 6	70
Figura 56 – Interface do software Vibration: Diffraction Limited Design LLC	71
Figura 57 – Conexão dos canais no sistema de aquisição de dados ADS 2002	76
Figura 58 – Ensaio 1: Posição dos acelerômetros e ponto de excitação (eixo Z)	77
Figura 59 - Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z]	78
Figura 60 - Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [h = 120 cm. Eixo Z]	78
Figura 61 - Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [h = 90 cm. Eixo Z]	78
Figura 62 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [h = 60 cm. Eixo Z]	79
Figura 63 – Ensaio 1: espectro de resposta [h = 150 cm. Eixo Z]	79
Figura 64 – Ensaio 1: espectro de resposta [h = 120 cm. Eixo Z]	79

Figura 65 – Ensaio 1: espectro de resposta [h = 90 cm. Eixo Z] .....	80
Figura 66 – Ensaio 1: espectro de resposta [h = 60 cm. Eixo Z] .....	80
Figura 67 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [primeiro modo: h = 150 cm. Eixo Z].....	81
Figura 68 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [primeiro modo: h = 120 cm. Eixo Z].....	81
Figura 69 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [primeiro modo: h = 90 cm. Eixo Z].....	82
Figura 70 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [primeiro modo: h = 60 cm. Eixo Z].....	82
Figura 71 – Ensaio 1: espectro de frequência [primeiro modo: h = 150 cm. Eixo Z] ..	82
Figura 72 – Ensaio 1: espectro de frequência [primeiro modo: h = 120 cm. Eixo Z] ..	83
Figura 73 – Ensaio 1: espectro de frequência [primeiro modo: h = 90 cm. Eixo Z] ...	83
Figura 74 – Ensaio 1: espectro de frequência [primeiro modo: h = 60 cm. Eixo Z] ...	83
Figura 75 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [quarto modo: h = 150 cm. Eixo Z].....	84
Figura 76 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [quarto modo: h = 120 cm. Eixo Z].....	84
Figura 77 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [quarto modo: h = 90 cm. Eixo Z].....	84
Figura 78 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [quarto modo: h = 60 cm. Eixo Z].....	85
Figura 79 – Ensaio 1: espectro de frequência [quarto modo: h = 150 cm. Eixo Z] ....	85
Figura 80 – Ensaio 1: espectro de frequência [quarto modo: h = 120 cm. Eixo Z] ....	85
Figura 81 – Ensaio 1: espectro de frequência [quarto modo: h = 90 cm. Eixo Z] .....	86
Figura 82 – Ensaio 1: espectro de frequência [quarto modo: h = 60 cm. Eixo Z] .....	86
Figura 83 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [quinto modo: h = 150 cm. Eixo Z].....	86
Figura 84 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [quinto modo: h = 120 cm. Eixo Z].....	87
Figura 85 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [quinto modo: h = 90 cm. Eixo Z].....	87
Figura 86 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [quinto modo: h = 60 cm. Eixo Z].....	87

Figura 87 – Ensaio 1: espectro de frequência [quinto modo: h = 150 cm. Eixo Z] ....	88
Figura 88 – Ensaio 1: espectro de frequência [quinto modo: h = 120 cm. Eixo Z] ....	88
Figura 89 – Ensaio 1: espectro de frequência [quinto modo: h = 90 cm. Eixo Z] .....	88
Figura 90 – Ensaio 1: espectro de frequência [quinto modo: h = 60 cm. Eixo Z] .....	89
Figura 91 – Ensaio 1: 1º Modo de Vibração Experimental .....	90
Figura 92 – Ensaio 1: 4º Modo de Vibração Experimental .....	90
Figura 93 – Ensaio 1: 5º Modo de Vibração Experimental .....	91
Figura 94 – Ensaio 1: Posição dos acelerômetros e ponto de excitação (eixo X) .....	92
Figura 95 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X] .....	93
Figura 96 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [h = 120 cm. Eixo X] .....	93
Figura 97 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [h = 90 cm. Eixo X] .....	93
Figura 98 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [h = 60 cm. Eixo X] .....	93
Figura 99 – Ensaio 1: espectro de frequência [h = 150 cm. Eixo X] .....	94
Figura 100 – Ensaio 1: espectro de frequência [h = 120 cm. Eixo X] .....	94
Figura 101 – Ensaio 1: espectro de frequência [h = 90 cm. Eixo X] .....	94
Figura 102 – Ensaio 1: espectro de frequência [h = 60 cm. Eixo X] .....	95
Figura 103 - Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [segundo modo: h = 150 cm. Eixo X] .....	96
Figura 104 - Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [segundo modo: h = 120 cm. Eixo X] .....	96
Figura 105 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [segundo modo: h = 90 cm. Eixo X] .....	96
Figura 106 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [segundo modo: h = 60 cm. Eixo X] .....	97
Figura 107 – Ensaio 1: espectro de frequência [segundo modo: h = 150 cm. Eixo X] .....	97
Figura 108 – Ensaio 1: espectro de frequência [segundo modo: h = 120 cm. Eixo X] .....	97
Figura 109 – Ensaio 1: espectro de frequência [segundo modo: h = 90 cm. Eixo X]	98
Figura 110 – Ensaio 1: espectro de frequência [segundo modo: h = 60 cm. Eixo X]	98
Figura 111 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [sétimo modo: h = 150 cm. Eixo X] .....	98
Figura 112 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [sétimo modo: h = 120 cm. Eixo X] .....	99

Figura 113 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [sétimo modo: h = 90 cm. Eixo X] .....	99
Figura 114 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [sétimo modo: h = 60 cm. Eixo X] .....	99
Figura 115 – Ensaio 1: espectro de frequência [sétimo modo: h = 150 cm. Eixo X]	100
Figura 116 – Ensaio 1: espectro de frequência [sétimo modo: h = 120 cm. Eixo X]	100
Figura 117 – Ensaio 1: espectro de frequência [sétimo modo: h = 90 cm. Eixo X] .	100
Figura 118 – Ensaio 1: espectro de frequência [sétimo modo: h = 60 cm. Eixo X] .	101
Figura 119 – Ensaio 1: 2º Modo de Vibração Experimental .....	102
Figura 120 – Ensaio 1: 7º Modo de Vibração Experimental .....	102
Figura 121 – Frequências naturais e modos de vibração obtidos no Ensaio 1 .....	103
Figura 122 – Posição do feixe de laser e posição do ponto de excitação (eixo Z) ..	106
Figura 123 – Ensaio 2: velocidade no domínio do tempo [h = 147 cm. Eixo Z].....	106
Figura 124 – Ensaio 2: espectro de frequência [h = 147 cm. Eixo Z] .....	107
Figura 125 Posição do feixe de laser e posição do ponto de excitação (eixo X).....	107
Figura 126 – Ensaio 2: velocidade no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X].....	108
Figura 127 – Ensaio 2: espectro de frequência [h = 150 cm. Eixo X].....	108
Figura 128 – Posição do iPhone e do ponto de excitação manual (eixo Z).....	110
Figura 129 – Ensaio 3: aceleração no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z] .....	110
Figura 130 – Ensaio 3: espectro de frequência [h = 150 cm. Eixo Z] .....	111
Figura 131 – Posição do iPhone e do ponto de excitação manual (eixo X) .....	111
Figura 132 – Ensaio 3: aceleração no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X] .....	112
Figura 133 – Ensaio 3: espectro de frequência [h = 150 cm. Eixo X] .....	112
Figura 134 – Marcações feitas no topo da estrutura para auxiliar na análise .....	114
Figura 135 – Posição da câmera e do ponto de excitação (eixo Z).....	115
Figura 136 – Ensaio 4: deslocamento no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z]..	115
Figura 137 – Ensaio 4: espectro de frequência [h = 150 cm. Eixo Z] .....	116
Figura 138. Posição da câmera e do ponto de excitação (eixo X) .....	116
Figura 139 – Ensaio 4: deslocamento no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X] .	117
Figura 140 – Ensaio 4: espectro de frequência [h = 150 cm. Eixo X].....	117
Figura 141 – Posição - ICP® IMPACT HAMMER e PDV 100 (eixo Z).....	119
Figura 142 – Ensaio 5: velocidade no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z].....	120
Figura 143 – Ensaio 5: força no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z].....	120
Figura 144 – Ensaio 5: espectro de resposta em FFT [h = 150 cm. Eixo Z].....	121

Figura 145 – Ensaio 5: espectro de resposta do martelo [h = 150 cm. Eixo Z] .....	121
Figura 146 – Ensaio 5: espectro de resposta em FRF [h = 150 cm. Eixo Z] .....	121
Figura 147 – Ensaio 5: coerência do ensaio [h = 150 cm. Eixo Z] .....	122
Figura 148 – Posição - ICP® IMPACT HAMMER e PDV 100 (eixo X).....	122
Figura 149 – Ensaio 5: velocidade no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X].....	123
Figura 150 – Ensaio 5: força no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X].....	123
Figura 151 – Ensaio 5: espectro de resposta em FFT [h = 150 cm. Eixo X] .....	124
Figura 152 – Ensaio 5: espectro de resposta do martelo [h = 150 cm. Eixo X].....	124
Figura 153 – Ensaio 5: espectro de resposta em FRF [h = 150 cm. Eixo X] .....	124
Figura 154 – Ensaio 5: coerência do ensaio [h = 150 cm. Eixo X] .....	125
Figura 155 – Ensaio 6: velocidade no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z].....	127
Figura 156 – Ensaio 6: força no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z] .....	127
Figura 157 – Ensaio 6: espectro de resposta em FFT [h = 150 cm. Eixo Z].....	127
Figura 158 – Ensaio 6: espectro de resposta do martelo [h = 150 cm. Eixo Z] .....	128
Figura 159 – Ensaio 6: espectro de resposta em FRF [h = 150 cm. Eixo Z] .....	128
Figura 160 – Ensaio 6: coerência do ensaio [h = 150 cm. Eixo Z] .....	128
Figura 161 – Ensaio 6: velocidade no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X].....	129
Figura 162 – Ensaio 6: força no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X].....	129
Figura 163 – Ensaio 6: espectro de resposta em FFT [h = 150 cm. Eixo X] .....	130
Figura 164 – Ensaio 6: espectro de resposta do martelo [h = 150 cm. Eixo X].....	130
Figura 165 – Ensaio 6: espectro de resposta em FRF [h = 150 cm. Eixo X] .....	130
Figura 166 – Ensaio 6: coerência do ensaio [h = 150 cm. Eixo X] .....	131
Figura 167 – Padrão de resultados dos ensaios .....	133
Figura 168 – Modo de vibração da primeira frequência natural $f_{01} = 2,34$ Hz .....	138
Figura 169 – Modo de vibração da segunda frequência natural $f_{02} = 3,93$ Hz.....	139
Figura 170 – Modo de vibração da terceira frequência natural $f_{03} = 4,00$ Hz .....	140
Figura 171 – Modo de vibração da quarta frequência natural $f_{04} = 7,06$ Hz .....	141
Figura 172 – Modo de vibração da quinta frequência natural $f_{05} = 11,75$ Hz.....	142
Figura 173 – Modo de vibração da sexta frequência natural $f_{06} = 12,65$ Hz.....	143
Figura 174 – Modo de vibração da sétima frequência natural $f_{07} = 12,98$ Hz.....	144
Figura 175 – Modo de vibração da oitava frequência natural $f_{08} = 16,05$ Hz.....	145
Figura 176 – Modo de vibração da nona frequência natural $f_{09} = 19,21$ Hz .....	146
Figura 177 – Modo de vibração da décima frequência natural $f_{10} = 23,22$ Hz.....	147
Figura 178 – velocidade no domínio do tempo (eixo Z) .....	148

Figura 179 – espectro de resposta (eixo Z).....	149
Figura 180 – velocidade no domínio do tempo (eixo X) .....	149
Figura 181 – espectro de resposta (eixo X) .....	150
Figura 182 – Comparação dos modos de vibração da estrutura: primeiro modo (eixo Z) .....	153
Figura 183 – Comparação dos modos de vibração da estrutura: segundo modo (eixo X) .....	153
Figura 184 – Comparação dos modos de vibração da estrutura: quarto modo (eixo Z) .....	153
Figura 185 – Comparação dos modos de vibração da estrutura: quinto modo (eixo Z) .....	154
Figura 186 – Comparação dos modos de vibração da estrutura: sétimo modo (eixo X) .....	154
Figura 187 – Aceleração no domínio do tempo. Comparativo (eixo Z) .....	155
Figura 188 – Velocidade no domínio do tempo. Comparativo (eixo Z).....	156
Figura 189 – Deslocamento no domínio do tempo. Comparativo (eixo Z) .....	156
Figura 190 – Espectro de resposta. Comparativo (eixo Z) .....	156
Figura 191 – Aceleração no domínio do tempo. Comparativo (eixo X) .....	157
Figura 192 – Velocidade no domínio do tempo. Comparativo (eixo X) .....	157
Figura 193 – Deslocamento no domínio do tempo. Comparativo (eixo X) .....	158
Figura 194 – Espectro de resposta. Comparativo (eixo X) .....	158
Figura 195 – Ensaio 1: velocidade no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z].....	172
Figura 196 – Ensaio 1: velocidade no domínio do tempo [h = 120 cm. Eixo Z].....	172
Figura 197 – Ensaio 1: velocidade no domínio do tempo [h = 90 cm. Eixo Z].....	172
Figura 198 – Ensaio 1: velocidade no domínio do tempo [h = 60 cm. Eixo Z].....	173
Figura 199 – Ensaio 1: deslocamento no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z]..	173
Figura 200 – Ensaio 1: deslocamento no domínio do tempo [h = 120 cm. Eixo Z]..	173
Figura 201 – Ensaio 1: Ensaio 1: deslocamento no domínio do tempo [h = 90 cm. Eixo Z].....	173
Figura 202 – Ensaio 1: Ensaio 1: deslocamento no domínio do tempo [h = 60 cm. Eixo Z].....	174
Figura 203 – Ensaio 1: velocidade no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X].....	174
Figura 204 – Ensaio 1: velocidade no domínio do tempo [h = 120 cm. Eixo X].....	174
Figura 205 – Ensaio 1: velocidade no domínio do tempo [h = 90 cm. Eixo X].....	174

Figura 206 – Ensaio 1: velocidade no domínio do tempo [h = 60 cm. Eixo X].....	175
Figura 207 – Ensaio 1: deslocamento no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X] ..	175
Figura 208 – Ensaio 1: deslocamento no domínio do tempo [h = 120 cm. Eixo X] ..	175
Figura 209 – Ensaio 1: deslocamento no domínio do tempo [h = 90 cm. Eixo X] ...	175
Figura 210 – Ensaio 1: deslocamento no domínio do tempo [h = 60 cm. Eixo X] ...	176
Figura 211 – Ensaio 2: aceleração no domínio do tempo [h = 147 cm. Eixo Z] .....	176
Figura 212 – Ensaio 2: deslocamento no domínio do tempo [h = 147 cm. Eixo Z]..	176
Figura 213 – Ensaio 2: aceleração no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X] .....	176
Figura 214 – Ensaio 2: deslocamento no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X] ..	177
Figura 215 – Ensaio 3: aceleração no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z] .....	177
Figura 216 – Ensaio 3: deslocamento no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z]..	177
Figura 217 – Ensaio 3: aceleração no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X] .....	177
Figura 218 – Ensaio 3: deslocamento no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X] ..	178
Figura 219 – Ensaio 4: aceleração no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z] .....	178
Figura 220 – Ensaio 4: velocidade no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z].....	178
Figura 221 – Ensaio 4: aceleração no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X] .....	178
Figura 222 – Ensaio 4: velocidade no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X].....	179
Figura 223. Ensaio 5: aceleração no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z] .....	179
Figura 224 – Ensaio 5: deslocamento no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z]..	179
Figura 225. Ensaio 5: aceleração no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X] .....	179
Figura 226 – Ensaio 5: deslocamento no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X] ..	180
Figura 227. Ensaio 6: aceleração no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z] .....	180
Figura 228 – Ensaio 6: deslocamento no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z]..	180
Figura 229. Ensaio 6: aceleração no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X] .....	180
Figura 230 – Ensaio 6: deslocamento no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X] ..	181
Figura 231. Aceleração no domínio do tempo (eixo Z).....	181
Figura 232. Deslocamento no domínio do tempo (eixo Z).....	181
Figura 233. Aceleração no domínio do tempo (eixo X) .....	181
Figura 234. Deslocamento no domínio do tempo (eixo X) .....	182

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados gerais sobre o modelo.....	52
Tabela 2 – Recomendações para amortecimento $\xi$ , MURRAY et al (2003, p.18).....	54
Tabela 3 – Parâmetros $\alpha$ e $\beta$ usados na análise transiente. ....	54
Tabela 4 – Acelerômetro Dytran - Parâmetros de cada equipamento.....	57
Tabela 5 – Acelerômetro Kyowa – Parâmetros de cada equipamento.....	58
Tabela 6 – Análise modal: ensaios executados. ....	74
Tabela 7 – Ensaio 1: Altura referente ao posicionamento dos acelerômetros .....	76
Tabela 8 – Conexão dos canais no sistema de aquisição de dados ADS 2002.....	76
Tabela 9 – Limites de filtragem das frequências naturais registradas (eixo Z).....	81
Tabela 10 – Correlação entre amplitudes do primeiro modo de vibração (eixo Z) ....	89
Tabela 11 – Correlação entre amplitudes do quarto modo de vibração (eixo Z).....	90
Tabela 12 – Correlação entre amplitudes do quinto modo de vibração (eixo Z) .....	91
Tabela 13 – Coeficientes de amortecimento – (eixo Z) .....	91
Tabela 14 – Limites de filtragem das frequências naturais (eixo X) .....	95
Tabela 15 – Correlação entre amplitudes do segundo modo de vibração (eixo X) .	101
Tabela 16 – Correlação entre amplitudes do sétimo modo de vibração (eixo X) ....	102
Tabela 17 – Coeficientes de amortecimento (eixo X).....	103
Tabela 18 – Coeficientes de amortecimento obtidos no ensaio 1 .....	104
Tabela 19 – Resumo dos resultados dos ensaios.....	132
Tabela 20 – Frequências naturais do modelo em elementos finitos.....	137
Tabela 21 – Tabela comparativa de frequências naturais.....	151
Tabela 22 – Tabela comparativa de diferenças máximas .....	151

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADS	Aquisition Data System – Sistema de Aquisição de Dados
AISC	American Institute of Steel Construction
ANSYS	Swanson Analysis Systems
BNC	Bayonet Neill Concelman
FFT	Fast Fourier Transform – Transformada Rápida de Fourier
FRF	Frequency Response Function – Função de Resposta em Frequência
HDF	High Density Fiberboard – Placa de Fibra de Alta Densidade
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
iOS	iPhone Operational System
ISO	International Organization for Standardization
MDF	Medium Density Fiberboard – Placa de Fibra de Média Densidade
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
OMA	Operational Modal Analysis – Análise Modal Operacional
PDV	Polytec Digital Vibrometer – Vibrômetro Digital da Polytec
SIMO	Single Input Multiple Output – Única Entrada e Múltiplas Saídas
SISO	Single Input Single Output – Única Entrada e Única Saída

## LISTA DE SÍMBOLOS

a	aceleração
C	matriz de amortecimento de Rayleigh
cm	centímetro
d	deslocamento
g	gravidade
E	modulo de elasticidade
EL	elevação
f	frequência de excitação
$f_n$	frequência natural da estrutura em Hz
$F_N$	força dinâmica
$F(t)$	vetor de forças nodais equivalente
g	aceleração da gravidade
GPa	Gigapascal
h	altura
Hz	Hertz
K	matriz de rigidez do sistema
kg	quilograma
$\text{kg/m}^3$	quilograma por metro cúbico
kN	quilonewton
M	matriz de massa do sistema
m	metros
mm	milímetro
mV/g	milivolts por gravidade
mV/N	milivolts por Newton
m/s	metros por segundo

$m/s^2$	metros por segundo ao quadrado
N	Newton
rad/s	radianos por segundo
s	segundo
t	tempo
v	velocidade
$\alpha$	taxa de contribuição da matriz de massa
$\beta$	coeficiente de amortecimento modal
$\beta$	taxa de contribuição da matriz de rigidez
$\nu$	coeficiente de Poisson
$\rho$	densidade
$\xi$	coeficiente de amortecimento
$\xi_i$	taxa de amortecimento do modo i
$\delta$	decremento logarítmico do amortecimento
$\omega_{0i}$	frequência natural circular do modo i

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>22</b>
<b>1. MODELO ESTRUTURAL INVESTIGADO</b> .....	<b>41</b>
1.1 Considerações iniciais.....	41
1.2 Modelo estrutural do edifício .....	41
1.3 Grampos “sargento” .....	47
1.4 Placa de aço.....	47
1.5 Considerações do capítulo.....	48
<b>2. MODELO NUMÉRICO-COMPUTACIONAL</b> .....	<b>49</b>
2.1 Considerações iniciais.....	49
2.2 Modelo computacional.....	49
2.3 Modelagem do amortecimento estrutural .....	52
2.4 Considerações do capítulo.....	55
<b>3. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA MONITORAÇÃO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>56</b>
3.1 Considerações iniciais.....	56
3.2 Acelerômetros .....	56
3.3 ADS 2002 (Sistema de Aquisição de Dados) .....	59
3.4 PDV 100 (Sistema de Vibrometria à Laser) .....	61
3.5 Martelo de Impacto.....	66
3.6 Smartphone Moto G 2ª Geração.....	69
3.7 Software Tracker .....	69
3.8 Smartphone iPhone 6.....	70
3.9 Vibration: Diffraction Limited Design LLC .....	71
3.10 Considerações do capítulo.....	71
<b>4. ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL</b> .....	<b>73</b>
4.1 Considerações iniciais.....	73
4.2 Descrição dos ensaios executados .....	73
4.3 Ensaio 1: Excitação manual: ADS 2002.....	75
4.4 Ensaio 2: Excitação manual: PDV 100.....	104
4.5 Ensaio 3: Excitação manual: Vibration.....	109
4.6 Ensaio 4: Excitação manual: Captura de vídeo .....	113

<b>4.7 Ensaio 5: excitação com martelo de impacto ICP® IMPACT HAMMER: PDV 100.....</b>	<b>118</b>
<b>4.8 Ensaio 6: excitação com martelo de impacto Dytran Instruments: PDV 100 .....</b>	<b>126</b>
<b>4.9 Resumo dos resultados das análises.....</b>	<b>132</b>
<b>4.10 Considerações do capítulo.....</b>	<b>135</b>
<b>5. CALIBRAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS E MODOS DE VIBRAÇÃO..</b>	<b>136</b>
<b>5.1 Considerações iniciais.....</b>	<b>136</b>
<b>5.2 Análise das frequências naturais do modelo em elementos finitos (Autovalores).....</b>	<b>136</b>
<b>5.3 Análise dos modos de vibração do modelo numérico (Autovetores) .....</b>	<b>137</b>
<b>5.4 Análise transiente .....</b>	<b>148</b>
<b>5.5 Comparação do modelo numérico-computacional calibrado com os ensaios experimentais.....</b>	<b>150</b>
<b>5.6 Considerações do capítulo.....</b>	<b>159</b>
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>160</b>
<b>6.1 Introdução.....</b>	<b>160</b>
<b>6.2 Conclusões .....</b>	<b>161</b>
<b>6.3 Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>165</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>166</b>
<b>ANEXO 1: GRÁFICOS TEMPORAIS .....</b>	<b>172</b>

## INTRODUÇÃO

A construção de edifícios altos tem sido uma tendência construtiva em todo o mundo, fato este que ocorre devido a diversos fatores, tais como: à recente evolução tecnológica dos materiais e dos métodos construtivos e de cálculo adotados nos últimos anos, possibilitando a construção de edifícios com elementos cada vez mais esbeltos, o crescimento populacional, a urbanização de grandes centros, tornando reduzidas as áreas úteis de construção, entre outros.

Aliado a estas necessidades, também existe o fato de que a moderna concepção da indústria da construção vem considerando as estruturas como verdadeiras obras de arte, tornando os projetos cada vez mais desafiadores para os engenheiros e arquitetos. O maior exemplo atual que ilustra esta afirmativa é o edifício Burj Khalifa (Figura 1), arranha-céu localizado em Dubai, nos Emirados Árabes Unidos, sendo, até o presente momento, a maior estrutura e, conseqüentemente o maior arranha-céu já construído pelo ser humano, com 828 metros de altura e 160 andares.



Figura 1 – Edifício Burj Khalifa - Fonte: [www.gulfbusiness.com](http://www.gulfbusiness.com)

Juntamente com esta tendência, são cada vez mais frequentes os problemas de vibrações ou oscilações excessivas, fissuração em elementos estruturais e outros danos em elementos arquitetônicos, além do desconforto humano, causados por ações dinâmicas diversas, tais como: ação do vento, dilatação térmica, retração, sismos, recalques, ações dinâmicas de agentes externos, entre outros.

Em alguns casos, graças ao desenvolvimento e aprimoramento das técnicas computacionais e experimentais e, valendo-se da utilização de equipamentos e sensores, tem-se buscado desenvolver trabalhos de pesquisa que culminem em modelos matemático-numéricos e técnicas experimentais, com ensaios, tanto em laboratório com modelos reduzidos (escopo desta dissertação), quanto no campo com estruturas reais, para propor soluções que eliminem, ou ao menos atenuem os problemas. Na fase de projeto estes modelos numérico-computacionais podem ser utilizados para prever eventuais problemas de vibração ao longo da vida útil em serviço do edifício. Entretanto, na grande maioria das vezes, a análise de sensibilidade da estrutura a ações dinâmicas não é realizada durante as fases de projeto e o problema dinâmico-estrutural somente se torna evidente na fase de utilização da edificação.

Um caso de problemas de vibrações e oscilações excessivas em edifícios, proveniente de ações dinâmicas que recentemente teve bastante notoriedade no Brasil, ocorreu em 2018 na cidade de Balneário Camboriú, em Santa Catarina. A cidade, que é conhecida pela recente tendência de construção de edifícios altos de alto padrão, abriga o edifício Millennium Palace (Figura 2), até então considerado o edifício mais alto do Brasil, com 177 metros de altura e 46 andares. Durante uma tempestade, o edifício sofreu com vibrações excessivas provenientes de rajadas de vento que atingiram 90 km/h, segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Tais vibrações foram grandes o suficiente para que as águas das piscinas localizadas nos pavimentos superiores do edifício jorrassem para fora, causando enorme desconforto para seus usuários, transmitindo mal-estar físico e medo de viver em seus apartamentos.

Desta forma, fica evidente a necessidade do estudo da monitoração experimental dinâmica destas estruturas, pois para preveni-las das consequências advindas dos efeitos das ações dinâmicas é necessário acompanhar seus deslocamentos, encontrando também direta ou indiretamente as frequências naturais das estruturas.



Figura 2 – Edifício Millennium Pallace - Fonte: [www.buildin.com.br](http://www.buildin.com.br)

Projetos arquitetônicos mais esbeltos, arrojados e com estruturas pouco contraventadas, tornam as edificações mais flexíveis, com baixa frequência fundamental de vibração, entre 0 e 10 Hz e, portanto, vulneráveis a excitações devidas a várias fontes, também de baixa frequência, comumente encontradas nas regiões urbanas.

O estudo de Goto (1983) exemplifica bem esta questão. No Japão, em 1979, após um tufão, foi estudada a reação dos ocupantes de seis edifícios altos e constatou-se que 90% dos ocupantes foram capazes de sentir as vibrações causadas pelo vento. Por outro lado, em 1982, após mais uma ocorrência de tufão, foi possível ir além, e foi estudada a aceleração de três edifícios altos, conseguindo-se relacionar a percepção dos ocupantes do edifício com a aceleração medida. Através deste estudo, constatou-se que com acelerações da ordem de  $0,05 \text{ m/s}^2$  já era possível sentir seus efeitos pelos usuários do edifício, e foi estipulado um limite de  $0,8 \text{ m/s}^2$  ao qual, se ultrapassado, poderia causar sensações de desconforto extremo, tais como enjoo, dificuldades para andar e problemas para realização de tarefas rotineiras de trabalho.

Segundo Moreira (2002, p.13) “a monitoração e medições experimentais podem ser utilizadas tanto para identificar as características dinâmicas da estrutura afetada, quanto para identificar qualitativa e quantitativamente as resultantes das ações dinâmicas”. Modelos matemáticos e computacionais podem ser, então, elaborados e calibrados a partir destes resultados experimentais para se iniciar uma análise dinâmica do problema.

Em sua dissertação de mestrado, Moreira (2002) apresentou um estudo da sensibilidade estrutural de um edifício residencial urbano em concreto armado sujeito a várias fontes de perturbações, sob critérios de conforto humano. Desta forma, diversas análises de vibrações foram realizadas, utilizando acelerômetros e considerando diversas fontes distintas de vibração, tais como vibrações provenientes de equipamentos de construção, recalques diferenciais, cravação de estacas, tráfego de veículos, vento e explosão (Figura 3). Um modelo tridimensional foi usado para determinar as propriedades modais da estrutura, necessárias para o desenvolvimento dos modelos simplificados de análise modal. Foi considerada a influência dos painéis de vedação externa e divisórias internas no enrijecimento da estrutura, e demonstrado que estas de fato exercem uma participação efetiva, principalmente em estruturas esbeltas e pouco contraventadas. Os resultados apresentados neste trabalho revelam a importância de uma análise detalhada e criteriosa da sensibilidade estrutural estática e dinâmica de edifícios, que podem contribuir para a tomada de decisões quanto a reforço estrutural (aumento de rigidez) ou elaboração do projeto para redução e controle de vibrações excessivas, com a adoção de atenuadores como medida prática para controlar problemas de vibrações acima dos limites aceitáveis.

Vale ressaltar que, visando garantir a integridade estrutural, esse acompanhamento deve ocorrer durante toda a vida útil da edificação, conforme cita Palazzo (2005, p.1): “a garantia da vida útil é dada pelo acompanhamento e monitoração ao longo do tempo”.

Antunes (2007) enfatiza que a monitoração deve possuir acompanhamento dinâmico dos edifícios, com o propósito de evitar desastres e também garantir conforto e segurança do usuário.

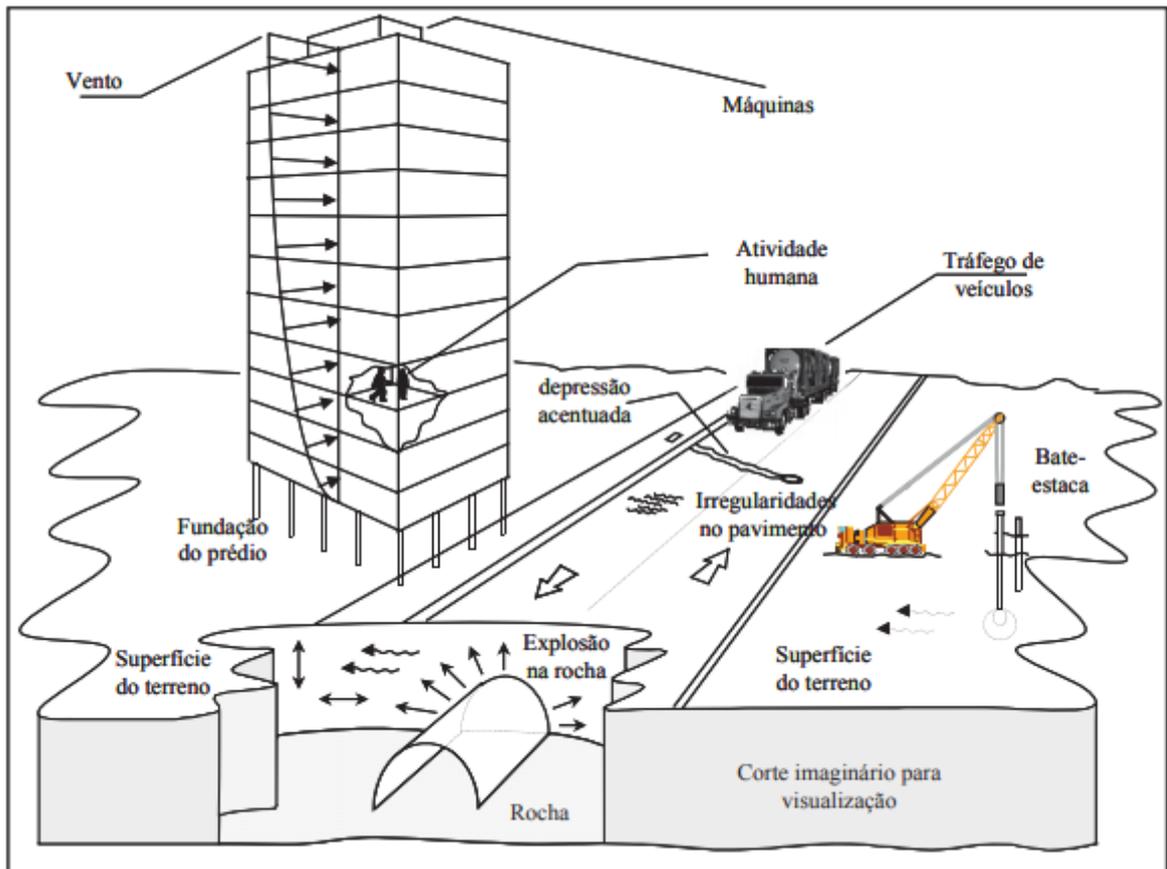


Figura 3 – Situações típicas de vibrações, MOREIRA, 2002, p.11.

Ribeiro et al. (2009) realizaram uma avaliação experimental dos efeitos dinâmicos induzidos pelo vento numa torre de telecomunicações de 177 metros de altura com base num sistema de monitoração permanente (Figura 4). O sistema de monitoração incluiu acelerômetros, anemômetros e uma estação meteorológica, permitindo a caracterização das acelerações máximas da estrutura, e dos regimes de vento durante um período de 3 meses. A análise dos resultados possibilitou a identificação de eventos específicos, denominados eventos críticos, para os quais a resposta dinâmica da torre sob ações do vento surge amplificada. Estes estão diretamente associados ao modo de vibração local relacionado aos movimentos da torre metálica, induzindo movimentos no fuste de concreto. Os resultados comprovam a robustez e eficiência da técnica proposta na identificação da duração e amplitude máxima das acelerações associadas aos eventos críticos.

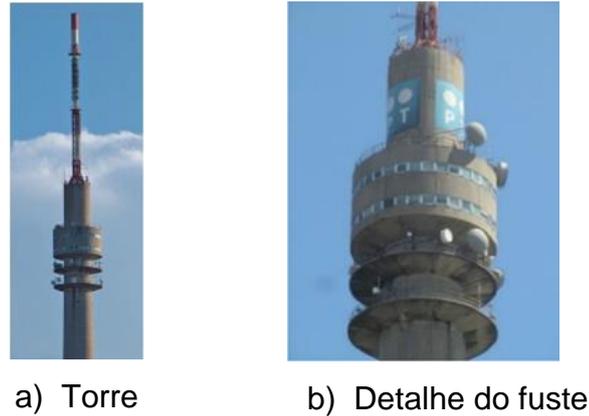


Figura 4 – Torre de telecomunicações, RIBEIRO et al. (2009).

Figueiredo et al. (2011) apontam que a monitoração das estruturas é essencial para uma avaliação estrutural quando se necessita determinar as características e as propriedades do sistema estrutural.

Andrade, Trautwein e Bittencourt (2013) propuseram um plano de monitoração de curta duração para acompanhar o comportamento estrutural de uma ponte rodoviária curva de concreto armado já em serviço. Uma ponte situada na divisa SP-MG foi escolhida para a implantação do plano proposto (Figura 5). Uma hierarquia de seis modelos numéricos foi apresentada, visando avaliar estruturalmente o comportamento da ponte, e juntamente a isto, dados de monitoração foram avaliados e confrontados com os resultados do modelo numérico mais refinado a título de calibração. Visando a monitoração da ponte, empregaram-se técnicas de medição de deformação da estrutura, e suas acelerações e deslocamentos, causados pelo tráfego de veículos. As grandezas foram medidas por meio de extensômetros elétricos de resistência, acelerômetros e transdutores de deslocamento instalados em pontos críticos da estrutura. Em relação a realização da análise numérica da estrutura, foram considerados 5 (cinco) modelos numéricos distintos, de forma a realizar uma composição hierárquica até ser obtido o modelo estrutural melhor refinado e mais representativo do caso. Andrade, Trautwein e Bittencourt (2013) enfatizam que, o refinamento da modelagem numérica por meio de uma hierarquia é importante para aumentar a representatividade do comportamento estrutural do objeto em estudo. Ao aumentar o número de graus de liberdade do modelo numérico e adicionar novos parâmetros inerentes à estrutura, cada ascensão a hierarquia deve ser passível de interpretação e calibração, a fim de que se convirja à resposta experimental que se

tem como base. Ressaltaram ainda, a importância do conhecimento de cada novo parâmetro a ser inserido, pois quanto mais complexo for o modelo, mais propensa à divergência a resposta estará, fator que dificulta a validação dos resultados.



Figura 5 – Ponte rodoviária, ANDRADE, TRAUTWEIN e BITTENCOURT (2013)

Mais recentemente os efeitos causados pelas vibrações induzidas pelo vento em edifícios foram estudados por Lamb et al. (2014). Em sua pesquisa, foi estudada a reação de 53 ocupantes de 47 edifícios comerciais durante oito meses. Durante a investigação foi possível concluir que a vibração pode causar a perda de rendimento no trabalho através de sensações de enjoos, cansaço, baixa motivação e perda de concentração. O estudo alerta para o tempo de duração da vibração, que pode fazer com que o limite para a percepção ocorra para amplitudes de acelerações inferiores.

Marques, Candeias e Costa (2014) estudaram a caracterização dinâmica de um edifício de concreto armado de nove andares (Figura 6) elaborado sem dimensionamento sismo-resistente e construído no final da década de 1970. Neste estudo foram realizados ensaios experimentais de medição das vibrações causadas pela excitação ambiente, bem como a elaboração de um modelo numérico

representativo através do método dos elementos finitos. O principal objetivo deste estudo consistiu no desenvolvimento de um modelo numérico mais refinado para o estudo do comportamento dinâmico da estrutura. Os ensaios de medição de vibrações devidas à excitação ambiente para a caracterização dinâmica do edifício foram realizados utilizando acelerômetros posicionados em pontos estrategicamente escolhidos. Foram efetuadas sete campanhas de medição de vibrações induzidas pela excitação ambiente (provenientes do vento, tráfego, forças geradas por sistemas mecânicos, movimento humano, entre outras), utilizando o sexto piso como referência. O estudo apresentou resultados bastante coerentes em termos de frequências naturais, constatando-se uma diferença máxima em torno de 5%, demonstrando que o estudo apresentou uma calibração de resultados satisfatória, e representou fielmente o comportamento dinâmico da estrutura.

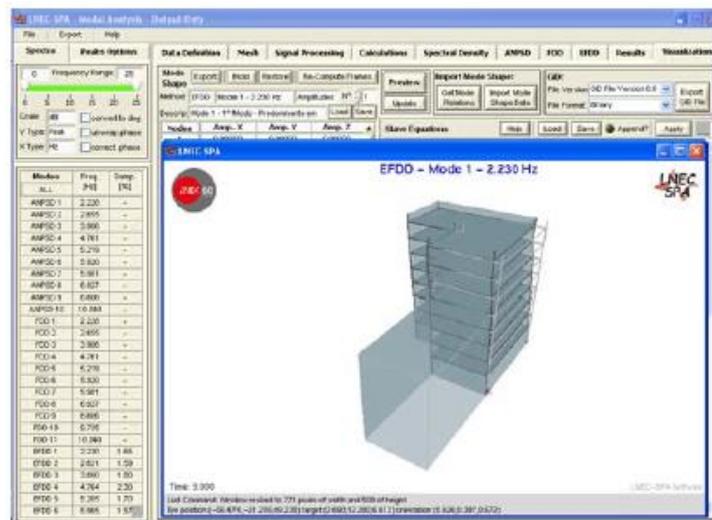


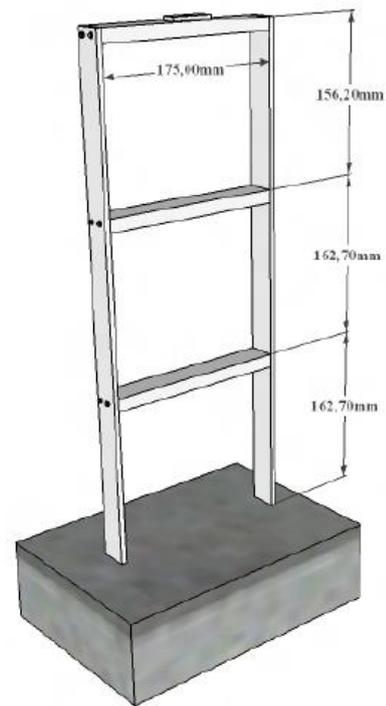
Figura 6 – Modelo do edifício, MARQUES, CANDEIAS e COSTA (2014).

Bolina et al. (2014) elaboraram um modelo de um pórtico em laboratório (Figura 7), visando a realização de um estudo comparativo dos resultados obtidos por meio de cálculo analítico e via análise experimental do comportamento da estrutura submetida à vibrações para validação do modelo. Foram realizados ensaios de vibração livre no pórtico, com excitação horizontal por meio de impacto na laje a altura de 325,40 mm. Foram estudadas as 3 (três) primeiras frequências naturais da estrutura, e ao efetuar a análise comparativa entre os ensaios experimentais e o cálculo analítico, constatou-se diferenças razoavelmente baixas, em torno de 1,09%

em relação à primeira frequência natural ( $f_{01}$ ), 4,42% referente à segunda frequência natural ( $f_{02}$ ) e 8,07% no que tange à terceira frequência natural ( $f_{03}$ ). Os autores Bolina et al. (2014) consideram que, dados os percentuais de erro considerados reduzidos, foram obtidas satisfatoriamente as frequências naturais da estrutura.



a) Modelo físico

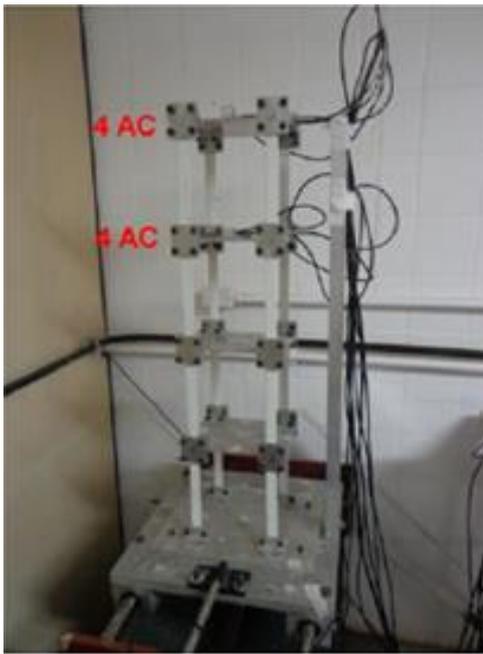


b) esquema

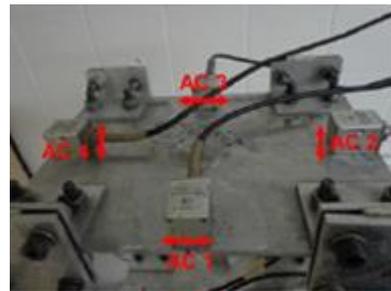
Figura 7 – Modelo do pórtico, BOLINA et al. (2014).

Pereira, Magluta e Roitman (2015) estudaram a análise dinâmica de edifícios submetidos a excitação de base através de um modelo numérico calibrado com resultados experimentais, buscando estudar a resposta dinâmica do edifício e a eficácia do uso de isoladores de base para várias direções de excitação. Foram realizados ensaios experimentais no modelo físico para a identificação dos parâmetros modais. Deste modo, o modelo foi instrumentado com oito acelerômetros localizados nos dois andares superiores de forma que fosse possível identificar os modos de flexão nas duas direções principais de inércia e também os modos de vibração de torção do edifício (Figura 8). Os resultados das frequências naturais da estrutura apresentaram uma boa correlação, quando comparadas as respostas dos ensaios experimentais e as respostas do modelo numérico, com diferença máxima da

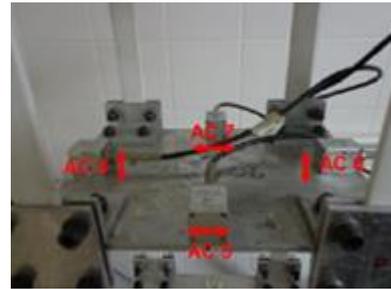
ordem de 5%, demonstrando a boa acurácia dos resultados, com valor de 7,5 Hz na primeira frequência natural, chegando ao valor de 44,11 Hz na sexta frequência natural da estrutura. O estudo mostrou que, ao utilizar base de elastômero, houve uma diminuição sensível na primeira frequência natural da estrutura, passando de 7,54 Hz para 6,00 Hz, bem como um aumento da taxa de amortecimento, passando de 0,38% para 3,39%.



a) Modelo do pórtico



b) Acelerômetros na cobertura



c) Acelerômetros no Pav. Tipo 3

Figura 8 – Modelo instrumentado, PEREIRA, MAGLUTA e ROITMAN (2015)

Em sua dissertação de mestrado, Catulo (2015) realizou uma análise dinâmica de um edifício em alvenaria na cidade de Lisboa, tendo feito a análise da caracterização do edifício original e, através da mesma, constatado que o edifício não cumpriu os requisitos de segurança impostos pelos regulamentos. Propôs-se, então, uma nova análise de caracterização do mesmo edifício com uma solução de reforço que respeita o funcionamento estrutural original. Foi realizado ainda um estudo do desempenho sísmico segundo uma análise estática não linear, e foi constatado que, apesar do desempenho sísmico do edifício reforçado apresentar melhorias significativas e de se ter verificado uma clara redução de danos, o descumprimento dos requisitos se manteve quando comparado com a legislação atual, mas seria

considerado satisfatório, levando em consideração a norma vigente da época da construção.

Brandão et al. (2016) realizaram um estudo *in loco* do comportamento dinâmico da Igreja de Nossa Senhora das Dores (Figura 9), uma capela do início do Século XIX, com realização de ensaios de vibração ambiental, com objetivo de obter as frequências naturais da edificação com foco à calibração do modelo numérico e, a partir dele, realizaram a caracterização modal via Método dos Elementos Finitos, visando analisar o comportamento dinâmico da estrutura no que se refere à obtenção das frequências naturais, modos de vibração e deslocamentos direcionais. Os ensaios de vibração ambiental foram realizados utilizando um acelerômetro triaxial do tipo piezométrico, posicionado alternadamente em cada um dos pontos de interesse observados na estrutura. Foram estudadas as três primeiras frequências naturais da estrutura, e os resultados, quando comparados aos resultados provenientes da análise modal numérica, se mostraram próximos, com diferença máxima encontrada na ordem de 2,6%, demonstrando assim a boa calibração dos valores. Através dos dados coletados nos ensaios, e da correta calibração do modelo numérico, foi possível concluir que a região dos arcos centrais é a região mais crítica da estrutura, pois suas deformações aparecem em quase todos os modos de vibração extraídos, apresentando, devido a sua geometria, valores de deslocamentos consideráveis em muitos destes arcos, podendo-se inferir desta forma que esta região é uma das mais propensas ao surgimento de fissuras.



Figura 9 – Igreja Nossa Senhora das Dores, BRANDÃO et al. (2016).

Mesquita et al. (2016) realizaram um estudo de monitoração estrutural focado na avaliação da confiabilidade de um reservatório elevado de água (Figura 10) através da utilização de um sistema sensorial óptico simplificado. Desta forma, um reservatório elevado de água de concreto armado foi instrumentado com um acelerômetro óptico biaxial e monitorado desde janeiro de 2014, visando a identificação de mudanças de comportamento estrutural que podem comprometer o estado de segurança. A análise de confiabilidade foi realizada baseada na distribuição de valores extremos e os resultados obtidos são ainda utilizados na predição sobre a segurança estrutural do reservatório de água para os próximos 100 anos. A monitoração do reservatório foi realizada empregando-se um acelerômetro óptico, posicionado no topo da estrutura. Nesta análise, particularmente o valor da massa da estrutura poderia influenciar a frequência, devido à variação do nível de água no interior do reservatório. Com base nos deslocamentos obtidos, a estrutura apresenta maior rigidez na direção D2, para a qual valores menores de frequência natural já eram esperados. Dos deslocamentos relativos máximos, foram obtidos histogramas, que mostraram que a direção D1 apresenta mais sensibilidade ao vento. Desta forma, o valor-limite de segurança foi estabelecido e então os índices de confiabilidade calculados. Nessa perspectiva, o sistema de monitoração de confiabilidade baseado no acelerômetro óptico biaxial apresentou alta eficiência e fácil implementação, além de um custo relativamente baixo.

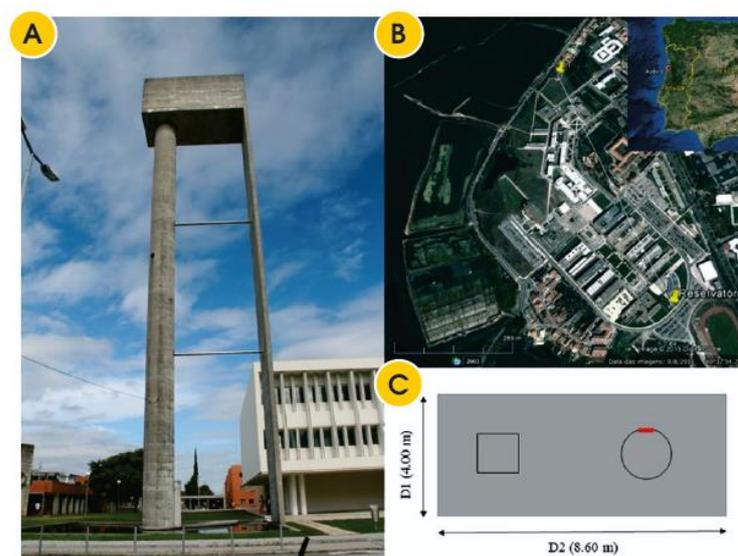


Figura 10 – Reservatório de água elevado, MESQUITA et al. (2016)

Pierdicca et al. (2017) realizaram, no decorrer de um ano, a monitoração experimental do comportamento dinâmico de um edifício escolar em concreto armado sujeito a obras de modernização (Figura 11). Através de técnicas de Análise Modal Operacional (OMA), foi possível acompanhar a evolução dinâmica da estrutura, usando um modelo de elementos finitos como ferramenta de auxílio. Visando a realização da medição experimental da estrutura, foi abordada uma monitoração periódica: várias análises de vibração foram realizadas em quatro etapas durante os trabalhos de modernização do edifício, o que proporcionou a oportunidade de medir a mudança nas características do edifício à medida que a construção avançava. A repetição das análises, em datas distintas, permitiu a validação dos resultados pela comparação e observação de frequências naturais e formas operacionais de deflexão. A análise da frequência de vibração a longo prazo destacou o aumento do desempenho da construção em termos de frequências naturais após as obras de modernização. Graças a realização dos ensaios, e posteriormente a elaboração do modelo numérico, foram identificadas as reais condições operacionais do edifício, e foi possível ter uma imagem clara do comportamento efetivo da estrutura, que é necessário para a avaliação da vulnerabilidade que, de outra forma, era impossível de se obter. Uma conclusão interessante foi obtida durante os experimentos, onde constatou-se que a ausência de painéis de preenchimento foi responsável por uma redução de rigidez de cerca de 20% da estrutura. Na última medição, onde todas as colunas são incrementadas e as paredes de preenchimento são completamente conectadas ao quadro estrutural, foi possível constatar que os novos painéis de preenchimento influenciaram na estrutura, com um incremento de rigidez de 10%. Dados os resultados apresentados durante a análise da estrutura ao decorrer de um ano, este trabalho mostrou-se relevante, onde as técnicas de verificação da vibração da estrutura se mostraram capazes de reproduzir o comportamento dinâmico real da estrutura em seu estado atual.

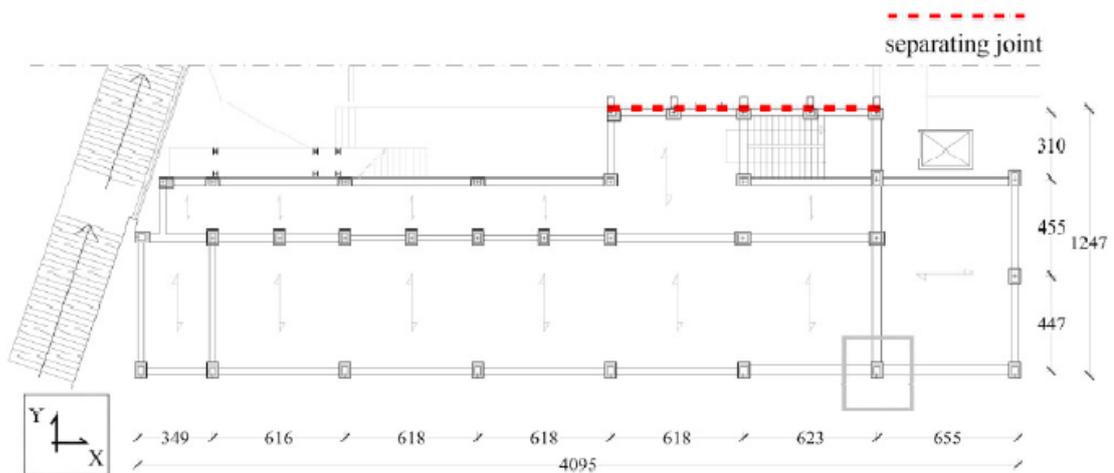


Figura 11 – Esquema do edifício, PIERDICCA et al. (2017).

Bastos et al. (2018) estudaram a caracterização estrutural de um modelo de edifício em HDF (High Density Fiberboard – Painéis de Fibras de Alta Densidade), construído em laboratório (Figura 12), valendo-se da realização de testes de monitoração experimental dinâmica bem como da elaboração de um modelo numérico computacional através do método dos elementos finitos. Em seguida, visando validar as equações de movimento do sistema estrutural, ambas as respostas, numérica e experimental, foram correlacionadas. No que se refere a realização dos testes experimentais, foram utilizadas duas técnicas de medição, SIMO e SISO, onde a técnica SIMO foi realizada utilizando 3 acelerômetros ao longo da altura do edifício, e a técnica SISO foi realizada utilizando um sistema de vibrometria a laser. Na sequência, um teste de vibração forçada também foi realizado na estrutura, baseado na aplicação de cargas de impulso com a utilização de um martelo de impacto conectado a um acelerômetro. Todos os ensaios realizados, tanto os ensaios de vibração livre com técnicas SIMO e SISO, quanto os ensaios de vibração forçada, apresentaram frequências naturais levemente inferiores as frequências obtidas através da análise numérica, com variação máxima ao redor de 3% na direção Z, e 9% na direção X, constatando-se assim a boa calibração do modelo numérico em relação ao real. Este fenômeno é natural, pois na análise numérica, as condições de contorno da estrutura são consideradas de engastamento perfeito, tornando a estrutura do modelo numérico naturalmente mais rígida e, conseqüentemente, com maiores frequências naturais. Com este estudo, Bastos et al. (2018) concluiu que de

fato o modelo de elementos finitos desenvolvido representa a resposta estrutural dinâmica do edifício, com um grau de confiabilidade satisfatório.



Figura 12 – Modelo do edifício em HDF, BASTOS et al. (2018).

Em estudo realizado por I. Silva e J. Silva (2018) foi investigado o comportamento estrutural dinâmico e avaliado o conforto humano de uma passarela real (Figura 13), localizada na Praça da Bandeira, na cidade do Rio de Janeiro, Brasil. Nesta investigação, a monitoração experimental dinâmica da passarela de pedestres investigada foi realizada com base em dois testes diferentes. Inicialmente foram realizadas as medidas de análise modal operacional da estrutura, com base no uso de um acelerômetro digital contido em um smartphone. De outra forma, no que tange aos testes de vibração humana, considerando a caminhada de pedestres no piso da passarela, a resposta estrutural dinâmica foi medida com base no uso de um acelerômetro piezométrico. Através da análise modal numérica da estrutura, foram identificadas as quatro primeiras frequências naturais, onde a primeira ( $f_{01} = 1,99$  Hz) representa um modo de torção, com um valor notadamente muito próximo da frequência da caminhada humana, sendo essa uma das causas mais comuns de problemas de vibração. Através da realização deste estudo, I. Silva e J. Silva (2018) puderam concluir que a passarela investigada se torna desconfortável para os pedestres, conforme se eleva a densidade de tráfego.



a) Vista superior da passarela

b) Vista lateral do modelo estrutural

Figura 13 – Passarela da Praça da Bandeira, I. SILVA e J. SILVA (2018).

Debona e Silva (2019) estudaram, através de monitoração experimental e modelagem numérica, a resposta estrutural dinâmica de uma passarela de pedestres real (Figura 14), que faz a ligação de dois edifícios da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), localizada na cidade do Rio de Janeiro, Brasil. A análise modal da estrutura foi realizada por monitoração experimental dinâmica através de acelerômetros instalados sobre a passarela, bem como por um dispositivo de vibrometria a laser, utilizando as técnicas de aquisição SIMO e SISO, respectivamente. Também foram realizados testes de vibração forçada, com base na aquisição e avaliação das ações dinâmicas provenientes dos pedestres caminhando sobre a passarela, considerando-se diferentes frequências de passo. Além disso, um modelo numérico foi desenvolvido e calibrado, incorporando o efeito da interação dinâmica pedestre-estrutura. A partir dos testes de monitoração experimental dinâmica, e da análise numérica da estrutura, Debona e Silva (2019) determinaram que, a frequência fundamental da passarela de pedestres era de 4,90 Hz, encontrando-se na mesma faixa de frequência do caminhar humano, quando considerado o segundo harmônico de excitação. Com a análise dos resultados obtidos, Debona e Silva (2019) concluíram que a natureza do modelo de carregamento dinâmico adotado, bem como as suas componentes harmônicas é de vital importância para uma boa simulação numérica do caminhar, especialmente no que diz respeito aos valores das acelerações de pico.



Figura 14 – Passarela que conecta os edifícios da UERJ, DEBONA e SILVA (2019)

## Motivação

O elevado crescimento populacional com conseqüente urbanização de grandes centros, tornando reduzidas, disputadas e conseqüentemente caras as áreas úteis de construção, aliados à recente evolução tecnológica dos materiais e dos métodos construtivos e de cálculo adotados nos últimos anos, que possibilitam a construção de edifícios com elementos cada vez mais esbeltos, são fatores que vem transformado o cenário mundial da construção civil, com a construção de edifícios altos surgindo como uma relativamente recente tendência construtiva em todo o mundo. Aliado a estas necessidades, também existe o fato de que a moderna concepção da indústria da construção vem considerando as estruturas como verdadeiras obras de arte, tornando os projetos cada vez mais desafiadores para os engenheiros e arquitetos. Toda esta tendência surge acompanhada de frequentes casos de problemas de vibrações ou oscilações excessivas, fissuração em elementos estruturais e outros danos em elementos arquitetônicos, além do desconforto humano, causados por ações dinâmicas diversas. Tais circunstâncias tem sido razão da motivação do desenvolvimento de inúmeras investigações de caráter científico em busca da resposta dinâmica das estruturas por parte dos engenheiros civis que atuam na área de projetos de estruturas visando suprimir ou ao menos mitigar estes problemas, tornando este tema bastante relevante no cenário acadêmico.

## Objetivos

O objetivo central desta dissertação de mestrado, diz respeito à calibração do comportamento estrutural dinâmico de edifícios, quando submetidos a ações dinâmicas. O trabalho de pesquisa contribui com base no avanço para o desenvolvimento e implementação de técnicas de monitoração experimental dinâmica e, também, modelagem em elementos finitos (MEF). Neste sentido, técnicas de investigação experimental dinâmica, tais como, SIMO (*Single Input Multiple Output*: única entrada e várias saídas) e SISO (*Single Input Single Output*: uma entrada e uma saída), no que tange a obtenção das Funções de Resposta em Frequência (FRF) e, bem como, das Transformadas Rápidas de Fourier (FFT), representativas da relação entre o sinal de saída (*aceleração*) sobre o sinal de entrada (*força*), foram estudadas e utilizadas criteriosamente. Deste modo, ao final deste estudo, a partir do uso dos dados oriundos dos testes experimentais referentes à resposta dinâmica da estrutura, a calibração do modelo numérico computacional foi realizada de maneira mais racional e realista.

## Estrutura da dissertação

No presente capítulo apresentou-se a motivação para o desenvolvimento deste trabalho e uma breve descrição do conteúdo referente ao tema.

No primeiro capítulo apresenta-se o modelo estrutural investigado no presente trabalho visando a realização das análises dinâmicas, apresentando suas características físicas e geométricas.

No segundo capítulo apresenta-se o modelo numérico-computacional tridimensional que representa da forma aproximada o comportamento do sistema estrutural estudado, baseado nas propriedades apresentadas no capítulo um. No modelo numérico desenvolvido são empregadas técnicas usuais de discretização via método dos elementos finitos (MEF).

No terceiro capítulo descrevem-se os equipamentos e softwares utilizados nos ensaios experimentais do edifício. Estes foram realizados por meio da utilização de acelerômetros instalados na estrutura, por um sistema mais moderno de vibrometria a laser (PDV 100) e por métodos mais simplistas utilizando filmagem de vídeo e

acelerômetros acoplados a um smartphone. Também são descritas as ferramentas utilizadas para a excitação da estrutura.

No quarto capítulo serão apresentados os resultados experimentais obtidos através dos ensaios de vibração, de forma a se determinar os autovalores (frequências naturais) e autovetores (modos de vibração) da estrutura.

O quinto capítulo apresenta os resultados das análises de vibração livre e análise transiente do modelo numérico computacional desenvolvido via modelo em elementos finitos. Este modelo foi calibrado com os resultados experimentais apresentados no capítulo anterior.

No sexto capítulo apresentam-se as conclusões alcançadas com este estudo, contendo as considerações e sugestões para continuação do trabalho aqui desenvolvido.

## 1. MODELO ESTRUTURAL INVESTIGADO

### 1.1 Considerações iniciais

O presente capítulo apresenta as informações relativas ao projeto estrutural do edifício em aço construído em laboratório, cujo comportamento dinâmico foi analisado neste trabalho. Serão apresentados os dados referentes à geometria da estrutura, características geométricas das seções e características físicas dos materiais utilizados.

### 1.2 Modelo estrutural do edifício

O modelo estrutural investigado corresponde a uma estrutura construída em laboratório que representa um edifício de 5 (cinco) andares totalmente em aço (ver Figuras 15 a 18). O sistema estrutural tem como base a utilização de lajes metálicas apoiadas diretamente nos pilares (Figura 19), não existindo vigas na estrutura.

A estrutura corresponde a um edifício fictício com 150 cm de altura (Figura 23) composto por cinco lajes de dimensões 30 cm x 60 cm e com 0,308 cm de espessura, conectadas a seis pilares de 0,308 cm x 1,005 cm de seção transversal que vão da base ao topo da estrutura (ver Figuras 24 a 26). Os pilares se conectam a uma placa de base de dimensões 41,3 cm x 70 cm e com 0,97 cm de espessura (Figura 20). O edifício possui um pé direito de 29,7 cm.

Com referência às características físicas do aço, este possui um módulo de elasticidade igual a 210 GPa, coeficiente de Poisson igual a 0,3 ( $\nu = 0,3$ ) e densidade de 7700 kg/m<sup>3</sup> ( $\rho = 7700$  kg/m<sup>3</sup>).

Cabe ressaltar que a estrutura apresenta diversas imperfeições geométricas em sua confecção, tais como: desaprumo e falta de retilineidade de alguns pilares, excentricidades de pilares nas ligações com os cantos das lajes e empenamento, tanto de algumas lajes, quanto da placa de base da estrutura. Outros tipos de imperfeição quando na fabricação da estrutura são notadas em algumas das ligações entre lajes e pilares, onde observa-se uma soldagem realizada de forma rudimentar, sem as

orientações e cuidados necessários relacionados as boas práticas de soldagem estrutural.

Visando minimizar possíveis movimentações indesejadas na base da estrutura, a mesma foi engastada, com o auxílio de grampos sargento, a uma placa de aço altamente rígida de dimensões 60 cm x 60 cm e com 3,7 cm de espessura (Figura 21). Em ambas as análises (experimental e numérica), a estrutura estará orientada com os eixos Z e X, sendo Z relacionado a direção de menor inércia do conjunto estrutural e X referente a direção de maior inércia (Figura 22).



Figura 15 – Vista tridimensional da estrutura



Figura 16 – Vista frontal da estrutura



Figura 17 – Vista lateral da estrutura.



Figura 18 – Vista superior da estrutura.



Figura 19 – Detalhe das conexões dos pilares com as lajes.



Figura 20 – Detalhe das conexões dos pilares com a placa de base.



Figura 21 – Detalhe do engastamento da placa de base da estrutura

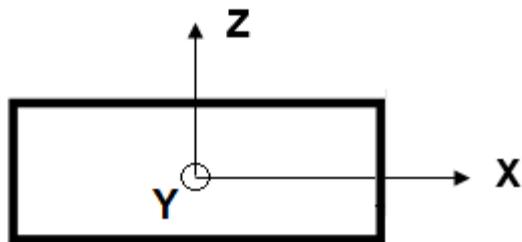


Figura 22 – Orientação considerada para os eixos do modelo estrutural

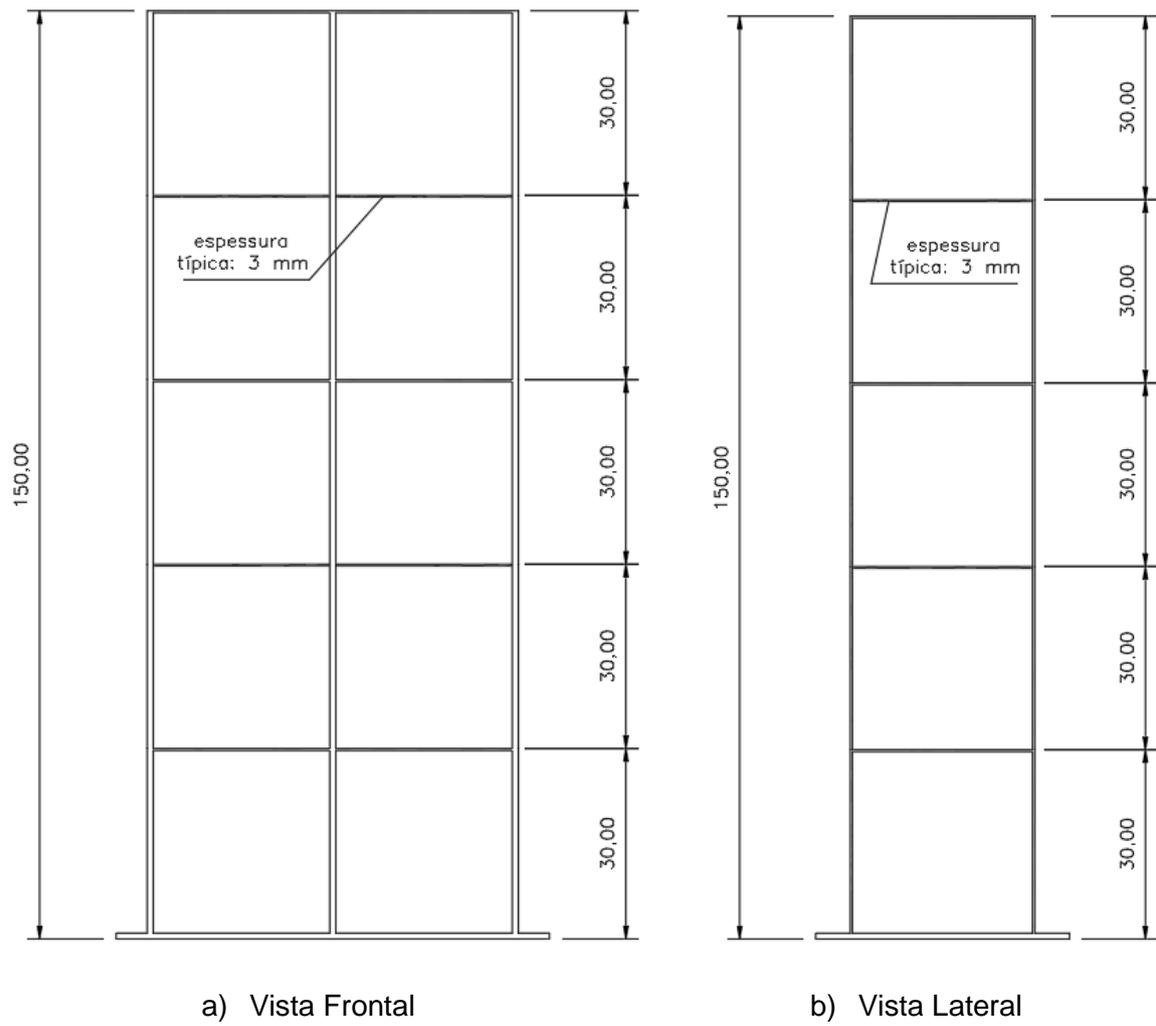


Figura 23 – Projeto estrutural. Dimensões: centímetros, exceto onde indicado.

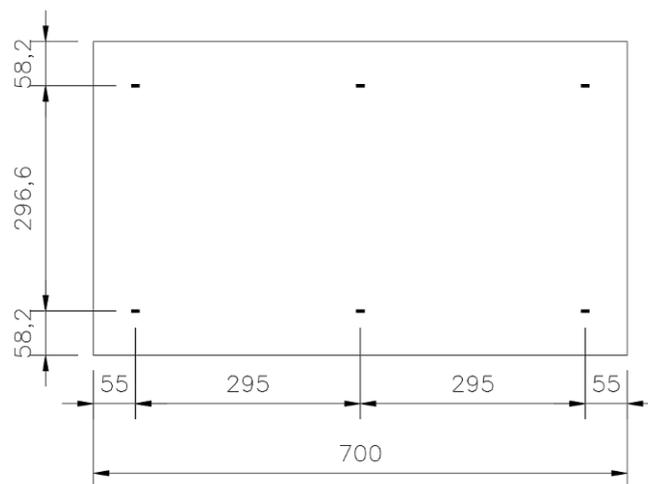


Figura 24 – Projeto estrutural: Planta do Pav. Térreo. Dimensões: milímetros.

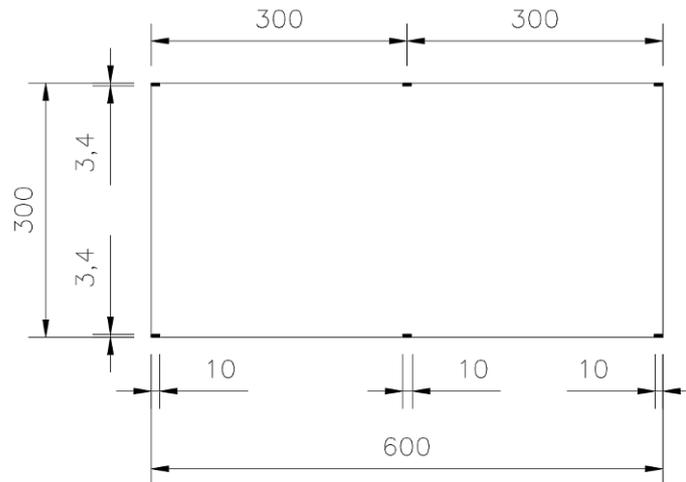


Figura 25 – Projeto estrutural: Planta do Pav. Tipo. Dimensões: milímetros



Figura 26 – Projeto estrutural: Planta da Cobertura. Dimensões: milímetros

### 1.3 Grampos “sargento”

No projeto foram utilizados quatro grampos “sargento” para fixar a placa de base da estrutura a uma placa de aço rígida. Os grampos foram posicionados junto aos quatro pilares de canto da estrutura, com o intuito de melhorar as condições de engastamento da base estrutural com o solo (Figura 21).

### 1.4 Placa de aço

No projeto foi utilizada uma placa de aço (Figura 21) de dimensões 60 cm x 60 cm e com 3,7 cm de espessura, com o objetivo de ser conectada a placa de base da estrutura com o auxílio de grampos “sargento” para fornecer melhores condições de engastamento à base da estrutura, se aproximando ao máximo da real condição de

contorno. Devido a sua elevada espessura, para fins de cálculo, a placa de aço foi considerada como sendo infinitamente rígida.

### 1.5 Considerações do capítulo

O modelo estrutural investigado foi apresentado com as características referentes ao sistema físico utilizado no desenvolvimento do presente estudo, necessárias para o desenvolvimento da modelagem numérico-computacional da estrutura. Observa-se que, a estrutura real tem inúmeras imperfeições geométricas quando comparada com o projeto estrutural, tais como as excentricidades nos pilares, imperfeições nas ligações entre pilares e lajes e condições de contorno. Vale ressaltar que estas imperfeições não serão reproduzidas no modelo numérico.

## 2. MODELO NUMÉRICO-COMPUTACIONAL

### 2.1 Considerações iniciais

No capítulo 1 foram apresentadas todas as propriedades referentes à estrutura do edifício. No presente capítulo, as propriedades apresentadas serão utilizadas para tornar possível o desenvolvimento do modelo numérico-computacional tridimensional que representa, de forma aproximada, o comportamento do sistema estrutural estudado. No modelo numérico desenvolvido, são empregadas técnicas usuais de discretização, via método dos elementos finitos, por meio do emprego do programa ANSYS (Ansys (2009)). Neste modelo, os pilares são simulados por elementos finitos de pórtico BEAM44, onde os efeitos de flexão e torção são considerados, e as lajes são simuladas por elementos finitos de casca SHELL63.

### 2.2 Modelo computacional

Neste trabalho de pesquisa um modelo numérico-computacional foi desenvolvido de maneira a representar de forma aproximada o comportamento estrutural do edifício em aço investigado. Este modelo foi utilizado na análise modal (vibração livre) e na análise transiente, onde foi avaliado o comportamento dinâmico da estrutura.

O modelo computacional tridimensional, desenvolvido para a análise dinâmica do edifício, foi gerado utilizando-se técnicas usuais de refinamento de malha presentes nas simulações do método dos elementos finitos implementadas pelo programa computacional de análise estrutural ANSYS (Ansys (2009)). O refinamento da malha das lajes e da placa de base se deu de forma a serem gerados elementos finitos distribuídos da ordem de 2,5 por 2,5 centímetros. O refinamento da malha dos pilares se deu de forma a serem gerados elementos finitos distribuídos da ordem de 2,5 cm. Cabe ressaltar que foram realizados todos os testes necessários para a convergência da malha em elementos finitos desenvolvida e os autores entendem que o tamanho adotado para os elementos conduz a uma excelente convergência numérica.

Em seguida, as Figuras 27 a 29 mostram o modelo em elementos finitos do edifício analisado, onde pode ser verificada a discretização dos elementos estruturais.

Na sequência do texto, a Tabela 1 descreve as características gerais do modelo em elementos finitos desenvolvido para a realização do presente estudo.

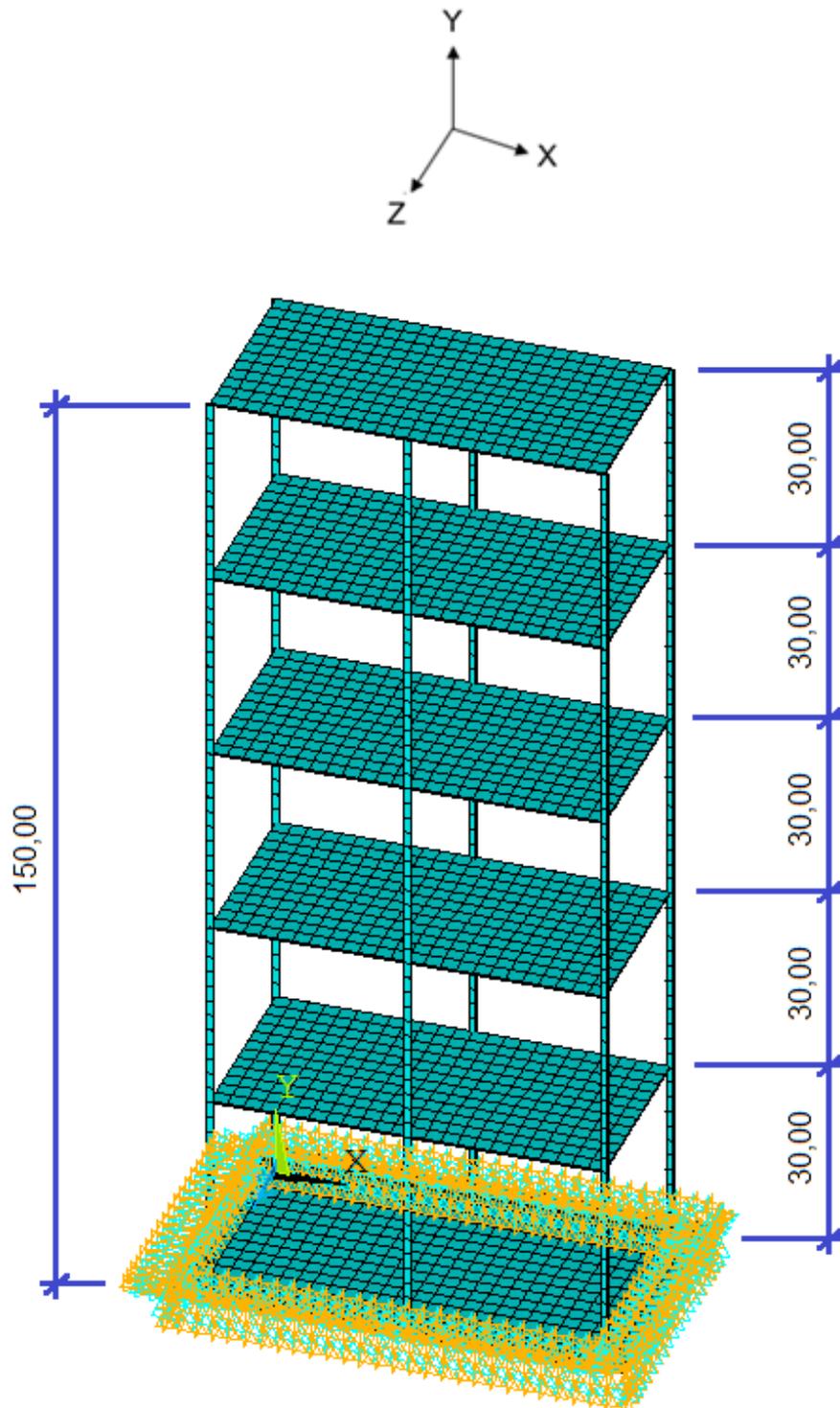


Figura 27 – Vista tridimensional do MEF. Dimensões: centímetros.

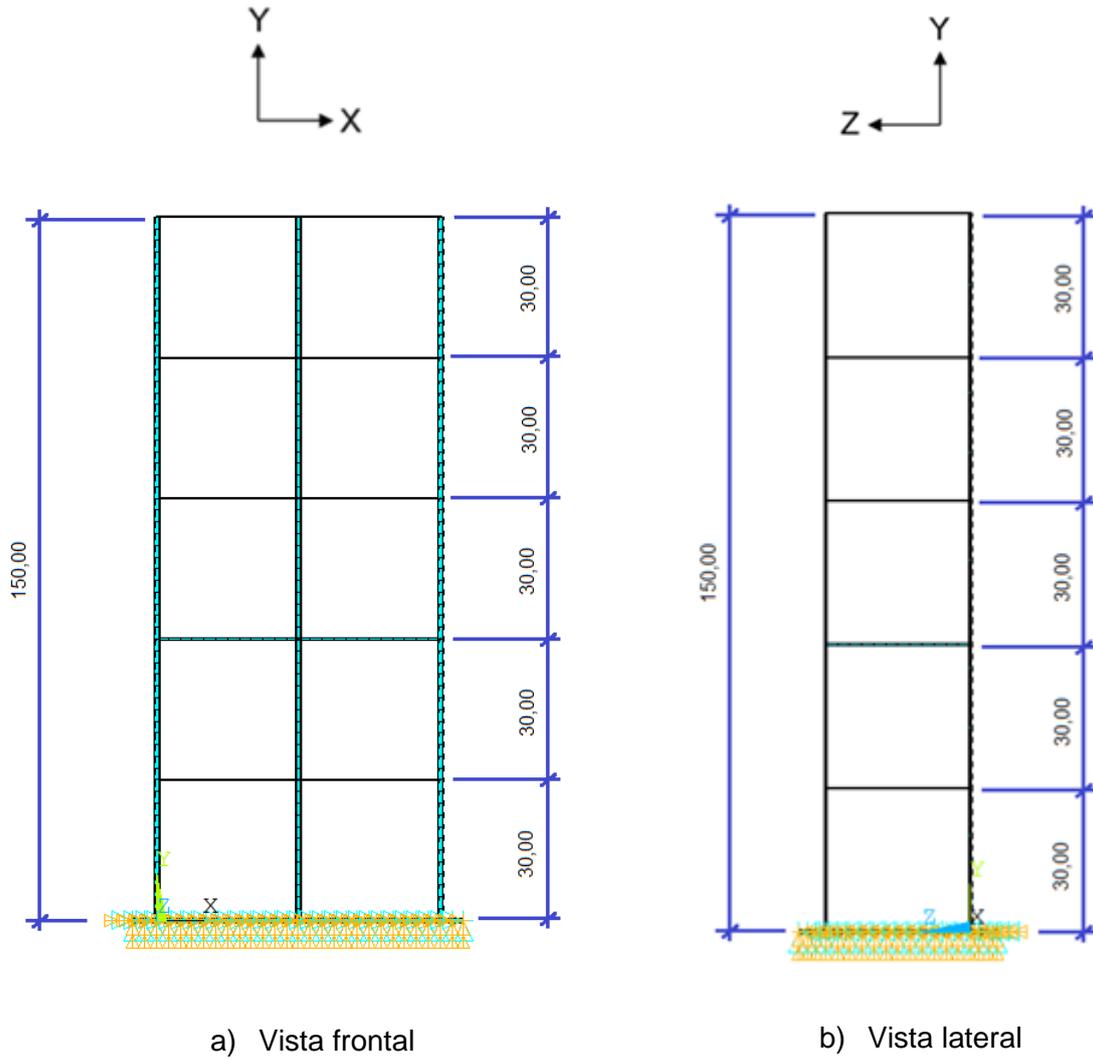


Figura 28 – Vistas em elevação do MEF. Dimensões: centímetros.

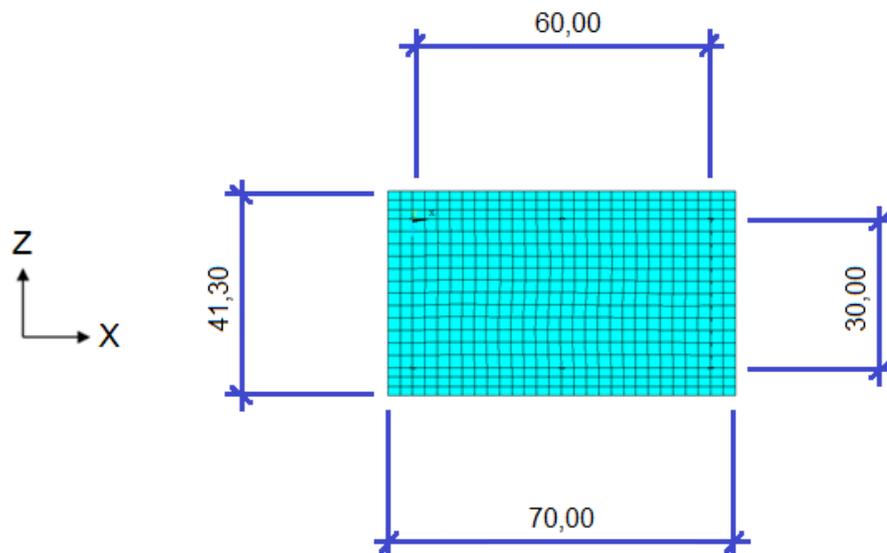


Figura 29 – Vista superior do MEF. Dimensões: centímetros.

Tabela 1 – Dados gerais sobre o modelo.

Dados	Quantidade
Número de graus de liberdade	14484
Número de nós	2506
Número de elementos (BEAM44)	360
Número de elementos (SHELL63)	1944
Número de elementos	2304

### 2.3 Modelagem do amortecimento estrutural

Denomina-se amortecimento o processo pelo qual a energia do movimento vibratório é dissipada. Todavia, a avaliação do amortecimento estrutural é uma tarefa complexa que não pode ser determinada através da geometria da estrutura, das dimensões dos elementos estruturais e do amortecimento dos materiais, segundo Clough e Penzien (1993).

Segundo Chopra (2007) é impossível determinar a matriz de amortecimento de um sistema estrutural através das propriedades de amortecimento de cada elemento que compõe a estrutura da maneira como é determinada a matriz de rigidez, por exemplo. Isto ocorre porque, ao contrário do módulo de elasticidade, que é utilizado na computação da rigidez, as propriedades de amortecimento dos materiais não são bem estabelecidas.

Ainda que estas propriedades fossem conhecidas, de acordo com Chopra (2007), a matriz de amortecimento resultante não levaria em conta uma parte significativa da energia dissipada através do atrito nas ligações em estruturas metálicas. Algumas destas fontes de dissipação de energia são extremamente difíceis de serem identificadas.

A avaliação física do amortecimento de uma estrutura só é considerada corretamente medida se seus valores são obtidos através de ensaios experimentais. Entretanto, a realização destes ensaios muitas das vezes demanda tempo e custo que na maioria dos casos é muito elevado. Por esta razão, o amortecimento é geralmente

obtido em termos de taxas de contribuição, ou taxas de amortecimento modal, Clough e Penzien (1993).

Com este intuito, é habitual utilizar-se a matriz de amortecimento de Rayleigh, que considera duas principais parcelas, uma relativa à taxa de contribuição da matriz de massa ( $\alpha$ ) e outra à taxa de contribuição da matriz de rigidez ( $\beta$ ), conforme pode ser observado através da Equação 1. Define-se  $\mathbf{M}$  a matriz de massa e  $\mathbf{K}$  a matriz de rigidez do sistema, Craig Jr. (1981), Clough e Penzien (1993) e Chopra (2007).

$$\mathbf{C} = \alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{K} \quad (1)$$

A Equação 1 pode ser reescrita, em termos de taxa de amortecimento modal e frequência natural circular (rad/s), como:

$$\xi_i = \frac{\alpha}{2\omega_{0i}} + \frac{\beta\omega_{0i}}{2} \quad (2)$$

Onde:

$\xi_i$  = Taxa de amortecimento do i-ésimo modo;

$\omega_{0i}$  = Frequência natural circular referente ao i-ésimo modo.

Isolando  $\alpha$  e  $\beta$  da Equação 2, para duas frequências naturais mais importantes, obtêm-se as Equações 3 e 4.

$$\alpha = 2\xi_1\omega_{01} - \beta\omega_{01}\omega_{01} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{2(\xi_2\omega_{02} - \xi_1\omega_{01})}{\omega_{02}\omega_{02} - \omega_{01}\omega_{01}} \quad (4)$$

A partir de duas frequências naturais mais importantes para a análise dinâmica do problema em questão torna-se possível descobrir os valores dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ . Em geral, a frequência natural  $\omega_{01}$  é tomada como a menor frequência natural, ou frequência fundamental da estrutura, e  $\omega_{02}$  como a segunda frequência mais importante no carregamento.

Na literatura técnica Craig Jr. (1981), Clough e Penzien (1993) e Chopra (2007) são encontradas diversas recomendações sobre o amortecimento estrutural. Entretanto, tais recomendações surgem com grande variabilidade, o que dificulta a utilização em projetos estruturais nos quais se deseja atingir certo grau de confiabilidade e sistematização. Além disso, existe uma grande variedade de formas de se considerar o amortecimento estrutural nos programas de análise numérica, as quais, caso sejam utilizadas de forma incorreta, fornecem resultados que não correspondem a uma situação real. Por exemplo, Murray et al. (2003) apresenta valores recomendados de amortecimento para inúmeros sistemas estruturais, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Recomendações para amortecimento  $\xi$ , MURRAY et al (2003, p.18).

Tipo de construção	Amortecimento $\xi$
Escritórios, residências e igrejas	0,02 - 0,05
Shopping centers	0,02
Passarelas internas	0,01
Passarelas externas	0,01

Com base nestes dados aqui apresentados e nos resultados experimentais obtidos dos ensaios realizados ao longo deste trabalho de pesquisa foi utilizado um coeficiente de amortecimento de 0,25% ( $\xi = 0,25\%$  ou 0,0025) na direção Z e 0,50% ( $\xi = 0,50\%$  ou 0,005) na direção X (ver itens 4.3.1 e 4.3.2). Esta taxa de amortecimento leva em conta a existência de poucos elementos que contribuem para o amortecimento da estrutura (tanto na direção Z como na direção X). A Tabela 3 apresenta os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  utilizados nas análises de vibração forçada, para a modelagem do amortecimento estrutural, via método dos elementos finitos.

Tabela 3 – Parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  usados na análise transiente.

Direção	$f_{01}$ (Hz)	$f_{02}$ (Hz)	$\omega_{01}$ (rad/s)	$\omega_{02}$ (rad/s)	$\alpha$	$\beta$
Z	2,22	6,56	13,95	41,22	0,0538	0,000094
X	4,15	13,72	26,07	86,20	0,2001	0,000089

## 2.4 Considerações do capítulo

Um modelo numérico-computacional foi desenvolvido para este estudo, indicando as características geométricas e físicas, de forma a caracterizar com clareza a estratégia adotada no desenvolvimento do modelo via método dos elementos finitos, por meio do emprego do programa computacional ANSYS (Ansys (2009)). A discretização da malha dos pilares foi executada com elementos BEAM44 (da ordem de 2,5 cm) onde os efeitos de flexão e torção são considerados, e com 6 graus de liberdade em cada nó, sendo deslocamentos e rotações nas três direções (eixos x, y e z), e a discretização da malha das lajes foi executada com elementos SHELL63 (da ordem de 2,5 cm por 2,5 cm) com capacidades de flexão e membrana com seis graus de liberdade em cada nó, sendo deslocamentos e rotações nas três direções (eixos x, y e z). Foram também demonstrados o cálculo dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  que serão necessários para a realização da análise transiente do modelo numérico no item 5.4.

### 3. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA MONITORAÇÃO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Considerações iniciais

Os ensaios experimentais da estrutura analisada foram possíveis com a utilização de equipamentos específicos para monitoração dinâmica, disponíveis no mercado nacional e internacional. Abaixo são apresentadas todas as características dos equipamentos que foram adquiridos pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro para a realização desta dissertação de mestrado.

#### 3.2 Acelerômetros

Nos ensaios experimentais do edifício foram utilizados os acelerômetros da marca *Dytran* (Transdutor de Aceleração Capacitivo Uniaxial) e *Kyowa* (Resistivo Uniaxial).

##### 3.2.1 Capacitivo (Dytran)

O funcionamento básico do acelerômetro capacitivo *Dytran* está relacionado à capacitância variável do circuito em função da oscilação, podendo-se medir, conseqüentemente, a variação de voltagem. É necessário identificar a sensibilidade do acelerômetro (geralmente em mV/g) a ser utilizado ao sistema de aquisição.

As Figuras 30 e 31 apresentam um modelo típico dos acelerômetros *Dytran* utilizados nos ensaios experimentais e seus respectivos conectores. Os dados dos acelerômetros utilizados da marca *Dytran* estão descritos na Tabela 4.



Figura 30 – Acelerômetro Dytran (transdutor de aceleração capacitivo).



Figura 31 – Acelerômetro Dytran. Conector fêmea (esq.) / Conector macho (dir.).

Tabela 4 – Acelerômetro Dytran - Parâmetros de cada equipamento.

Modelo	Número de série	Eixo de medição	Faixa de entrada (g)	Faixa de frequência (Hz)	Sensibilidade (mV/g)
7521A1	3051	uniaxial	2	0-1500	549,27
7521A1	3053	uniaxial	2	0-1500	530,62

### 3.2.2 Resistivo (Kyowa)

O sensor do acelerômetro resistivo *Kyowa* funciona como um extensômetro (*strain gauge*). Desse modo, pode-se medir a variação de sua resistência através da ponte de *Wheatstone* e, assim, obter tanto a variação de voltagem quanto a deformação. Portanto, é necessário indicar ao sistema de aquisição um fator de engenharia (*shunt eng*) de modo que a deformação e a aceleração sejam relacionadas. As Figuras 32 e 33 apresentam um modelo típico do acelerômetro *Kyowa* utilizado nos ensaios experimentais e seus respectivos conectores. Os dados dos acelerômetros utilizados da marca *Kyowa* estão descritos na Tabela 5.



Figura 32 – Acelerômetro Kyowa (transdutor de aceleração resistivo).



Figura 33 – Acelerômetro Kyowa. Conector macho (esq.) / Conector fêmea (dir.).

Tabela 5 – Acelerômetro Kyowa – Parâmetros de cada equipamento.

Modelo	Número de série	Eixo de medição	Faixa e entrada (m/s <sup>2</sup> )	Faixa de Frequência (Hz)	Shunt eng
FU	5900024	uniaxial	9,807	0 - 45	7,233505
FU	5900022	uniaxial	9,807	0 - 41	6,501486

### 3.3 ADS 2002 (Sistema de Aquisição de Dados)

O Sistema de Aquisição de Dados ADS 2002 foi utilizado para medir e gravar as respostas das acelerações obtidas nos ensaios experimentais. O sistema ADS 2002 é fabricado pela LYNX Tecnologia Eletrônica LTDA. Este sistema de aquisição de dados é baseado em condicionadores de sinais, que transformam o sinal da variação elétrica em valor de engenharia (deformação específica, aceleração, força, etc.), controlados por um computador, conforme Figuras 34 a 36.



Figura 34 – Sistema ADS 2002 – vista frontal.



Figura 35 – Sistema ADS 2002 – vista traseira.

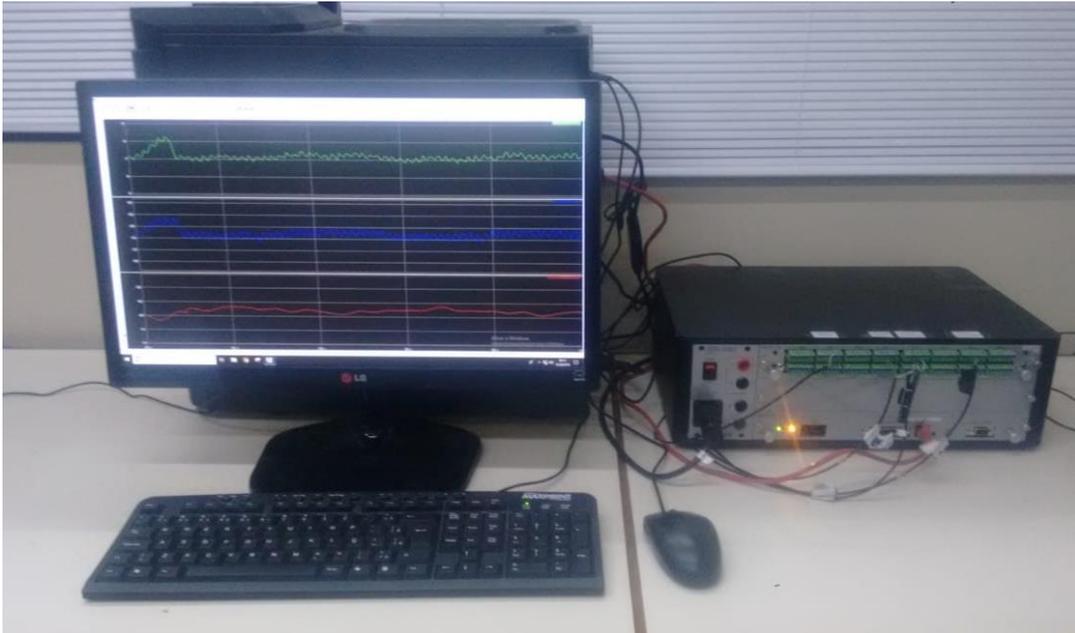


Figura 36 – Sistema ADS 2002 acoplado ao computador.

Junto com o sistema de aquisição de dados ADS 2002, também é fornecido pela LYNX Tecnologia Eletrônica LTDA os softwares *AqDados* e *AqDAnalysis*. O Software *AqDAnalysis* é um programa de análise de sinais que permite o pós-processamento dos sinais armazenados em séries temporais, bem como a sua visualização em forma gráfica ou em forma de tabela de dados dos arquivos, que são obtidos utilizando o software *AqDados*. As Figuras 37 e 38 demonstram as telas dos softwares *AqDados* e *AqDAnalysis*, respectivamente.

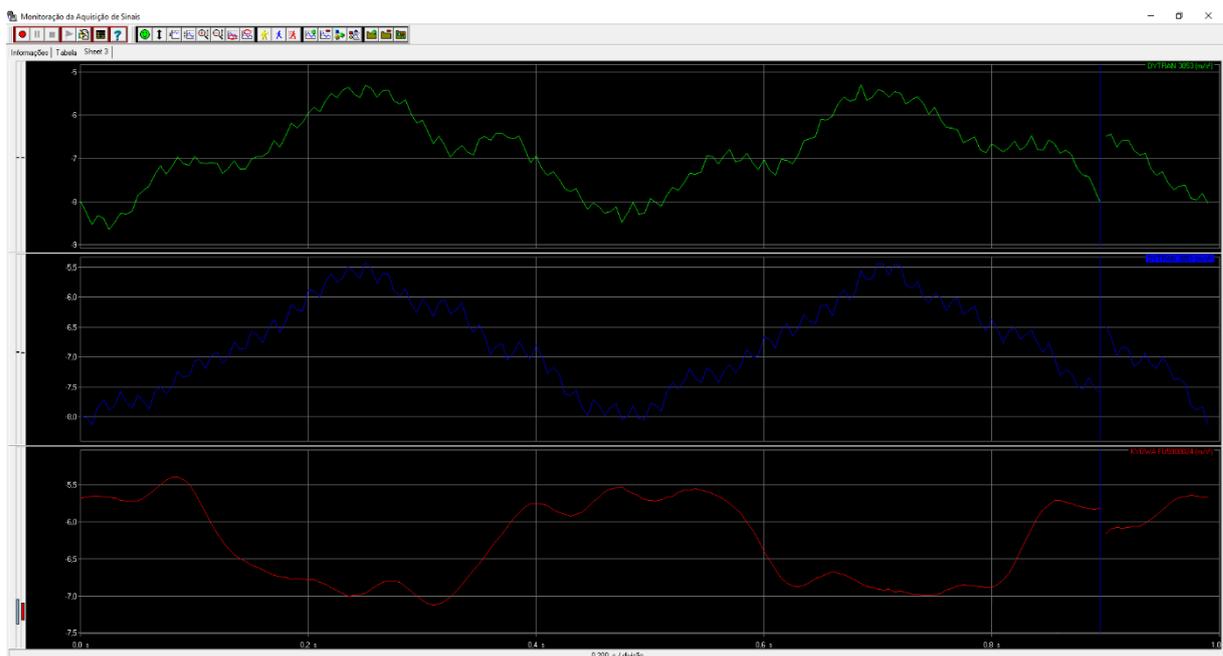


Figura 37 – Software *AqDados*.

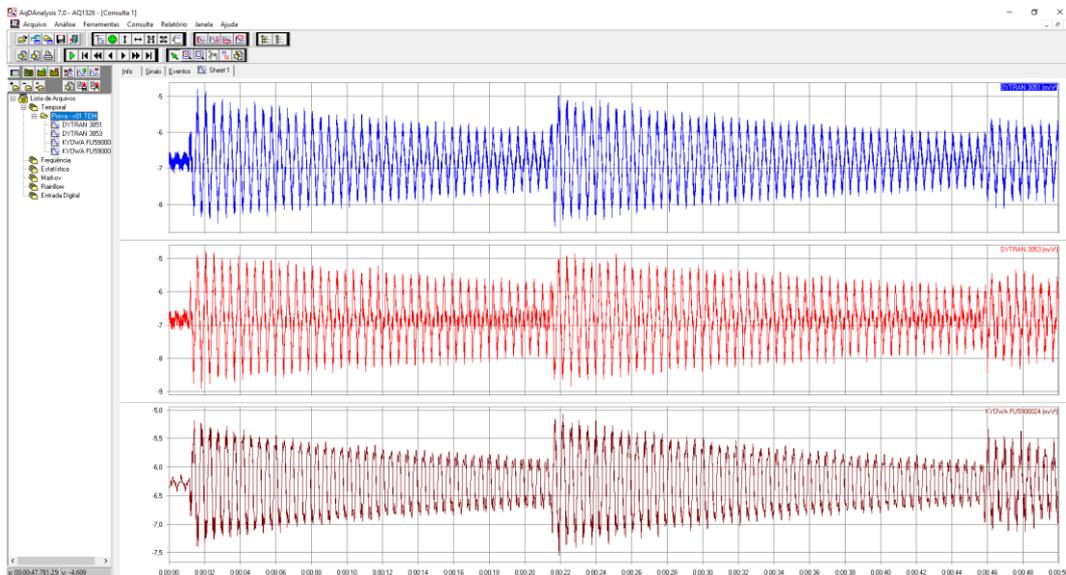


Figura 38 – Software AqDAnalysis.

### 3.4 PDV 100 (Sistema de Vibrometria à Laser)

O equipamento *PDV 100 (Vibrômetro Digital Portátil)* de vibrometria a laser, da Polytec tem o seu funcionamento básico na metodologia de vibrometria a laser relacionado a um feixe de laser focado na estrutura ensaiada de modo que a velocidade do movimento relativo entre a estrutura e o equipamento possa ser medida através do efeito “*Doppler*”, ou seja, pela variação da frequência assim como do comprimento de onda do feixe de luz incidido e refletido na estrutura, Prislán (2008). As Figuras 39 a 45 apresentam o equipamento *PDV 100*, o sistema de aquisição de dados e suas conexões de saída e alimentação do equipamento.



Figura 39 – PDV 100. Vista superior.



Figura 40 – PDV 100. Vista lateral.



Figura 41 – PDV 100. Vista inferior.



a) Vista frontal



b) Vista traseira

Figura 42 – PDV 100. Vistas.



Figura 43 – PDV 100. Placa de identificação.



Figura 44 – PDV 100. Sistema de aquisição de dados (USB).

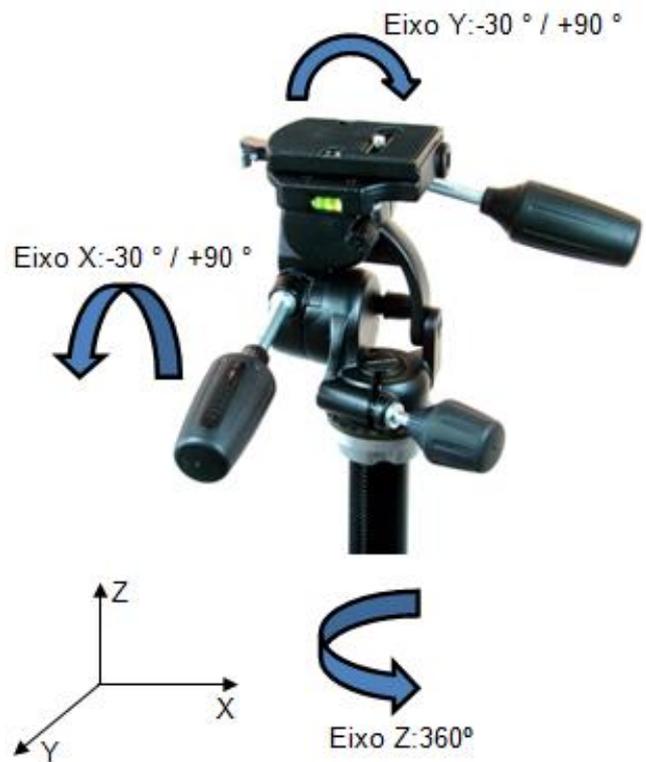


Figura 45 – PDV 100. Conexões de saída e alimentação.

O aparelho de medição (*PDV 100*) é suportado por um tripé (também utilizado para fotografia e filmagem profissional) recomendado pelo fabricante *Polytec*. A cabeça do tripé possui três graus de liberdade relativos à rotação (Figura 46), permitindo, portanto, a escolha do ângulo mais adequado para cada tipo de estrutura e/ou medição. O tripé possui indicadores para a verificação do alinhamento (níveis) em relação ao referencial escolhido, como mostra a Figura 46. Para a realização de ensaios experimentais, o equipamento *PDV 100* é conectado ao sistema de aquisição de dados via conexão de saída (Figura 47) e a alimentação de energia elétrica, como visto na Figura 45.



a) Detalhe do PDV 100 sobre o tripé



b) Controle de movimento da cabeça do tripé

Figura 46 – PDV 100. Detalhes.



a) Conexão do sistema de aquisição



b) Sistema de aquisição

Figura 47 – PDV 100 conectado ao sistema de aquisição.

Junto com o equipamento *PDV 100*, a *Polytec* forneceu o programa de aquisição de dados e pós-processamento “*Polytec Vibrometer Software*”, veja Figura 48.

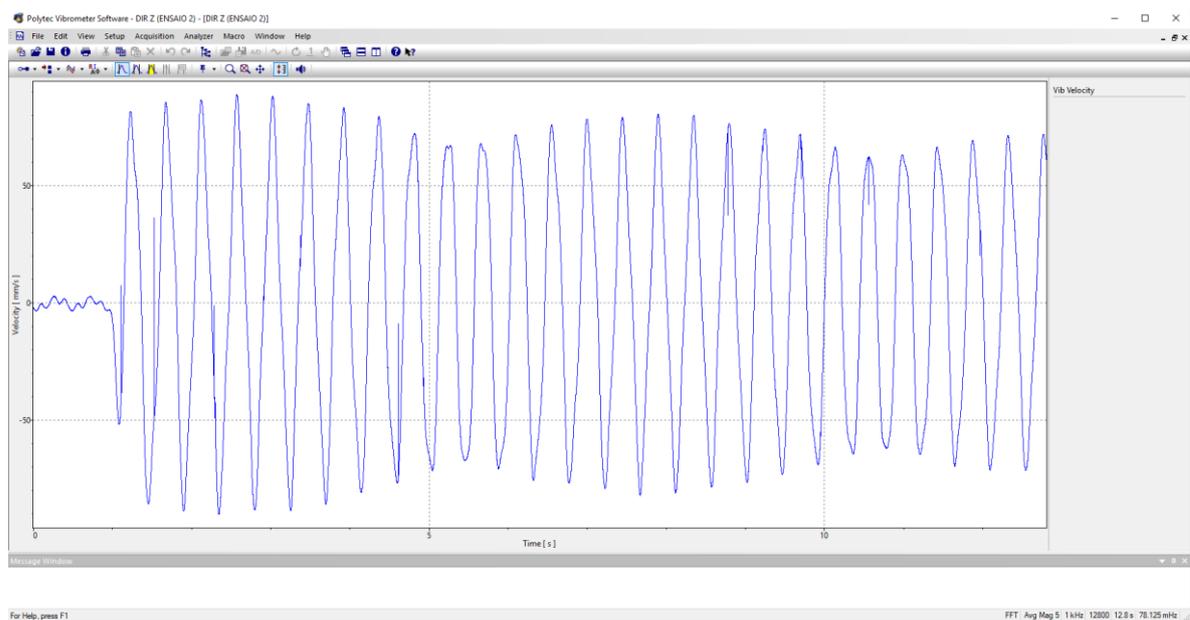


Figura 48 – Polytec Vibrometer Software.

### 3.5 Martelo de Impacto

A utilização de um martelo de impacto é a forma mais simples e rápida de excitação de estruturas. O martelo de impacto é idêntico à forma de um martelo convencional, e é constituído por “cabeça”, transdutor de força, ponteira e cabo (Figura 49). O equipamento é usualmente completado por um conjunto de pontas com rigidezes diferentes e um conjunto de “cabeças” com diferentes massas. O transdutor de força é utilizado para detectar a magnitude da força aplicada pelo martelo, que é considerada como de igual intensidade e em sentido oposto à recebida pela estrutura.

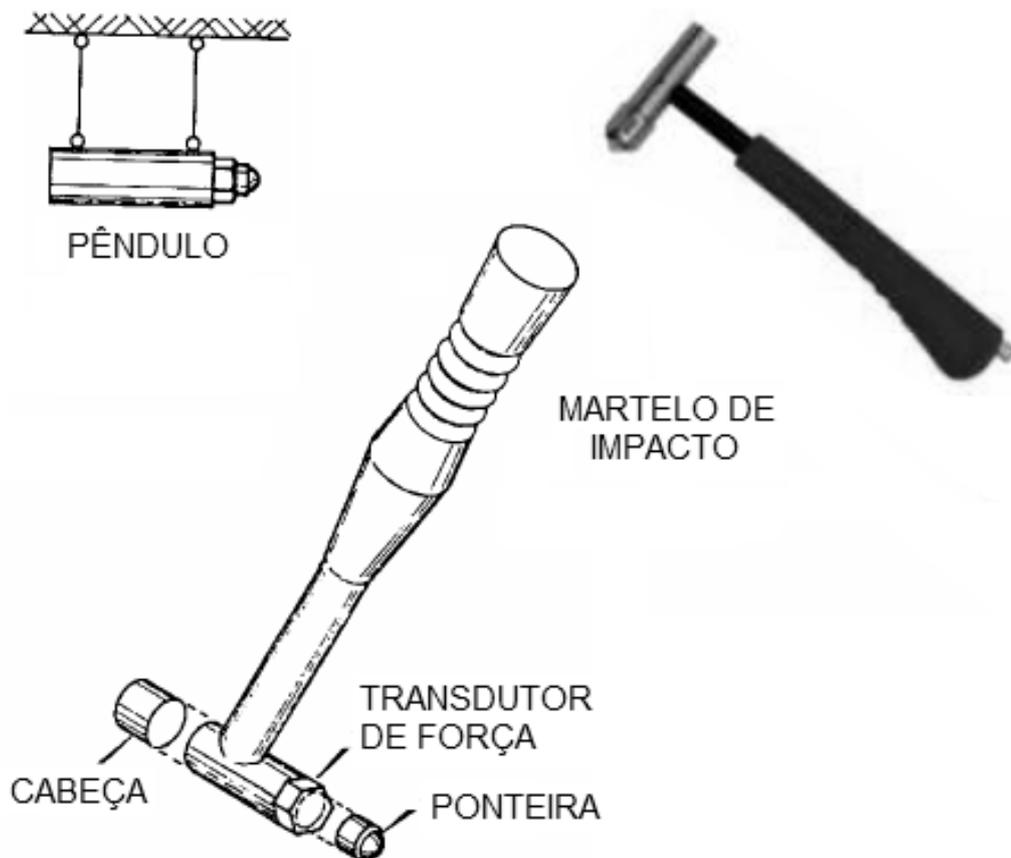


Figura 49 – Detalhes de um martelo de impacto, BILOSOVÁ (2011, p. 81)

A magnitude da força proveniente do impacto é basicamente determinada pela massa da “cabeça” do martelo e a velocidade com a qual o mesmo se move quando atinge a estrutura. O operador controla a velocidade ao invés do nível da força propriamente dito, e assim, a forma apropriada de ajustar a magnitude da força aplicada é através da variação da massa da “cabeça” do martelo.

A faixa de frequência que é efetivamente excitada por este tipo de dispositivo é

controlada pela rigidez das superfícies de contato e pela massa da “cabeça” do martelo.

A excitação produzida por um martelo de impacto tem uma configuração típica traduzida pela Figura 50, que corresponde basicamente a um pulso senoidal. Um pulso deste tipo possui um espectro com a forma ilustrada na Figura 50. É possível notar que a composição espectral do sinal depende da duração do pulso, sendo a região quase plana do espectro, tão mais extensa, quanto mais curta for à duração do pulso, ou seja, quanto maior a rigidez da ponta utilizada.

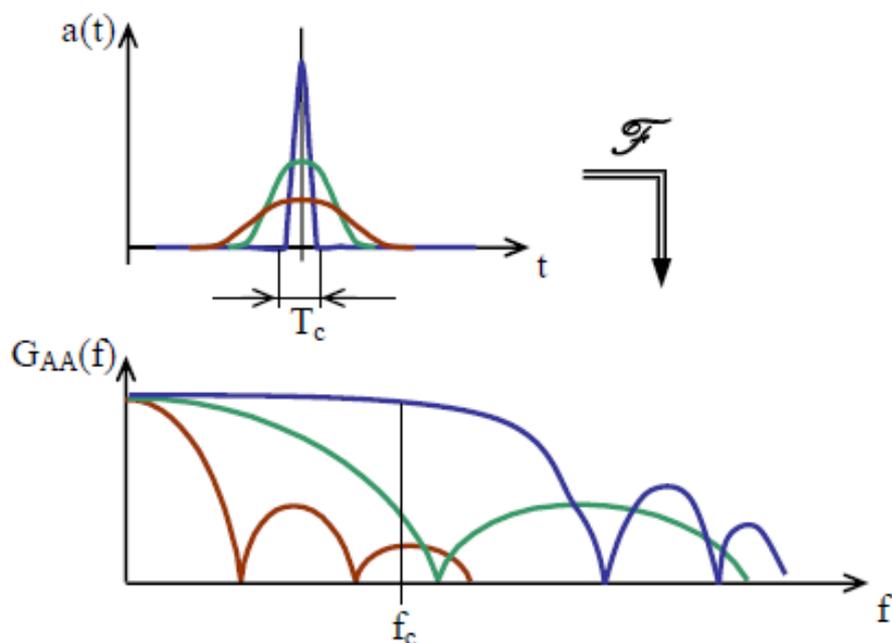


Figura 50 – Força de impacto e espectro, BILOSOVÁ (2011, p. 81).

### 3.5.1 Martelo de impacto ICP® IMPACT HAMMER

O primeiro martelo de impacto utilizado nos ensaios experimentais foi o ICP® IMPACT HAMMER modelo 086C03 da marca PCB Piezotronics, com uma sensibilidade de 2,25 mV/N, sendo disponível com três ponteiros com diferentes rigidezes, sendo as de impacto suave (borracha vermelha), forte (preta) e dura (branca), conforme demonstrado na Figura 51. A ligação elétrica do equipamento é feita através de um conector BNC localizado na extremidade do cabo do martelo.



Figura 51 – Martelo ICP® IMPACT HAMMER 086C03 PCB Piezotronics

### 3.5.2 Martelo de impacto Dytran Instruments

O segundo martelo de impacto utilizado nos ensaios experimentais foi o modelo 5802A Dytran Instruments da marca Dytran, com uma sensibilidade de 1mV/lbf e uma gama de medição disponível de 2.250 kg, pesando 1,4 kg. Ele é disponível com quatro ponteiros com diferentes rigidezes, sendo as de impacto suave (borracha verde), média (borracha laranja), forte (vermelha) e dura (preta), conforme demonstrado na Figura 52. A ligação elétrica do equipamento é feita através de um conector BNC localizado na extremidade do cabo do martelo.



Figura 52 – Martelo de impacto 5802A Dytran Instruments da marca Dytran

### 3.6 Smartphone Moto G 2ª Geração

O smartphone utilizado na realização dos ensaios experimentais com captura de vídeo foi o Moto G - 2ª Geração da marca Motorola (Figura 53), entretanto, qualquer smartphone que possua uma câmera de vídeo (ou até mesmo uma filmadora convencional) está apto para o ensaio. A filmagem do ensaio foi realizada a uma taxa de 30 frames por segundo. Vale ressaltar que, quanto mais capacidade de frames por segundo o aparelho de vídeo tiver, melhor será a qualidade do ensaio.



Figura 53 – Smartphone Motorola modelo Moto G - 2ª Geração

### 3.7 Software Tracker

O Tracker é um software livre de análise de vídeo e modelagem desenvolvido para o ensino de Física. Os recursos disponíveis são: o rastreamento da posição de um objeto, gráficos e dados de velocidade e aceleração de corpos em movimento, divisão do vídeo por quadros por segundo e calibração de medidas. Este lê os padrões de movimento no decorrer dos frames do vídeo de uma determinada região da estrutura demarcada pelo usuário e fornece como resposta um conjunto de dados de posição ao longo do tempo. A Figura 54 apresenta a interface do software.

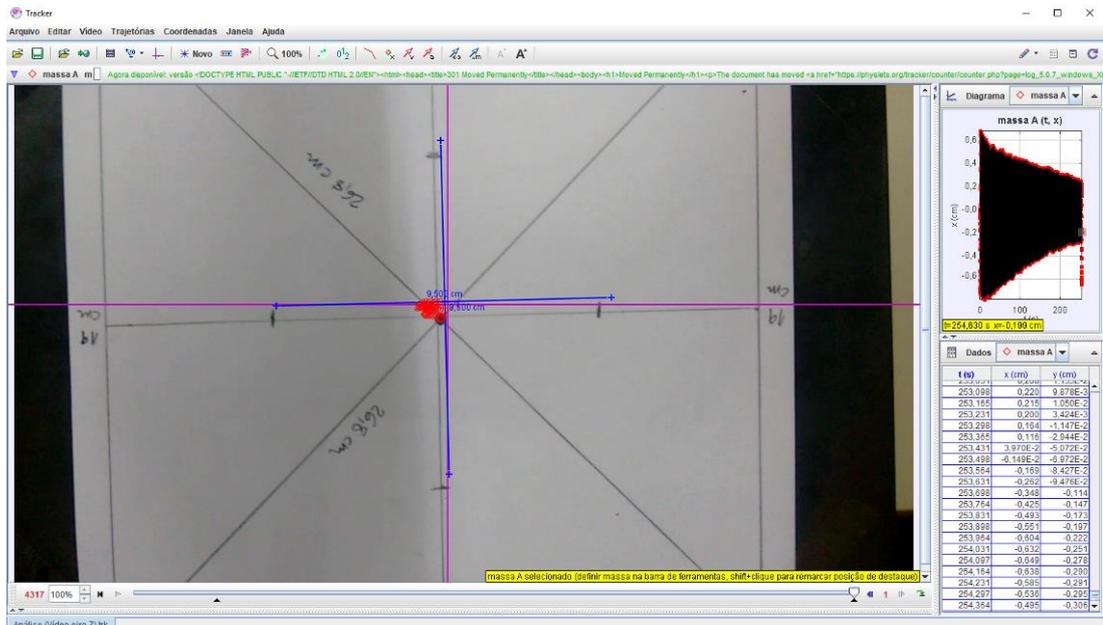


Figura 54 – Interface do software Tracker

### 3.8 Smartphone iPhone 6

O smartphone iPhone 6 da marca Apple (Figura 55) possui um acelerômetro e um giroscópio integrado em seu interior, possibilitando a realização de ensaios de monitoração dinâmica. O acelerômetro de 3 canais presente no equipamento tem uma sensibilidade de aproximadamente 0,02g e um alcance de 2g.



Figura 55 – Smartphone iPhone 6

### 3.9 Vibration: Diffraction Limited Design LLC

O Vibration é um aplicativo de análise de espectro de vibração que, para tanto, utiliza acelerômetros e o giroscópio presentes dentro do smartphone iPhone. Este adquire e exibe dados de séries temporais, aplica uma janela Hamming e executa uma Transformada Rápida de Fourier (FFT) em cada canal para produzir espectros de frequência. O Vibration é um aplicativo pago disponível para o sistema operacional iOS. A Figura 56 apresenta a interface do aplicativo.

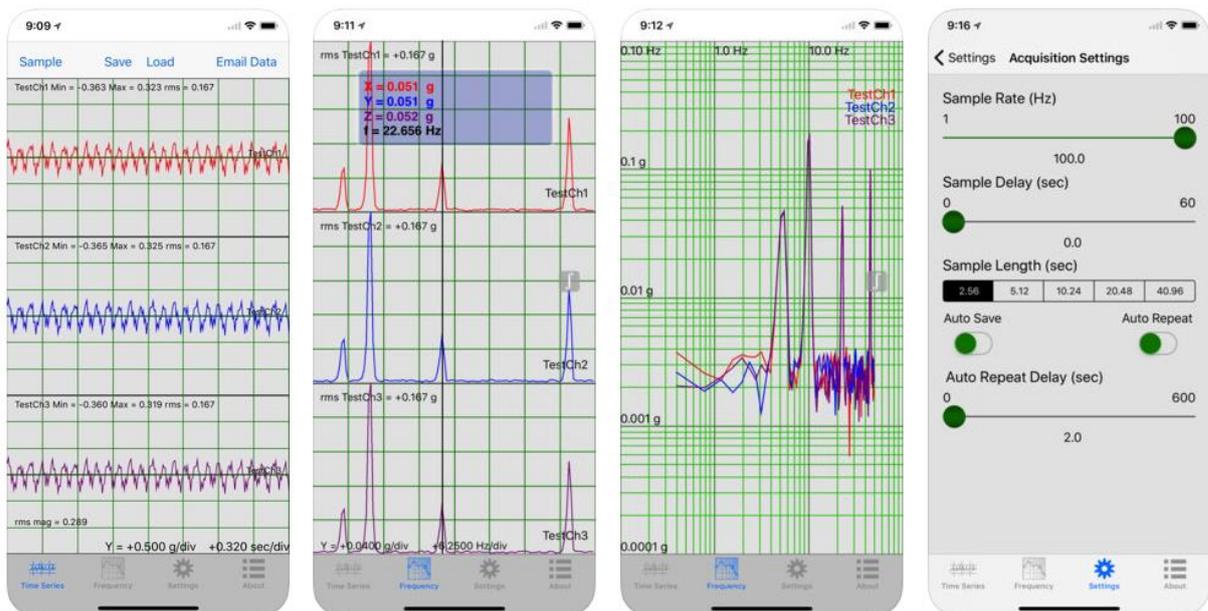


Figura 56 – Interface do software Vibration: Diffraction Limited Design LLC

### 3.10 Considerações do capítulo

No presente capítulo foram apresentadas as características e limitações de todos os equipamentos utilizados nas análises experimentais de vibração livre e forçada. Foram descritos os seguintes equipamentos: Acelerômetros capacitivos Dytran, Acelerômetros resistivos Kyowa, PDV 100 (*Portable Digital Vibrometer*), martelo de impacto PCB Piezotronics, martelo de impacto Dytran Instruments, smartphone Moto G 2ª geração da marca Motorola e iPhone 6 da marca Apple, assim como um sistema de aquisição de dados (ADS 2002) largamente utilizado, mostrando que estão disponíveis no mercado mundial inúmeros equipamentos para medições experimentais de vibração. Foram descritos também os softwares utilizados na realização dos ensaios experimentais, tais como: AqDados e AqDAnalysis,

associados aos acelerômetros e ao sistema de aquisição de dados (ADS 2002), o software Polytec Vibrometer, associado ao PDV 100, o software Tracker, utilizado nos ensaios com filmagem de vídeo e o aplicativo Vibration, associado ao iPhone.

## 4. ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL

### 4.1 Considerações iniciais

A análise modal experimental da estrutura foi feita mediante monitoração dinâmica, “in loco”, por meio da instalação de acelerômetros na estrutura, conectados ao sistema de aquisição de dados *ADS-2002*, por um sistema de vibrometria a laser *Polytec PDV-100* e, também, por formas mais simplistas de medição, seja utilizando o acelerômetro presente dentro de um *smartphone*, ou mesmo por análise de vídeo, utilizando um *smartphone* para a filmagem, e o software Tracker para a leitura do deslocamento da estrutura. Foram realizados testes de vibração livre com o objetivo de obter as frequências naturais e os modos de vibração da estrutura, as funções de tempo associadas às acelerações, velocidades e deslocamentos em determinados pontos da estrutura, e, ainda, o coeficiente de amortecimento modal experimental.

Nesse sentido, foram utilizadas duas técnicas de ensaio comumente empregadas em estruturas civis, (Brandt (2011), Cunha e Caetano (2006)): *SIMO* (*Single Input Multiple Output* – única entrada e várias saídas) e *SISO* (*Single Input Single Output* – uma entrada e uma saída). Em relação à técnica *SIMO*, uma força de excitação é aplicada num ponto da estrutura (*entrada*) e as respostas dinâmicas (*saídas*) são obtidas simultaneamente em vários pontos. No que diz respeito à técnica *SISO*, a força é aplicada e a resposta da estrutura é obtida individualmente em cada ponto da estrutura, tanto a partir do deslocamento da força (*entrada*) quanto do sensor de medição (*saída*) pela estrutura. Ressalta-se que uma das vantagens da técnica *SIMO* sobre *SISO* está no fato de que é possível realizar um menor número de ensaios, uma vez que a resposta dinâmica de vários pontos pode ser obtida de uma só vez. A partir da medição do sinal de entrada e de saída, podem-se obter as funções de resposta em frequência (FRF) de cada ponto, representando a relação entre o sinal de saída (*aceleração*) sobre o sinal de entrada (*força*) de cada ponto da estrutura.

### 4.2 Descrição dos ensaios executados

Foram elaborados dois tipos distintos de ensaios: ensaio com excitação manual (que consiste em excitar a estrutura aplicando um deslocamento com intensidade desconhecida em um ponto determinado, ou seja, vibração aleatória), e ensaio com

vibração utilizando o martelo de impacto (que consiste em excitar a estrutura aplicando uma carga com o martelo de impacto, ou seja, vibração determinística). No ensaio de vibração “manual”, foram utilizadas quatro formas distintas de leitura de sinais: leitura *SIMO* utilizando acelerômetros simultaneamente em diferentes alturas da estrutura conectados ao sistema de aquisição de dados *ADS 2002*, leitura *SISO* utilizando o sistema de vibrometria a laser *Polytec PDV 100*, leitura *SISO* utilizando o acelerômetro presente no interior de um *smartphone* e leitura *SISO* utilizando um *smartphone* posicionado acima da estrutura visando realizar a filmagem do ponto de interesse demarcado na cobertura do edifício, que posteriormente teria sua trajetória identificada pelo *software Tracker*. No ensaio de vibração com martelo foi feita apenas a leitura *SISO* (*Single Input Multiple Output* – única entrada e várias saídas) utilizando o sistema de vibrometria a laser *Polytec PDV 100*. A Tabela 6 explicita os ensaios a serem executados.

Tabela 6 – Análise modal: ensaios executados.

Ensaio	Descrição	
	Excitação	Aquisição
1	Vibração Livre (Excitação Manual)	ADS2002 (Lynx)
2	Vibração Livre (Excitação Manual)	PDV 100
3	Vibração Livre (Excitação Manual)	iPhone (Aplicativo Vibration)
4	Vibração Livre (Excitação Manual)	Smartphone (Software Tracker)
5	Martelo de Impacto PCB Piezometrics	PDV 100
6	Martelo de Impacto Dytran Instruments	PDV 100

### 4.3 Ensaio 1: Excitação manual: ADS 2002

Este ensaio teve como objetivo encontrar os parâmetros modais de flexão da estrutura (frequências naturais, modos de vibração e coeficientes de amortecimento), tanto na direção Z quanto na direção X. Desta forma, é de suma importância a escolha do ponto de excitação da estrutura, e o correto posicionamento dos acelerômetros. Os pontos de excitação da estrutura foram escolhidos de forma a evitar ao máximo excentricidades de aplicação de carga, e conseqüentemente movimentos de torção na estrutura durante o ensaio. Outro fator determinante no tocante à escolha da região de aplicação da carga foi à busca por maior fluidez e amplitude de movimento.

Visando identificar, da melhor maneira possível, os modos de vibração da estrutura, é necessário posicionar acelerômetros em diferentes pavimentos do edifício, de modo a se obter diferentes leituras de resposta da estrutura. Sendo assim, foram posicionados quatro acelerômetros nos quatro pavimentos superiores, sendo um acelerômetro em cada pavimento. Tendo em vista que o pavimento térreo é indeslocável, ao todo, em cada direção haverá cinco pontos de resposta, quantidade considerada suficiente para a obtenção dos parâmetros modais da estrutura. Vale ressaltar que, os acelerômetros resistivos da marca Kyowa são mais adequados para ensaios experimentais de baixas amplitudes de movimento, pois apresentam menos “ruído” quando comparados com os acelerômetros capacitivos da marca Dytran. Por este motivo, visando mitigar a influência do “ruído” dos acelerômetros Dytran nos resultados, os mesmos foram posicionados nos dois pavimentos superiores da estrutura, pois são as regiões de maiores amplitudes de movimento horizontal.

A carga de excitação da estrutura será aplicada horizontalmente, a uma altura de 120 cm, tanto em relação ao ensaio na direção Z, quanto em relação ao ensaio na direção X.

A altura do posicionamento dos acelerômetros, tanto para o ensaio na direção Z quanto para o ensaio na direção X podem ser visualizadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Ensaio 1: Altura referente ao posicionamento dos acelerômetros

Acelerômetro	Altura (cm)
Dytran 7521A1 - 3053	150
Dytran 7521A1 - 3051	120
Kyowa FU5900022	90
Kyowa FU5900024	60

Os acelerômetros estão ligados ao sistema de aquisição de dados *ADS2002* fabricado pela empresa *LYNX Tecnologia Eletrônica* (Figura 57). Este sistema, através da placa condicionadora e controladora, relaciona o sinal de variação elétrica em valor de engenharia (deformação específica, aceleração e força), controlado por um computador. No que tange a ordem dos canais adotados, ver Tabela 8.

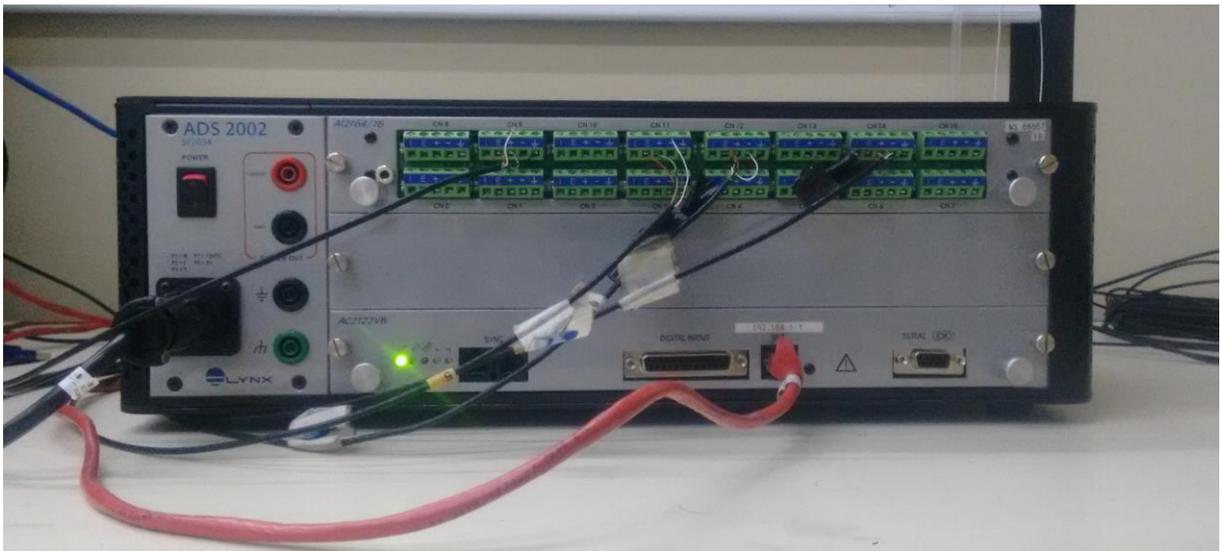


Figura 57 – Conexão dos canais no sistema de aquisição de dados ADS 2002

Tabela 8 – Conexão dos canais no sistema de aquisição de dados ADS 2002

Acelerômetro	Canal
Dytran 7521A1 - 3053	9
Dytran 7521A1 - 3051	11
Kyowa FU5900022	12
Kyowa FU5900024	14

É importante ressaltar que uma vez que a carga imprimida na estrutura pela

excitação manual não foi mensurada, não é possível obter a FRF de cada ponto neste ensaio. Entretanto, as frequências naturais da estrutura são igualmente identificadas através da FFT (*Fast Fourier Transform* – transformada rápida de Fourier) da resposta dinâmica dos quatro acelerômetros utilizados na análise modal experimental da estrutura. Estas FFTs serão automaticamente elaboradas pelo software *AqDAnalysis* do Sistema de Aquisição de Dados *ADS 2002*, sendo, portanto, diretamente extraídas do mesmo. Vale ressaltar que os acelerômetros possuem uma massa muito pequena em relação a massa da estrutura, e sua interferência nos resultados é considerada irrisória.

#### 4.3.1 Ensaio 1: excitação manual: ADS2002 (Direção Z)

O ponto de excitação da estrutura, bem como o posicionamento adotado dos acelerômetros referentes ao ensaio na direção Z, podem ser visto na Figura 58.

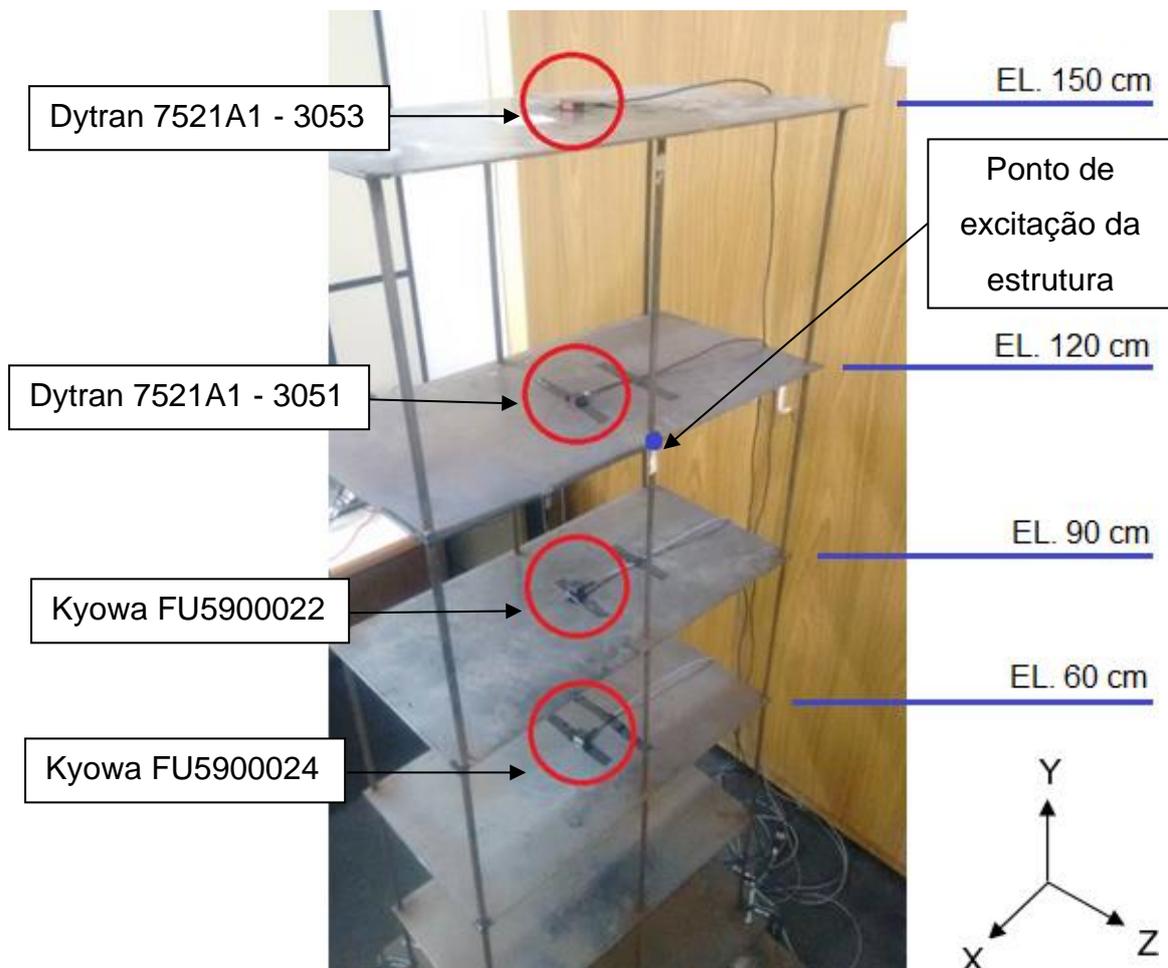


Figura 58 – Ensaio 1: Posição dos acelerômetros e ponto de excitação (eixo Z)

A partir dos ensaios experimentais devido a uma excitação manual na direção Z, foram obtidos os resultados descritos no domínio do tempo (acelerações, velocidades e deslocamentos). Os resultados de acelerações no domínio do tempo podem ser vistos nas Figuras 59 a 62, os resultados de velocidades no domínio do tempo e os resultados de deslocamentos no domínio do tempo podem ser vistos nas Figuras 195 a 198 e Figuras 199 a 202, respectivamente, localizadas no Anexo 1. As respostas no domínio da frequência na direção Z são apresentadas nas Figuras 63 a 66.

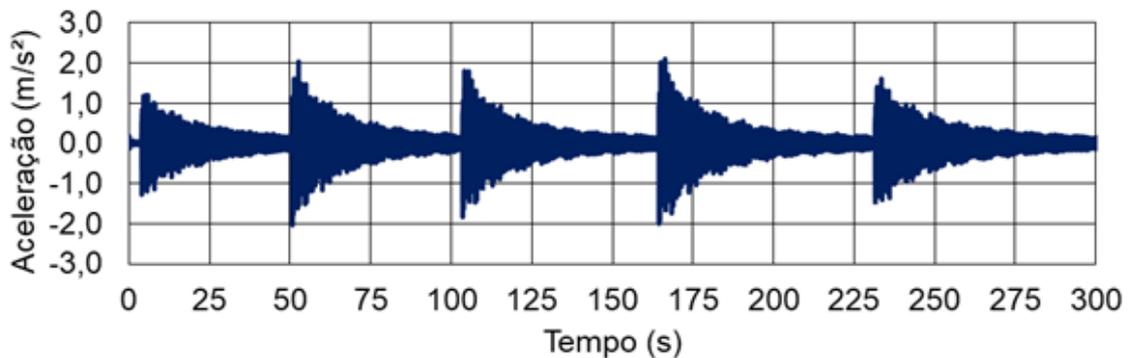


Figura 59 - Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z]

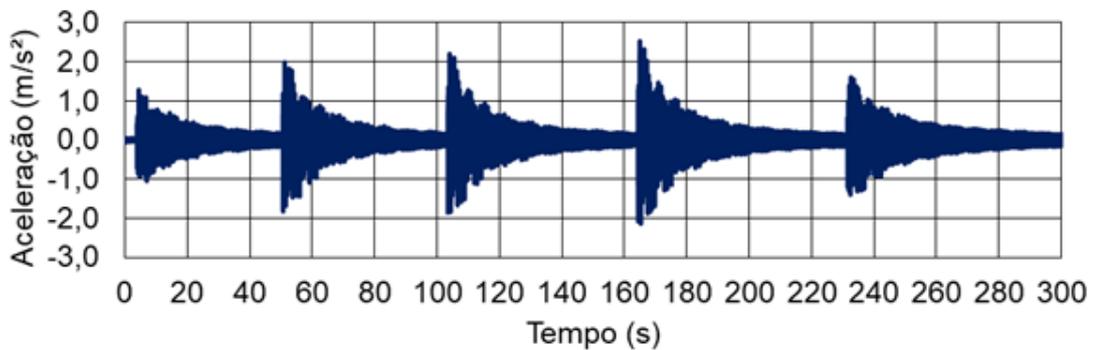


Figura 60 - Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [h = 120 cm. Eixo Z]

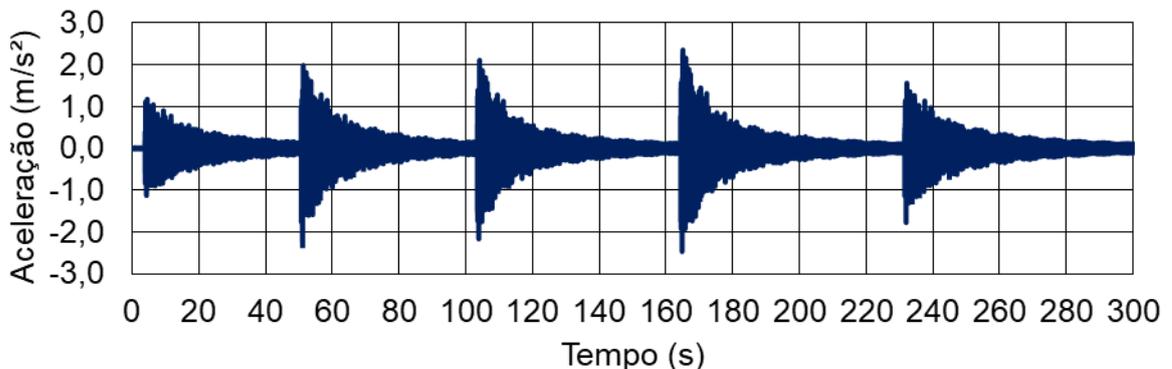


Figura 61 - Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [h = 90 cm. Eixo Z]

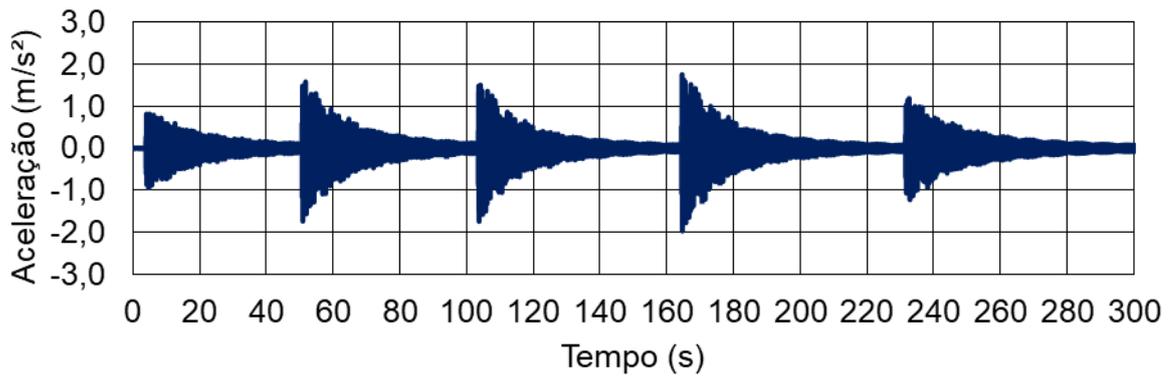


Figura 62 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [h = 60 cm. Eixo Z]

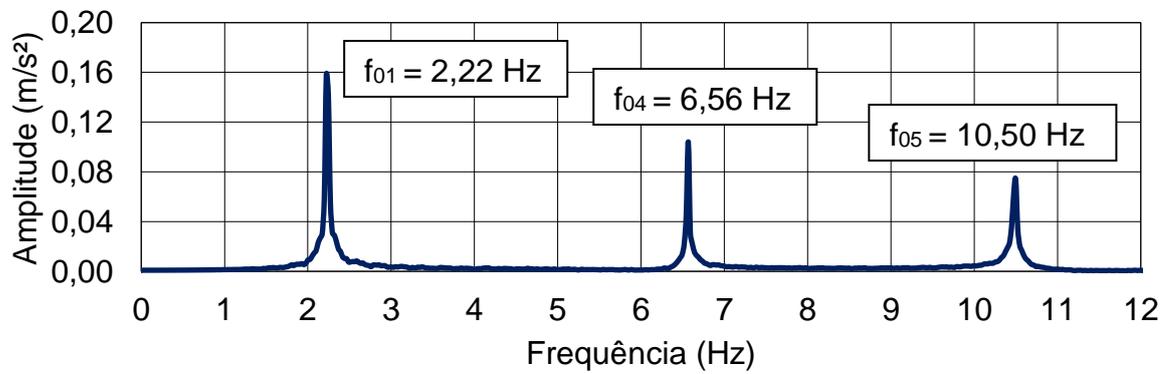


Figura 63 – Ensaio 1: espectro de resposta [h = 150 cm. Eixo Z]

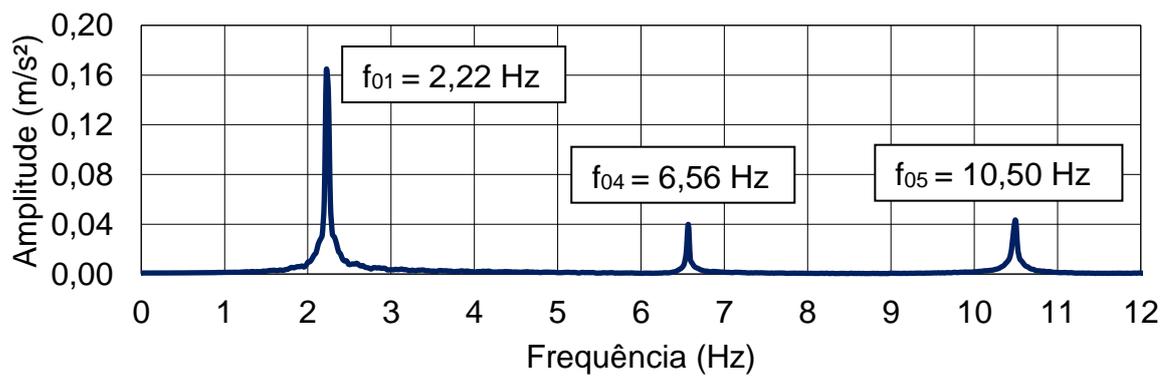


Figura 64 – Ensaio 1: espectro de resposta [h = 120 cm. Eixo Z]

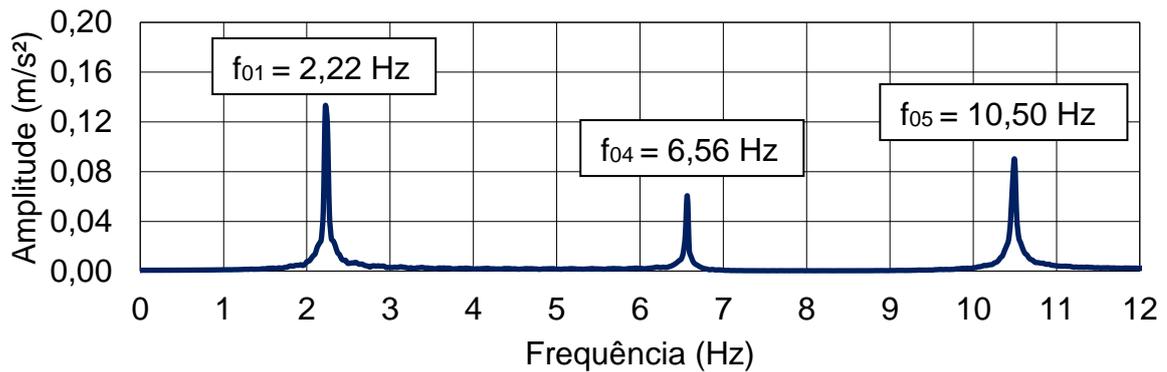


Figura 65 – Ensaio 1: espectro de resposta [h = 90 cm. Eixo Z]

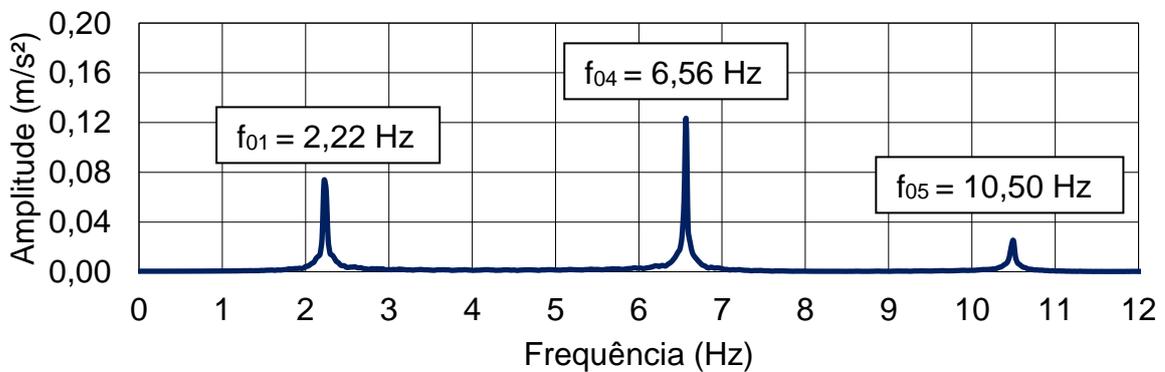


Figura 66 – Ensaio 1: espectro de resposta [h = 60 cm. Eixo Z]

Analisando os resultados apresentados nas Figuras 63 a 66, nota-se que é possível identificar três picos de frequência correspondentes a três modos de vibração referentes à flexão [ $f_{01} = 2,22$  Hz;  $f_{04} = 6,56$  Hz;  $f_{05} = 10,50$  Hz]. Observa-se que não foram identificadas  $f_{02}$  e  $f_{03}$ . Este fato ocorre devido a  $f_{02}$  ser uma frequência correspondente a um modo de vibração na direção X, que será apresentado na análise modal experimental na direção X, e  $f_{03}$  ser uma frequência correspondente a um modo de vibração de torção, que não é objeto de estudo deste trabalho.

Buscando encontrar os modos de vibração e os coeficientes de amortecimento referentes a cada modo de vibração da estrutura, é necessário filtrar o sinal de modo a mitigar ao máximo a influência dos outros modos de vibração em seus resultados. Desta forma, para cada modo de vibração analisado, foi feita uma filtragem passa banda em sua frequência correspondente, com um filtro passa alta imediatamente antes do início de sua frequência natural, e um filtro passa baixa imediatamente ao final de sua frequência natural. A partir desta filtragem, serão obtidos resultados de aceleração no domínio do tempo e espectros de frequência específicos de cada modo

de vibração. Vale ressaltar que, para traçar o modo de vibração, necessita-se de tantos pontos quanto possíveis ao longo da altura do edifício. No caso deste trabalho, além dos dados referentes aos quatro acelerômetros ao longo da estrutura, existe também o dado referente à base da estrutura, que é indeslocável. Os limites de filtragem das frequências naturais registradas na direção Z estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Limites de filtragem das frequências naturais registradas (eixo Z)

Frequência natural	Filtro passa alta	Filtro passa baixa
$f_{01} = 2,22 \text{ Hz}$	2,00 Hz	2,44 Hz
$f_{04} = 6,56 \text{ Hz}$	6,44 Hz	6,69 Hz
$f_{05} = 10,50 \text{ Hz}$	10,38 Hz	10,62 Hz

As Figuras 67 a 70 apresentam as respostas de cada acelerômetro em termos de aceleração no domínio do tempo referentes ao primeiro modo de vibração, e as Figuras 71 a 74 apresentam os respectivos espectros de frequência.

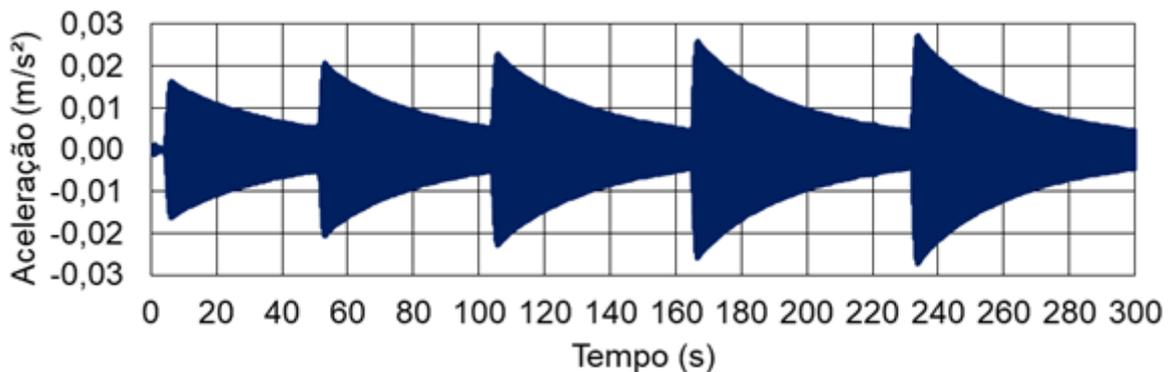


Figura 67 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [primeiro modo:  $h = 150 \text{ cm}$ . Eixo Z]

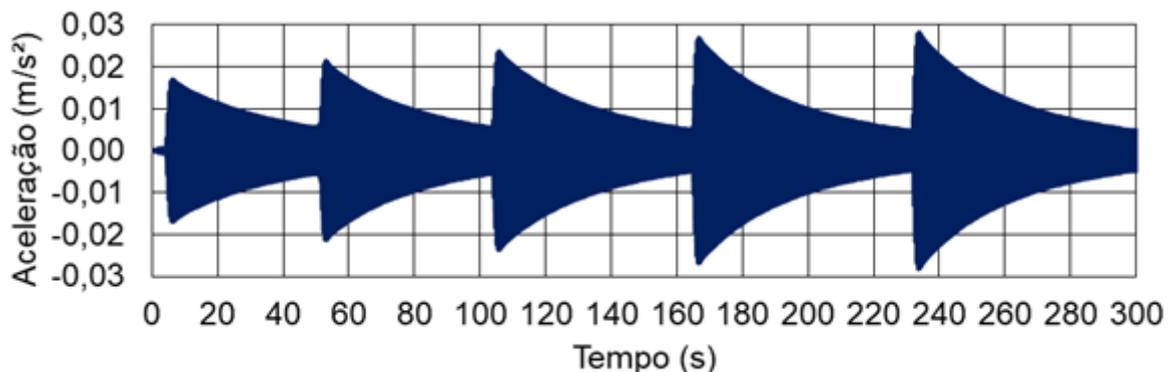


Figura 68 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [primeiro modo:  $h = 120 \text{ cm}$ . Eixo Z]

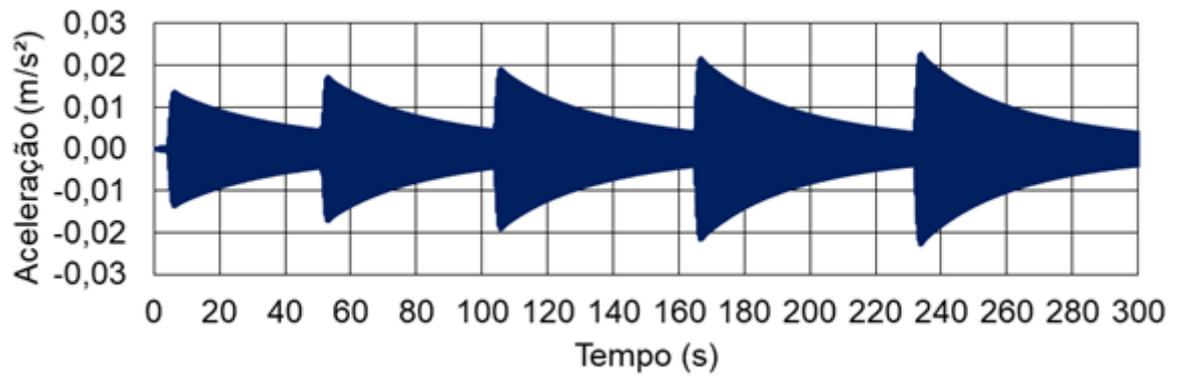


Figura 69 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [primeiro modo:  $h = 90$  cm. Eixo Z]

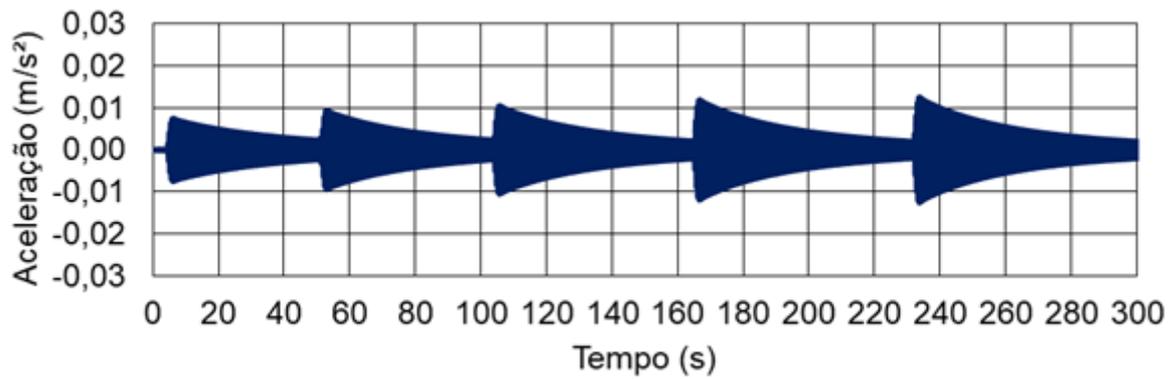


Figura 70 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [primeiro modo:  $h = 60$  cm. Eixo Z]

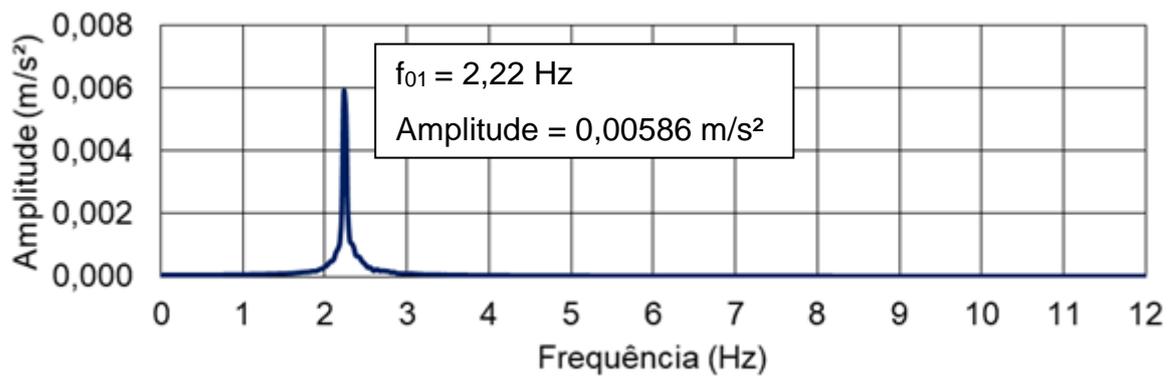


Figura 71 – Ensaio 1: espectro de frequência [primeiro modo:  $h = 150$  cm. Eixo Z]

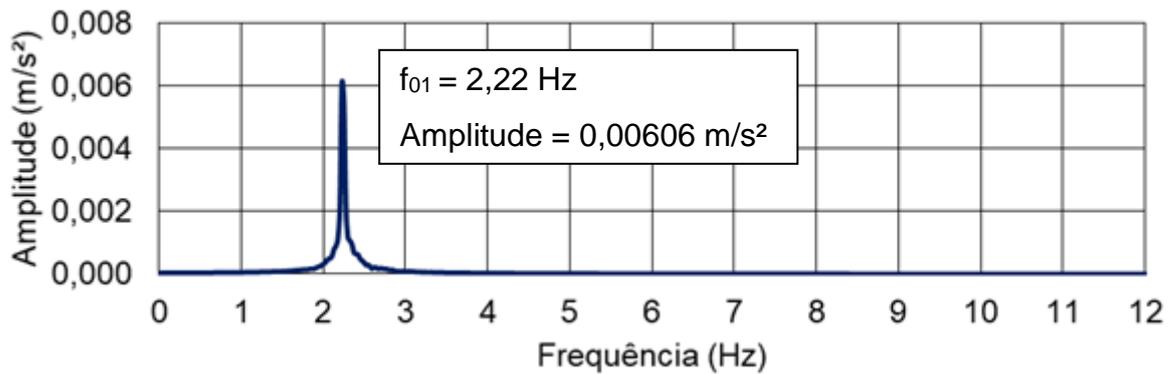


Figura 72 – Ensaio 1: espectro de frequência [primeiro modo:  $h = 120$  cm. Eixo Z]

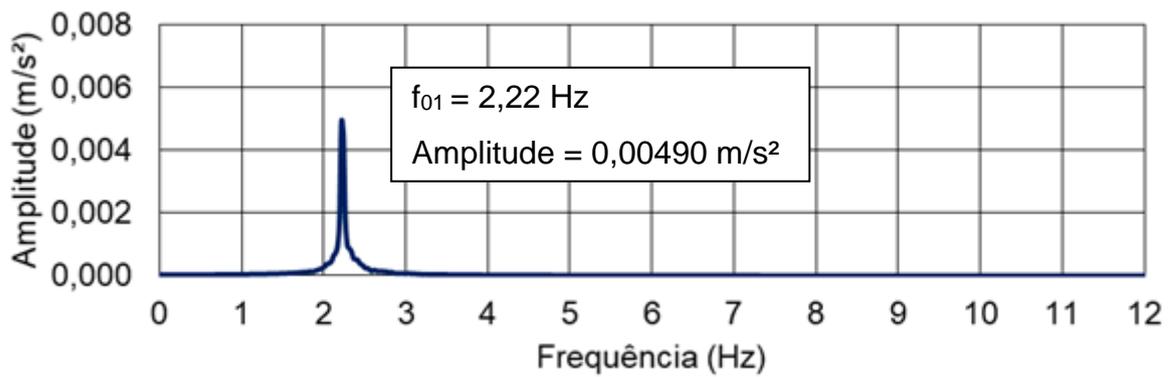


Figura 73 – Ensaio 1: espectro de frequência [primeiro modo:  $h = 90$  cm. Eixo Z]

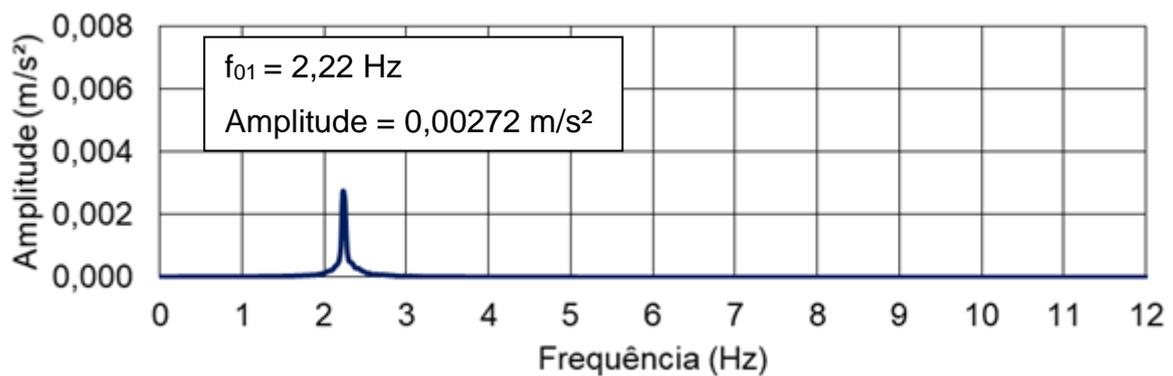


Figura 74 – Ensaio 1: espectro de frequência [primeiro modo:  $h = 60$  cm. Eixo Z]

As Figuras 75 a 78 apresentam as respostas de cada acelerômetro em termos de aceleração no domínio do tempo referentes ao quarto modo de vibração, e as Figuras 79 a 82 apresentam os respectivos espectros de frequência.

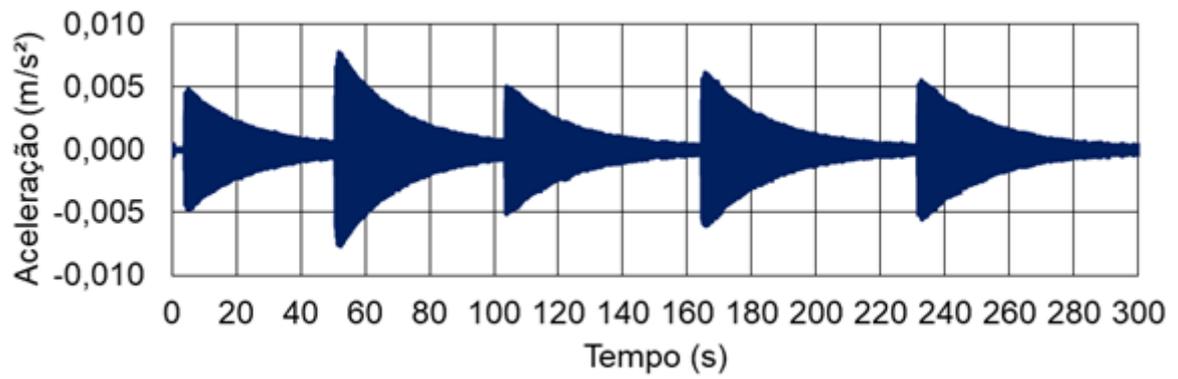


Figura 75 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [quarto modo:  $h = 150$  cm. Eixo Z]

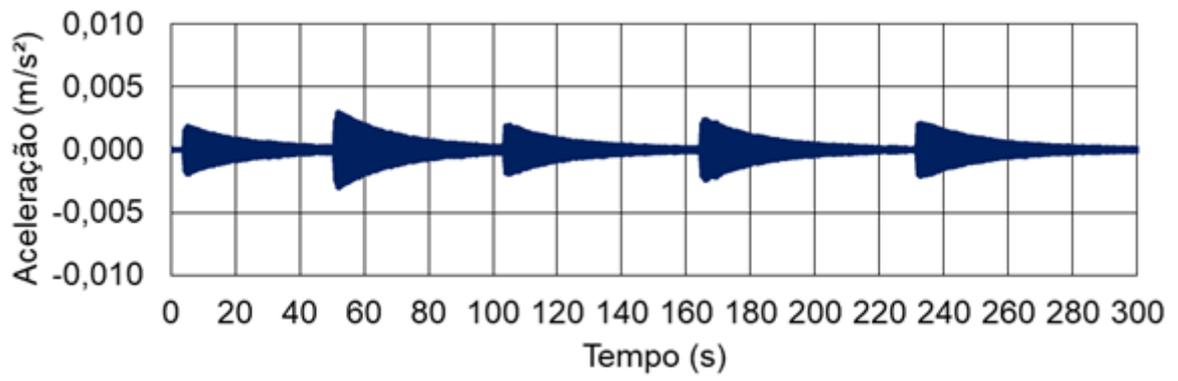


Figura 76 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [quarto modo:  $h = 120$  cm. Eixo Z]

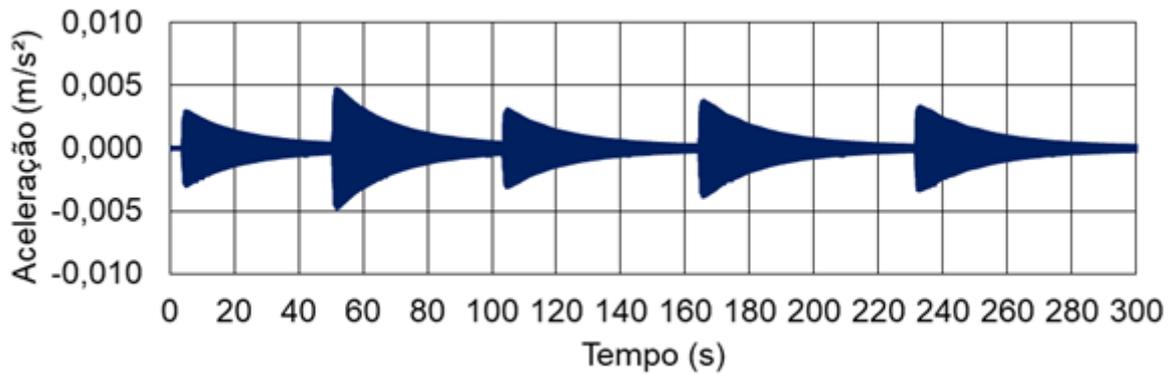


Figura 77 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [quarto modo:  $h = 90$  cm. Eixo Z]

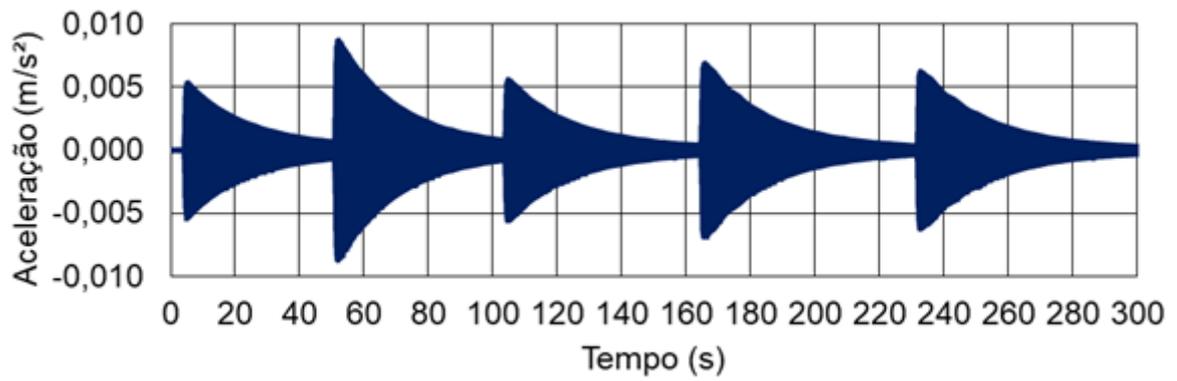


Figura 78 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [quarto modo: h = 60 cm. Eixo Z]

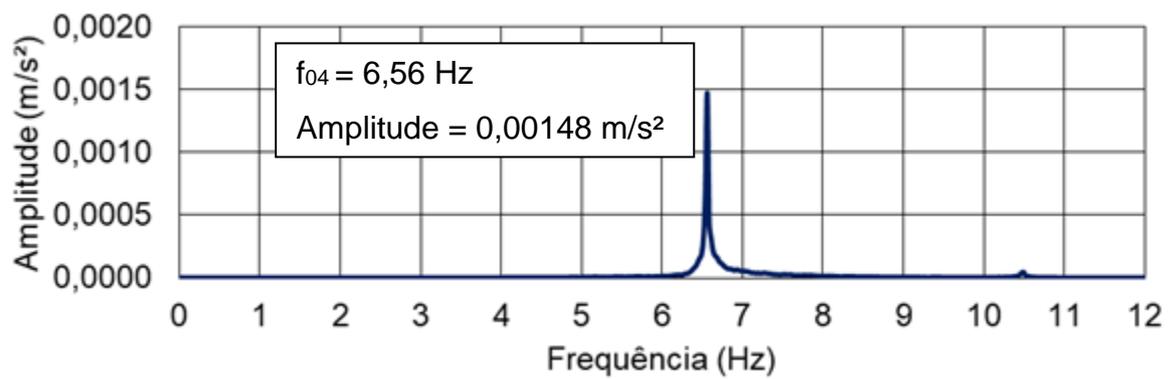


Figura 79 – Ensaio 1: espectro de frequência [quarto modo: h = 150 cm. Eixo Z]

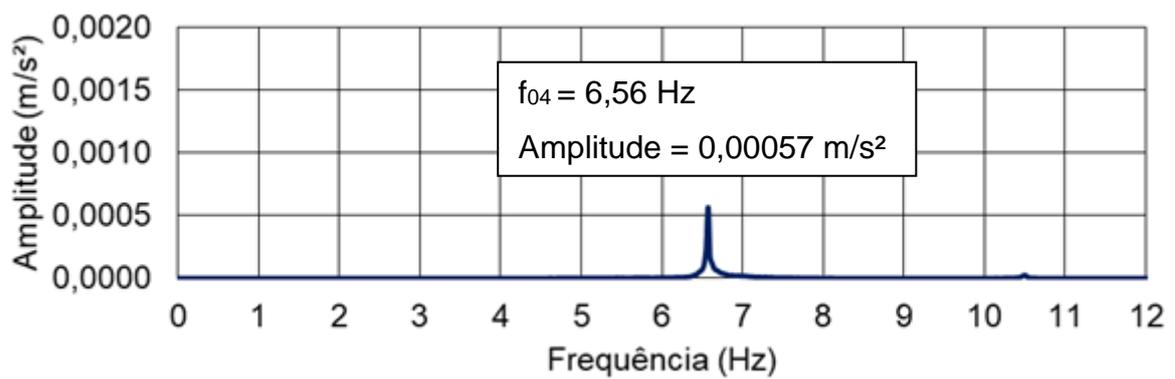


Figura 80 – Ensaio 1: espectro de frequência [quarto modo: h = 120 cm. Eixo Z]

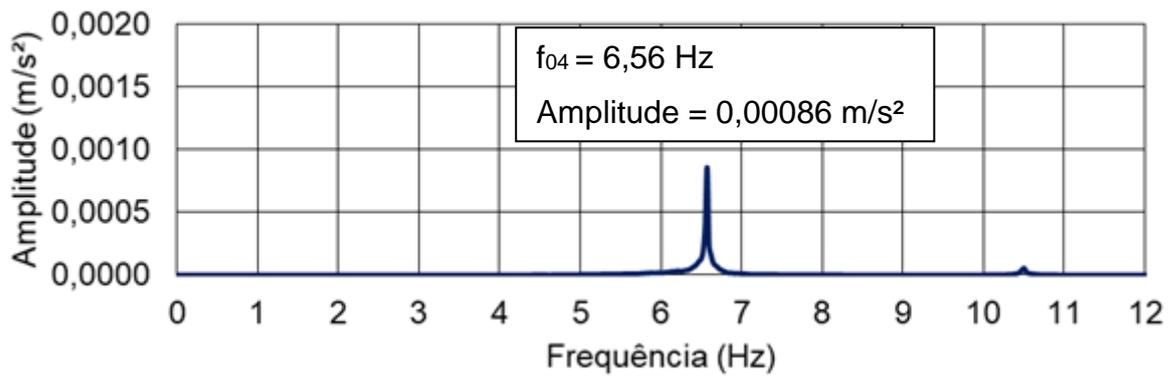


Figura 81 – Ensaio 1: espectro de frequência [quarto modo:  $h = 90$  cm. Eixo Z]

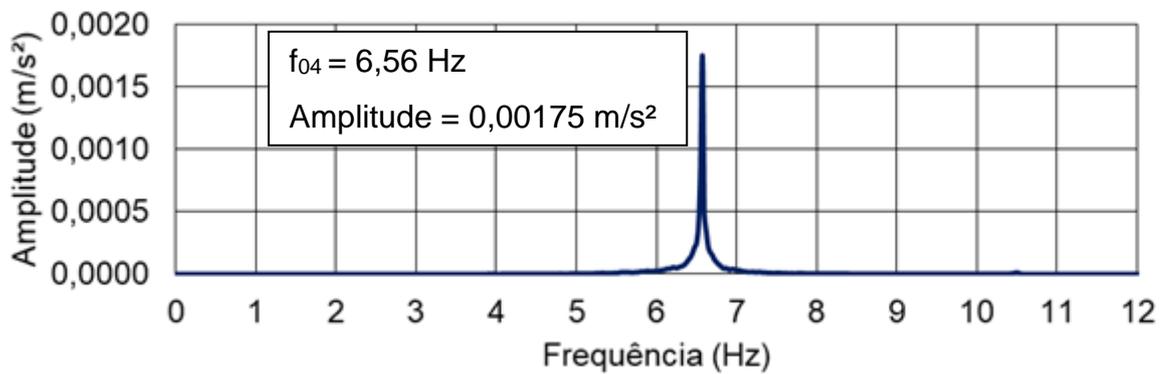


Figura 82 – Ensaio 1: espectro de frequência [quarto modo:  $h = 60$  cm. Eixo Z]

As Figuras 83 a 86 apresentam as respostas de cada acelerômetro em termos de aceleração no domínio do tempo referente o quinto modo de vibração e as Figuras 87 a 90 apresentam os respectivos espectros de frequência.

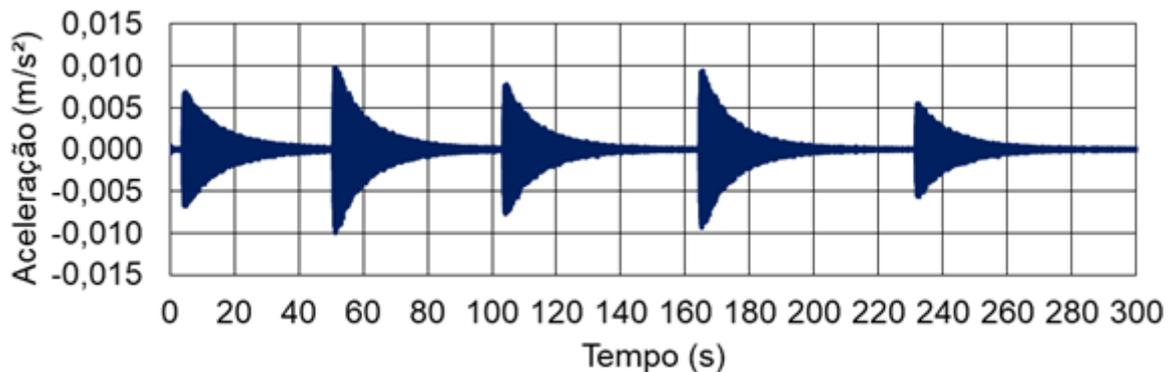


Figura 83 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [quinto modo:  $h = 150$  cm. Eixo Z]

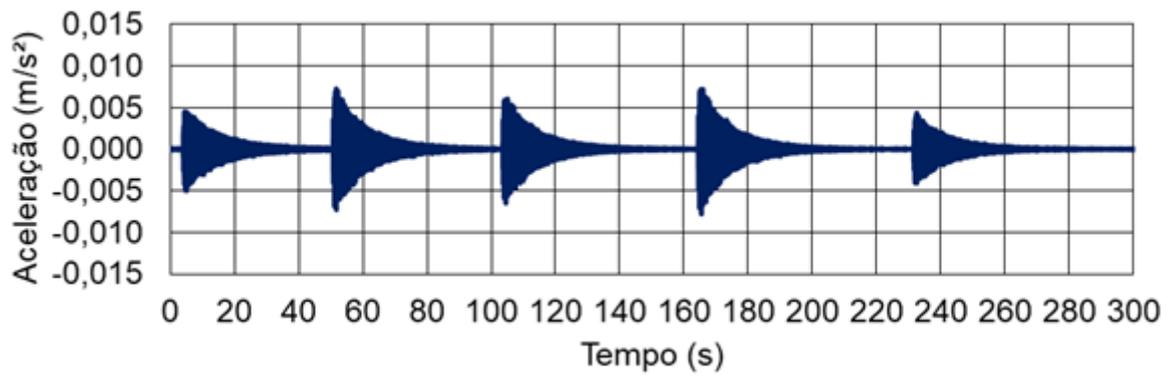


Figura 84 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [quinto modo:  $h = 120$  cm. Eixo Z]

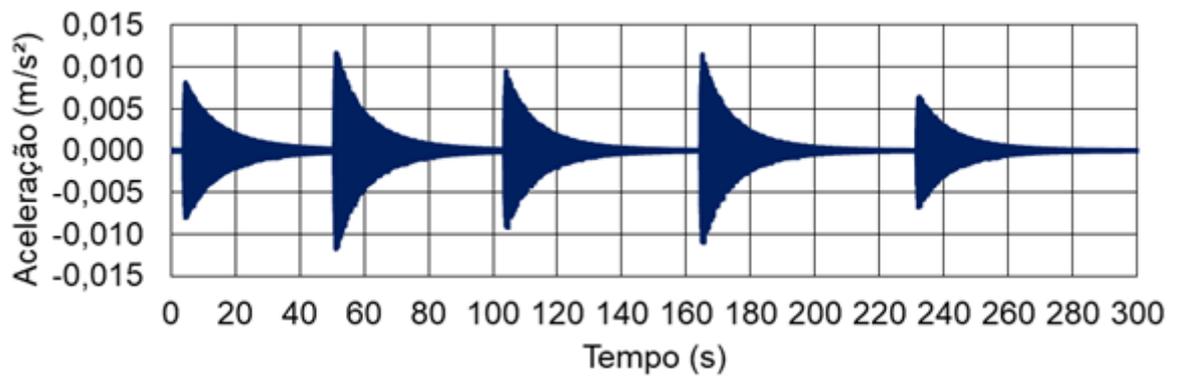


Figura 85 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [quinto modo:  $h = 90$  cm. Eixo Z]

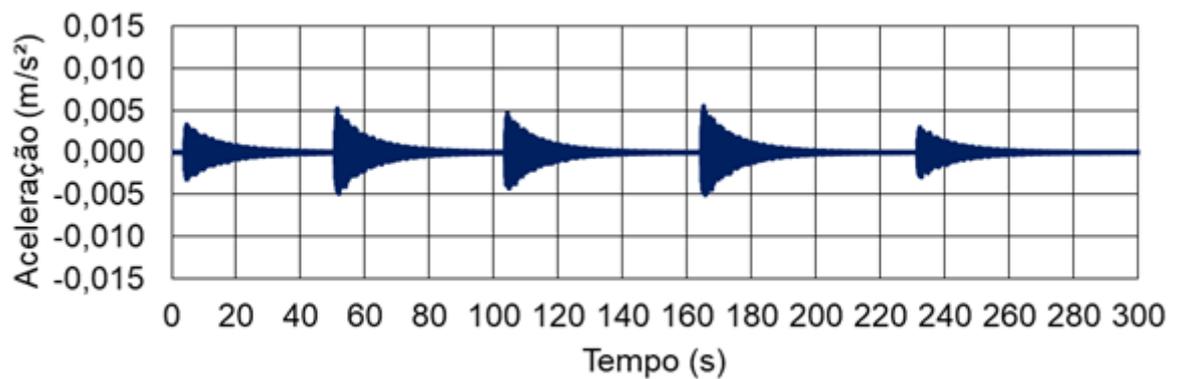


Figura 86 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [quinto modo:  $h = 60$  cm. Eixo Z]

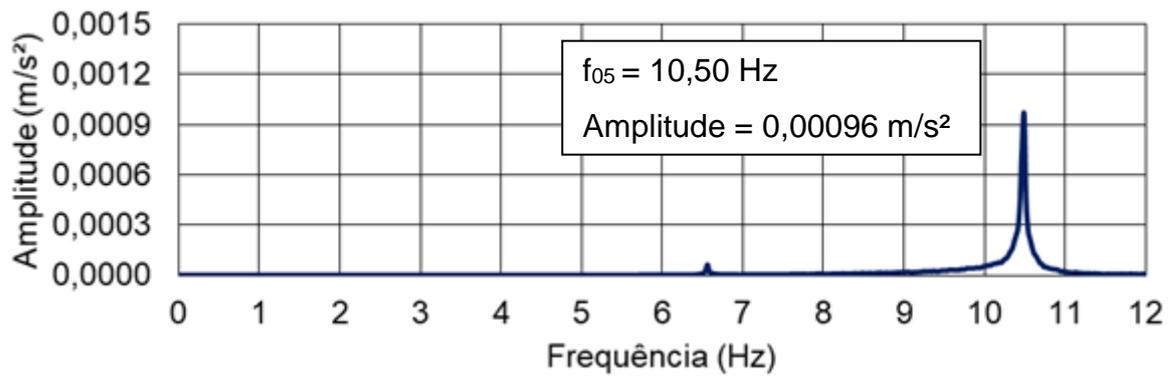


Figura 87 – Ensaio 1: espectro de frequência [quinto modo:  $h = 150 \text{ cm}$ . Eixo Z]

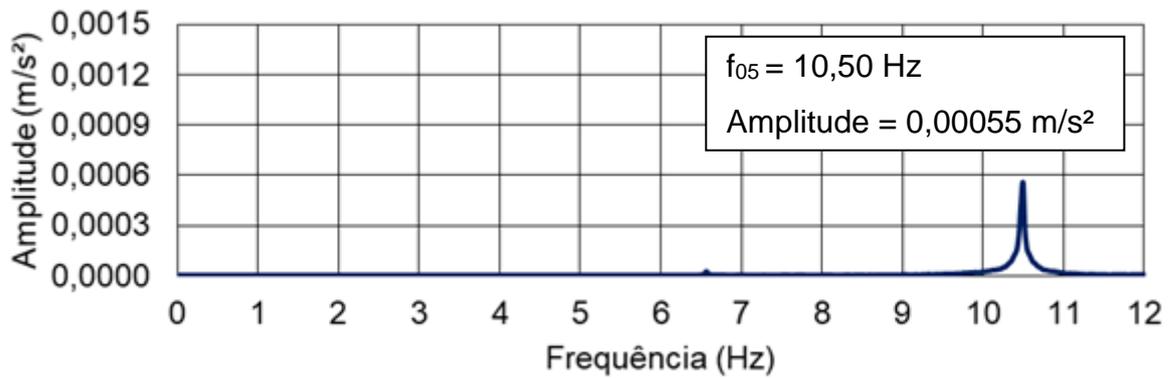


Figura 88 – Ensaio 1: espectro de frequência [quinto modo:  $h = 120 \text{ cm}$ . Eixo Z]

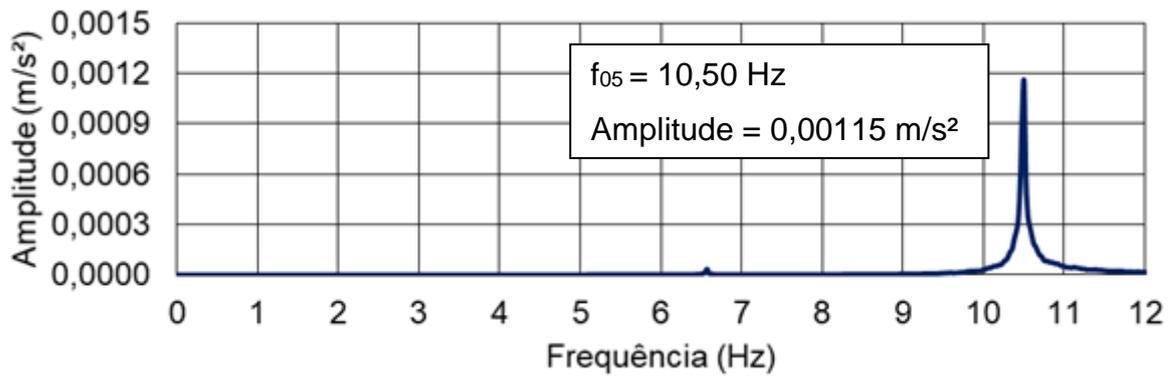


Figura 89 – Ensaio 1: espectro de frequência [quinto modo:  $h = 90 \text{ cm}$ . Eixo Z]

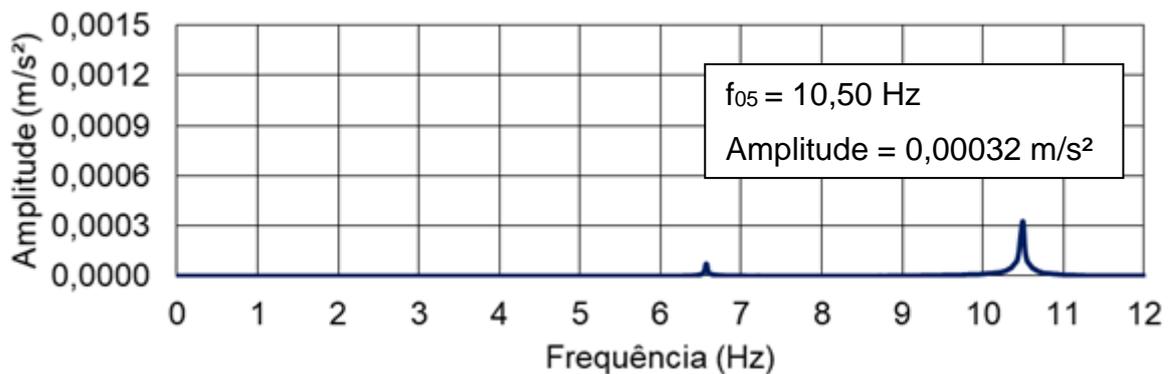


Figura 90 – Ensaio 1: espectro de frequência [quinto modo: h = 60 cm. Eixo Z]

De posse do sinal filtrado referente ao primeiro modo de vibração, pode-se esboçá-lo valendo-se das amplitudes apresentadas nas Figuras 71 a 74. Visando manter um padrão, as amplitudes do modo de vibração variarão, em módulo, de 0 a 1, onde 1 será correlacionado a maior amplitude encontrada nas Figuras 71 a 74, zero será correlacionado a amplitude da base (região indeslocável), e as demais amplitudes adotarão valores proporcionais. A Tabela 10 mostra a correlação entre as amplitudes das frequências encontradas nas Figuras 71 a 74 e as amplitudes adotadas para esboçar o modo de vibração. A Figura 91 apresenta o primeiro modo de vibração da estrutura. Pelo mesmo procedimento descrito neste parágrafo, pode-se encontrar o quarto e o quinto modos de vibração da estrutura. As Tabelas 11 e 12 apresentam a correlação entre amplitudes das frequências referentes ao quarto e quinto modos de vibração, respectivamente, e as Figuras 92 e 93 apresentam, respectivamente, o quarto e o quinto modos de vibração.

Tabela 10 – Correlação entre amplitudes do primeiro modo de vibração (eixo Z)

Acelerômetro / altura	Amplitude da Frequência (m/s <sup>2</sup> )	Amplitude do Modo de Vibração
Dytran 3053 (h = 150 cm)	0,00586	0,97
Dytran 3051 (h = 120 cm)	0,00606	1,00
Kyowa FU5900022 (h = 90 cm)	0,00490	0,81
Kyowa FU5900024 (h = 60 cm)	0,00272	0,45
Base (h = 0 cm)	-	0,00

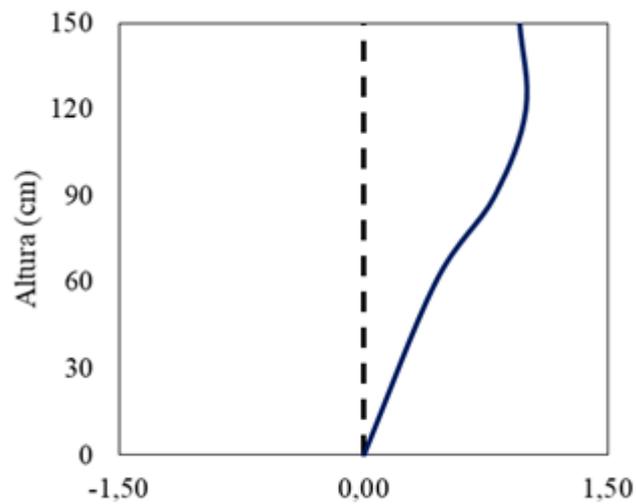


Figura 91 – Ensaio 1: 1º Modo de Vibração Experimental

Tabela 11 – Correlação entre amplitudes do quarto modo de vibração (eixo Z)

Acelerômetro / altura	Amplitude da Frequência ( $m/s^2$ )	Amplitude do Modo de Vibração
Dytran 3053 (h = 150 cm)	0,00148	0,84
Dytran 3051 (h = 120 cm)	0,00057	0,32
Kyowa FU5900022 (h = 90 cm)	0,00086	-0,49
Kyowa FU5900024 (h = 60 cm)	0,00175	-1,00
Base (h = 0 cm)	-	0,00

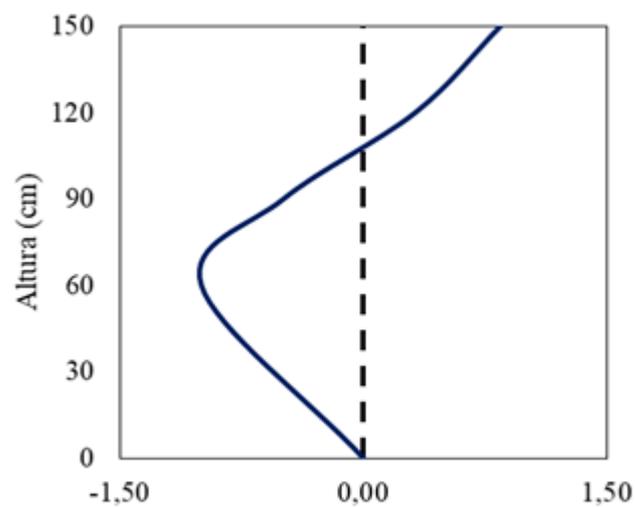


Figura 92 – Ensaio 1: 4º Modo de Vibração Experimental

Tabela 12 – Correlação entre amplitudes do quinto modo de vibração (eixo Z)

Acelerômetro / altura	Amplitude da Frequência (m/s <sup>2</sup> )	Amplitude do Modo de Vibração
Dytran 3053 (h = 150 cm)	0,00096	0,83
Dytran 3051 (h = 120 cm)	0,00055	-0,48
Kyowa FU5900022 (h = 90 cm)	0,00115	-1,00
Kyowa FU5900024 (h = 60 cm)	0,00032	0,28
Base (h = 0 cm)	-	0,00

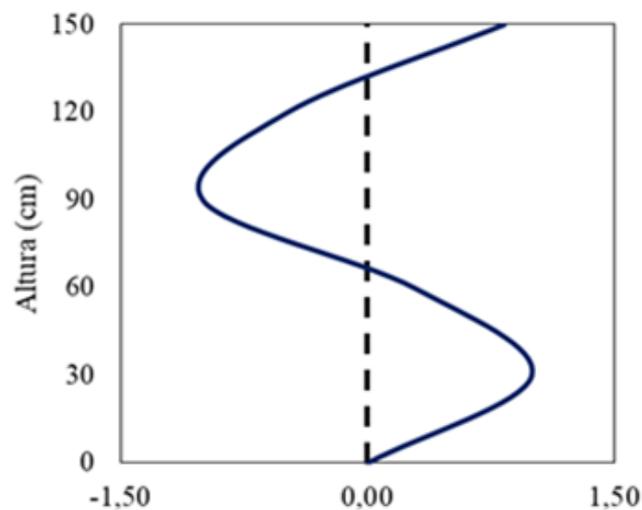


Figura 93 – Ensaio 1: 5º Modo de Vibração Experimental

Os coeficientes de amortecimentos modais da estrutura relativos ao primeiro, quarto e quinto modos de vibração foram obtidos pelo método do decremento logaritmo a partir dos dados no domínio do tempo relacionados aos respectivos modos de vibração apresentados nas Figuras 67 a 70, Figuras 75 a 78 e Figuras 83 a 86, respectivamente. A Tabela 13 apresenta os coeficientes de amortecimento do primeiro, quarto e quinto modos de vibração.

Tabela 13 – Coeficientes de amortecimento – (eixo Z)

Modo de vibração	Coefficiente de amortecimento $\xi$ (%)
$f_{01}$	0,22
$f_{04}$	0,68
$f_{05}$	0,93

#### 4.3.2 Ensaio 1: excitação manual: ADS2002 (Direção X)

O ponto de excitação da estrutura, bem como o posicionamento adotado dos acelerômetros referentes ao ensaio na direção X, podem ser observados na Figura 94.

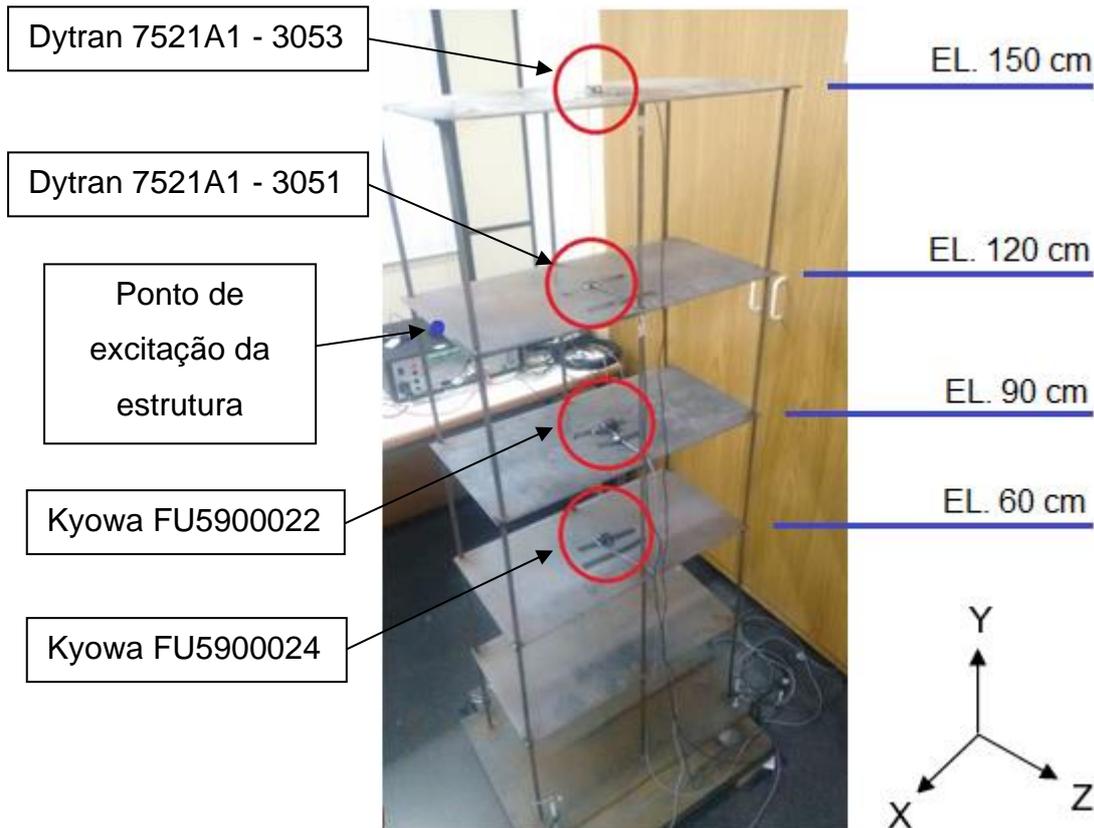


Figura 94 – Ensaio 1: Posição dos acelerômetros e ponto de excitação (eixo X)

A partir dos ensaios experimentais devido a uma excitação manual na direção X, foram obtidos os resultados descritos no domínio do tempo (acelerações, velocidades e deslocamentos). Os resultados de acelerações no domínio do tempo podem ser vistos nas Figuras 95 a 98, os resultados de velocidades no domínio do tempo e os resultados de deslocamentos no domínio do tempo podem ser vistos nas Figuras 203 a 206 e Figuras 207 a 210, respectivamente, localizadas no Anexo 1. As respostas no domínio da frequência na direção X são apresentadas nas Figuras 99 a 102.

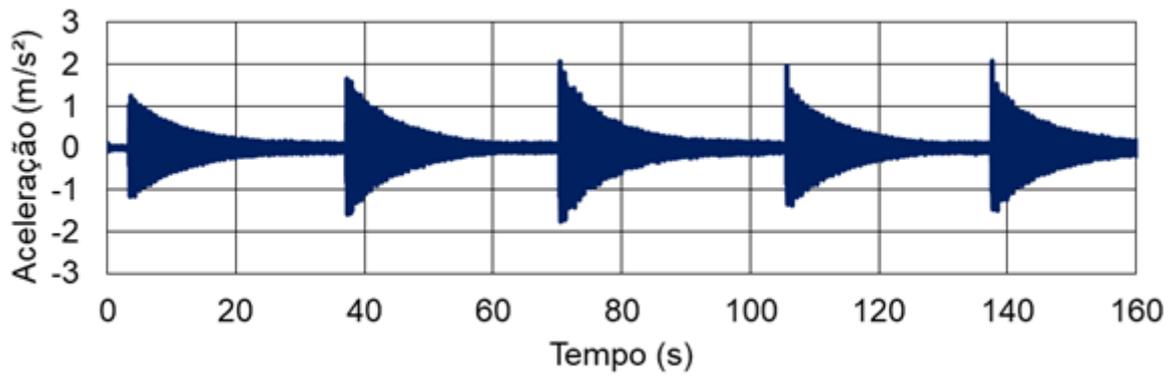


Figura 95 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X]

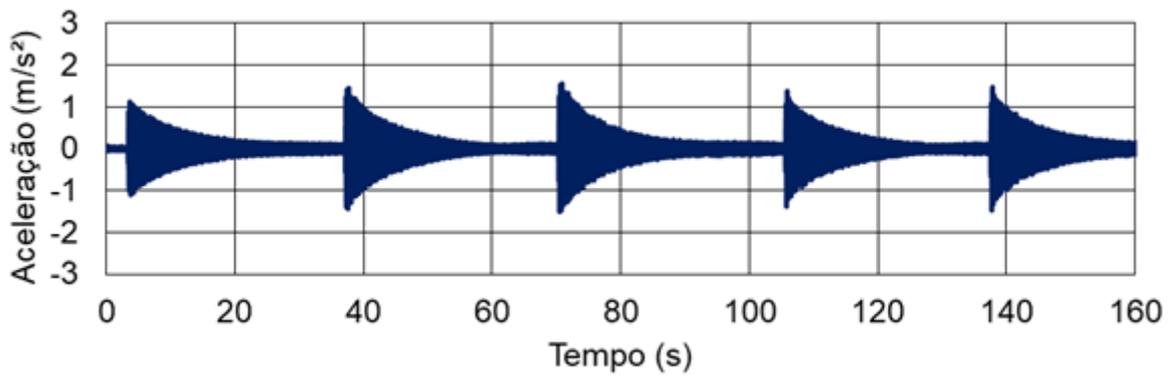


Figura 96 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [h = 120 cm. Eixo X]

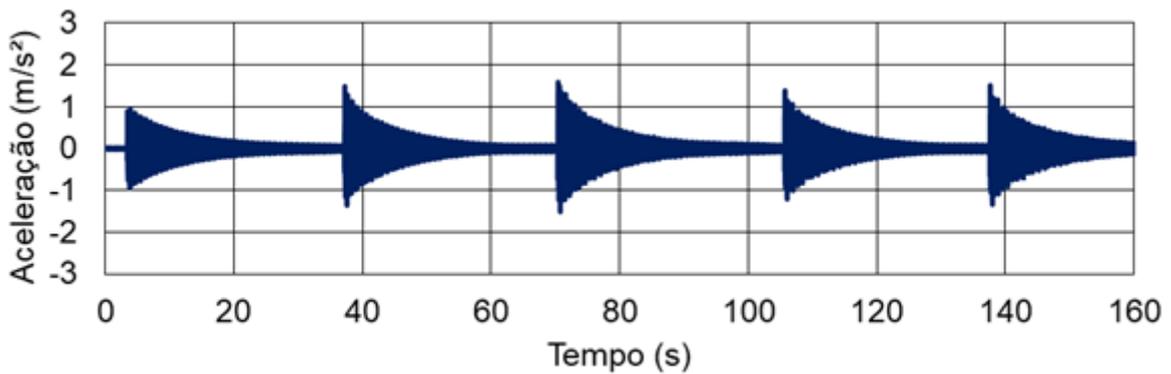


Figura 97 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [h = 90 cm. Eixo X]

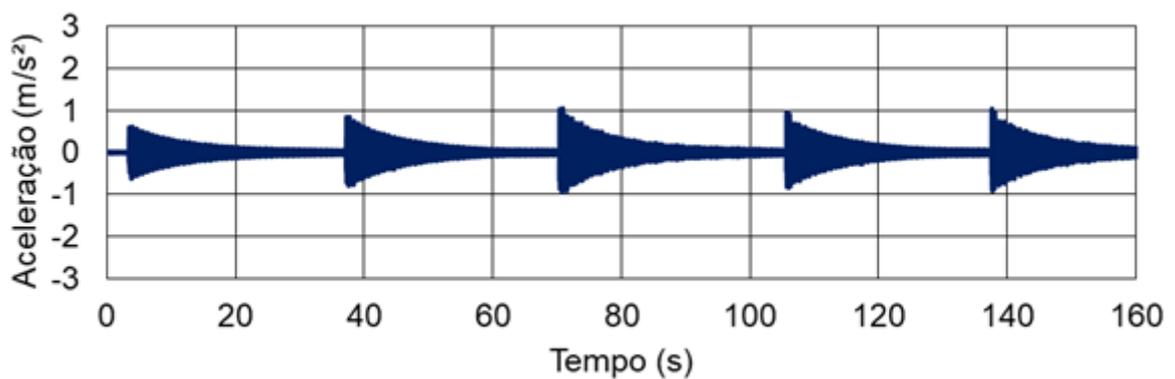


Figura 98 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [h = 60 cm. Eixo X]

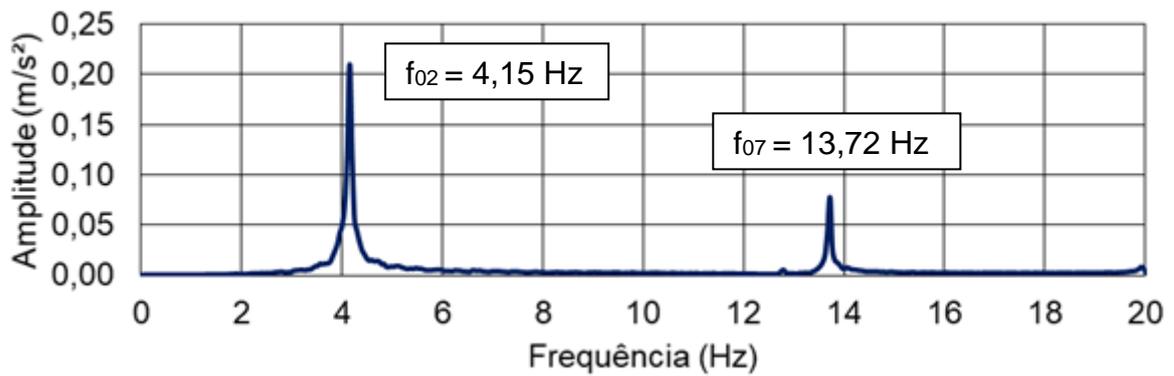


Figura 99 – Ensaio 1: espectro de freqüência [h = 150 cm. Eixo X]

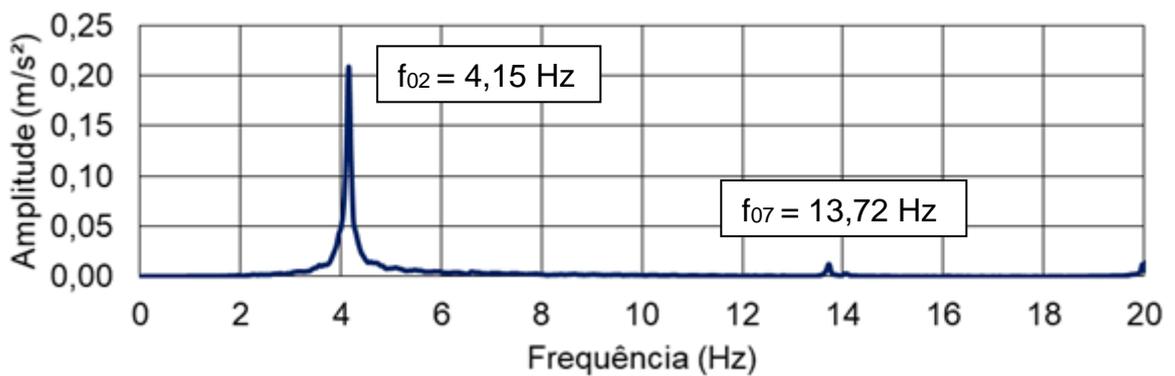


Figura 100 – Ensaio 1: espectro de freqüência [h = 120 cm. Eixo X]

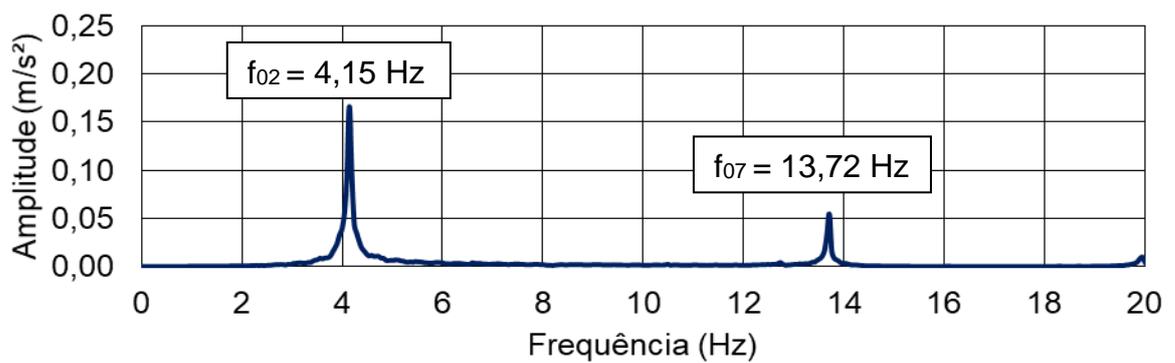


Figura 101 – Ensaio 1: espectro de freqüência [h = 90 cm. Eixo X]

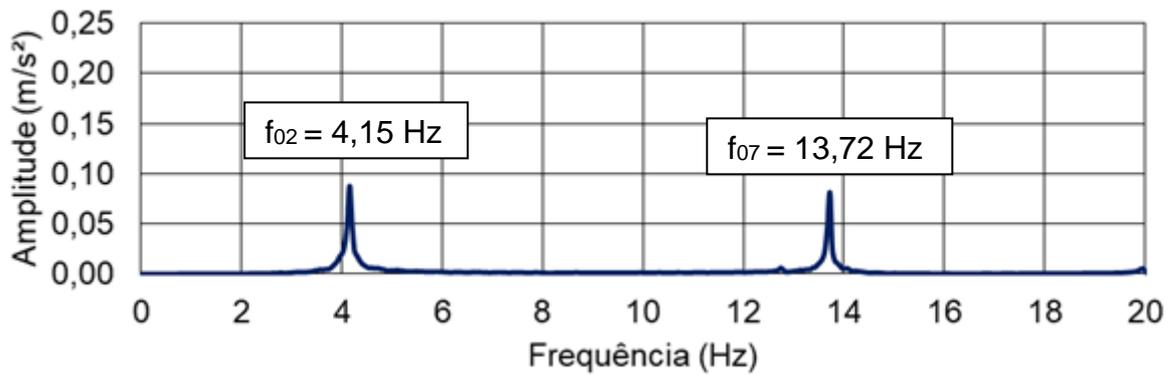


Figura 102 – Ensaio 1: espectro de frequência [h = 60 cm. Eixo X]

Analisando os resultados apresentados nas Figuras 99 a 102, nota-se que é possível identificar dois picos de frequência correspondentes a dois modos de vibração referentes a flexão [ $f_{02} = 4,15$  Hz;  $f_{07} = 13,72$  Hz]. Observa-se que não foram identificadas  $f_{01}$ ,  $f_{03}$ ,  $f_{04}$ ,  $f_{05}$  e  $f_{06}$ . Este fato ocorre devido às frequências  $f_{01}$ ,  $f_{04}$  e  $f_{05}$ , serem frequências correspondentes aos modos de vibração na direção Z (apresentas na seção 4.3.1), enquanto que  $f_{03}$  e  $f_{06}$  são frequências correspondentes a modos de vibração de torção, que não são objeto de estudo deste trabalho.

Seguindo o mesmo procedimento explicitado no ensaio na direção Z apresentado no item 4.3.1, encontra-se o segundo e sétimo modos de vibração, e seus respectivos coeficientes de amortecimento.

Os limites de filtragem das frequências naturais registradas na direção X estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Limites de filtragem das frequências naturais (eixo X)

Frequência natural	Filtro passa alta	Filtro passa baixa (Hz)
$f_{02} = 4,15$ Hz	3,66 Hz	4,64 Hz
$f_{07} = 13,72$ Hz	13,52 Hz	13,92 Hz

As Figuras 103 a 106 apresentam as respostas de cada acelerômetro em termos de aceleração no domínio do tempo referentes ao segundo modo de vibração, e as Figuras 107 a 110 apresentam os respectivos espectros de frequência.

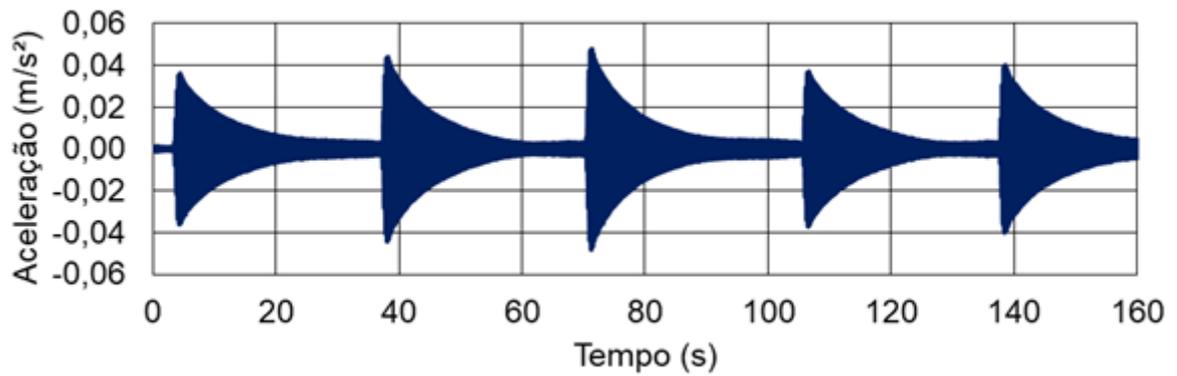


Figura 103 - Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [segundo modo: h = 150 cm. Eixo X]

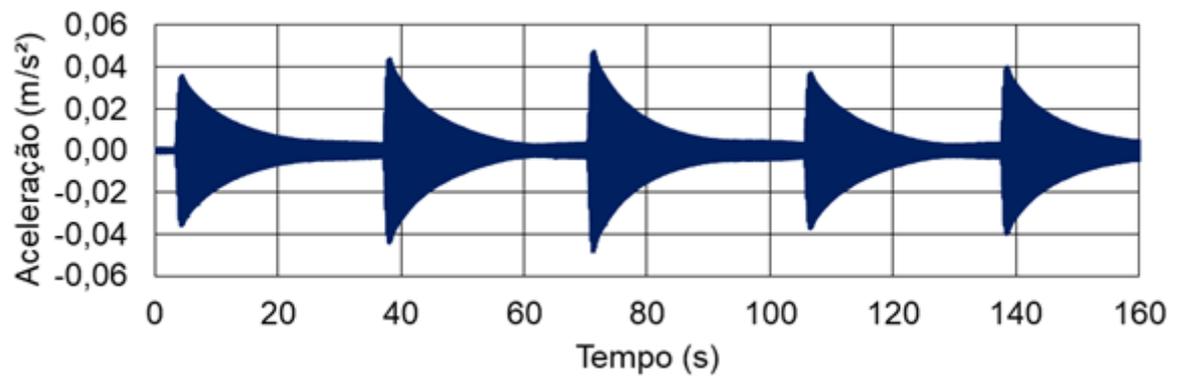


Figura 104 - Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [segundo modo: h = 120 cm. Eixo X]

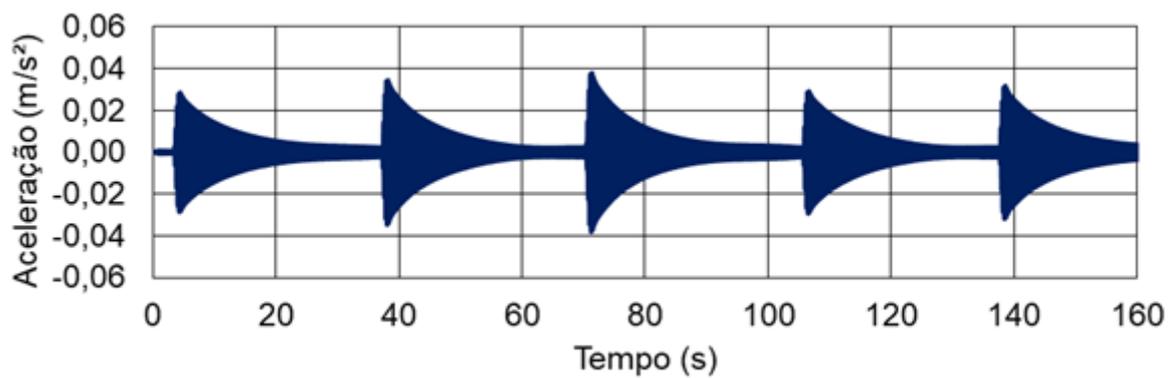


Figura 105 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [segundo modo: h = 90 cm. Eixo X]

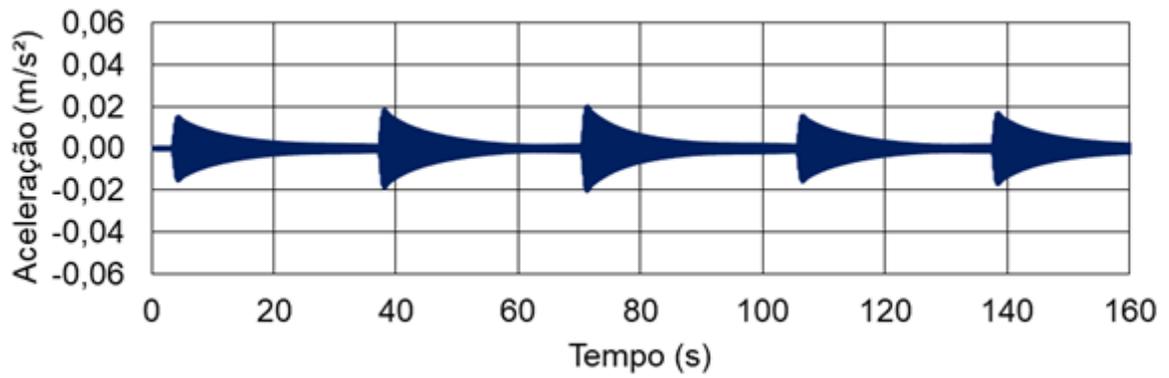


Figura 106 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [segundo modo:  $h = 60$  cm. Eixo X]

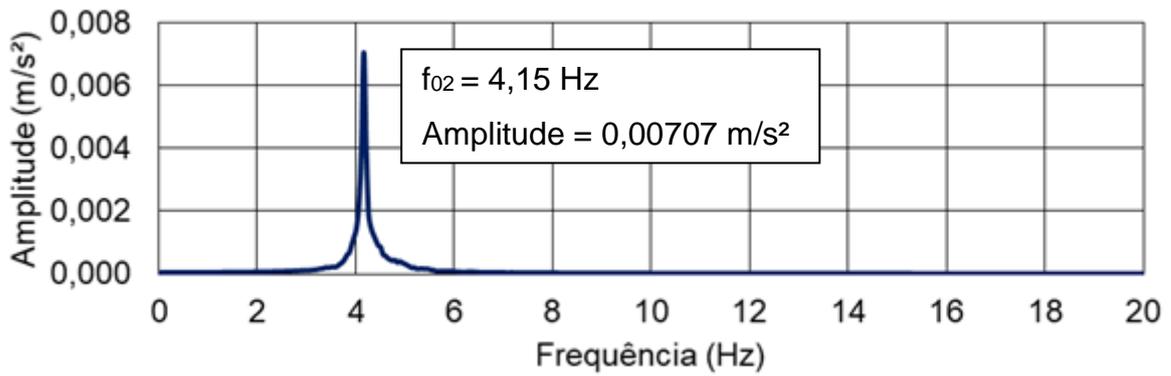


Figura 107 – Ensaio 1: espectro de frequência [segundo modo:  $h = 150$  cm. Eixo X]

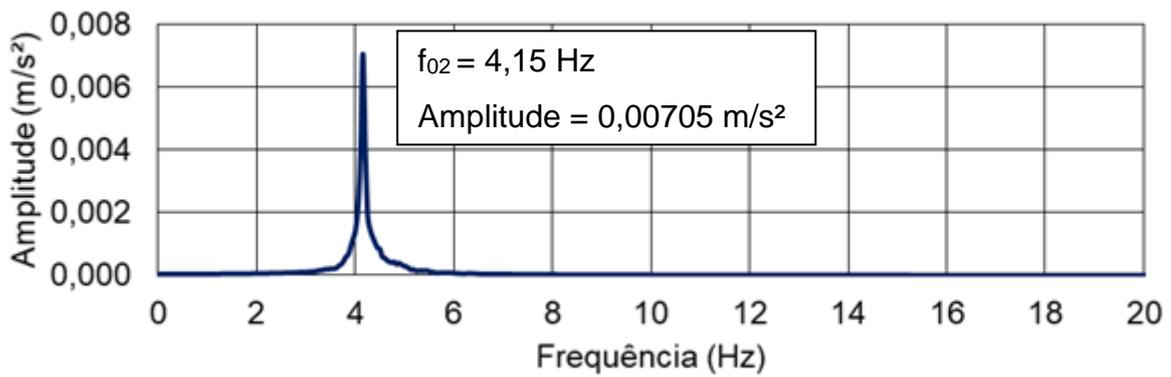


Figura 108 – Ensaio 1: espectro de frequência [segundo modo:  $h = 120$  cm. Eixo X]

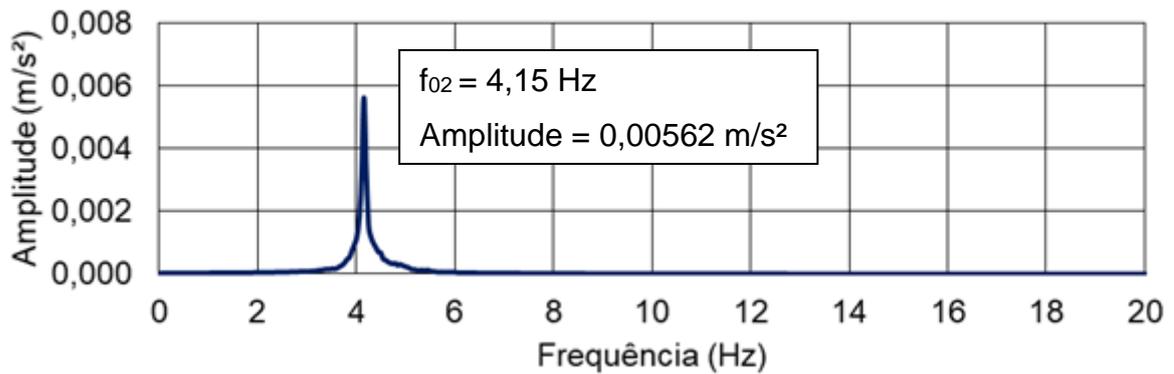


Figura 109 – Ensaio 1: espectro de frequência [segundo modo: h = 90 cm. Eixo X]

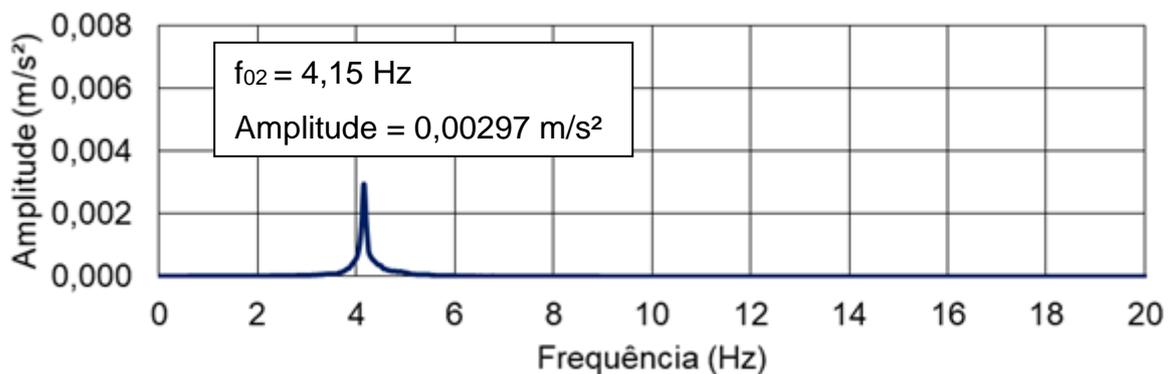


Figura 110 – Ensaio 1: espectro de frequência [segundo modo: h = 60 cm. Eixo X]

As Figuras 111 a 115 apresentam as respostas de cada acelerômetro em termos de aceleração no domínio do tempo referentes ao sétimo modo de vibração, e as Figuras 115 a 118 apresentam os respectivos espectros de frequência.

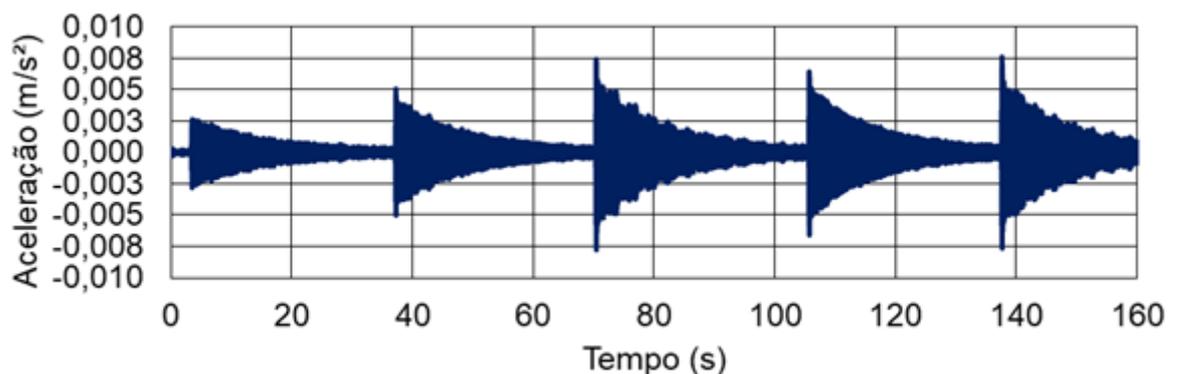


Figura 111 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [sétimo modo: h = 150 cm. Eixo X]

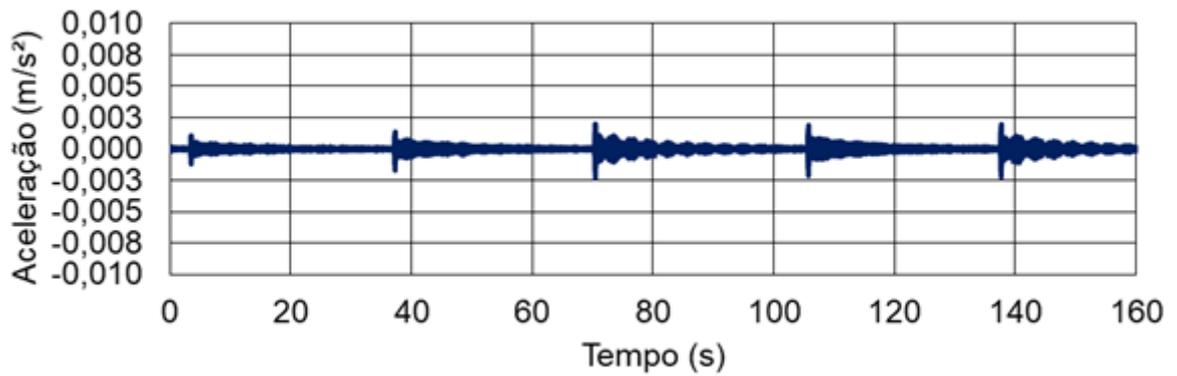


Figura 112 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [sétimo modo: h = 120 cm. Eixo X]

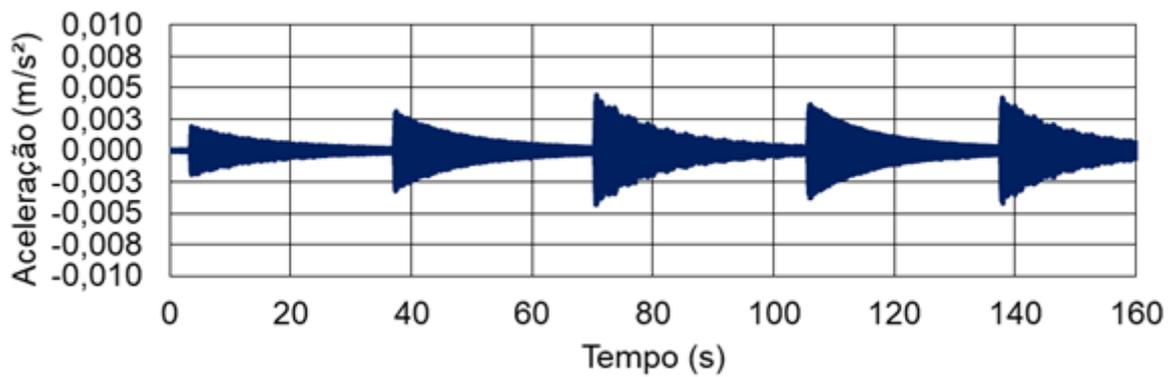


Figura 113 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [sétimo modo: h = 90 cm. Eixo X]

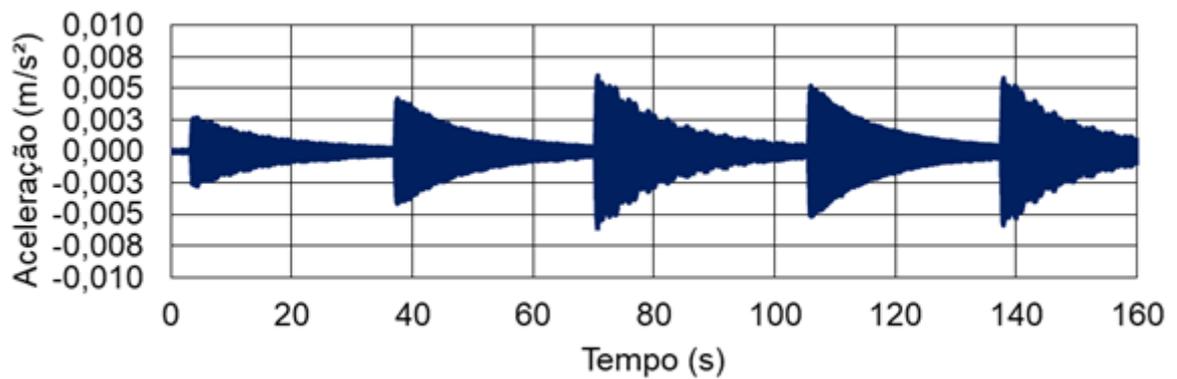


Figura 114 – Ensaio 1: aceleração no domínio do tempo [sétimo modo: h = 60 cm. Eixo X]

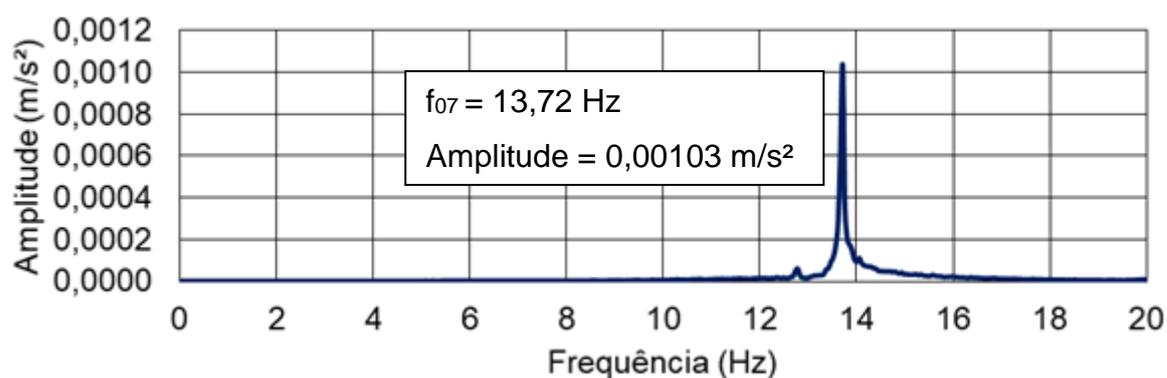


Figura 115 – Ensaio 1: espectro de frequência [sétimo modo:  $h = 150 \text{ cm}$ . Eixo X]

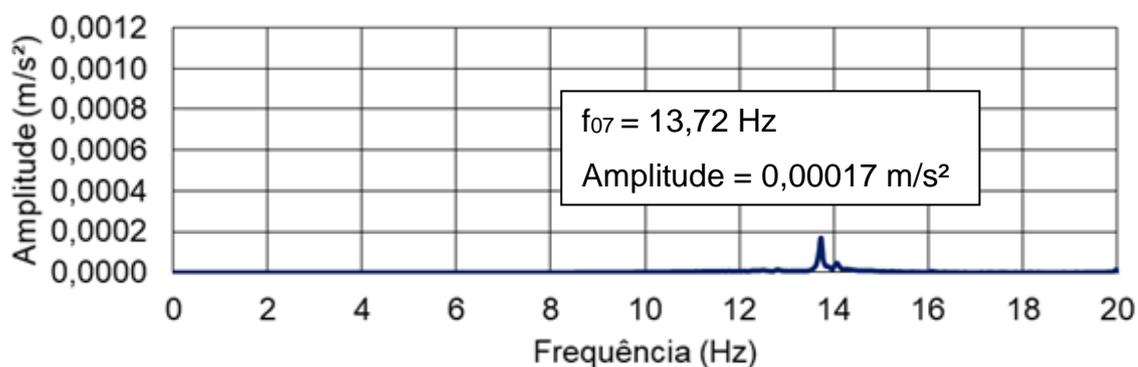


Figura 116 – Ensaio 1: espectro de frequência [sétimo modo:  $h = 120 \text{ cm}$ . Eixo X]

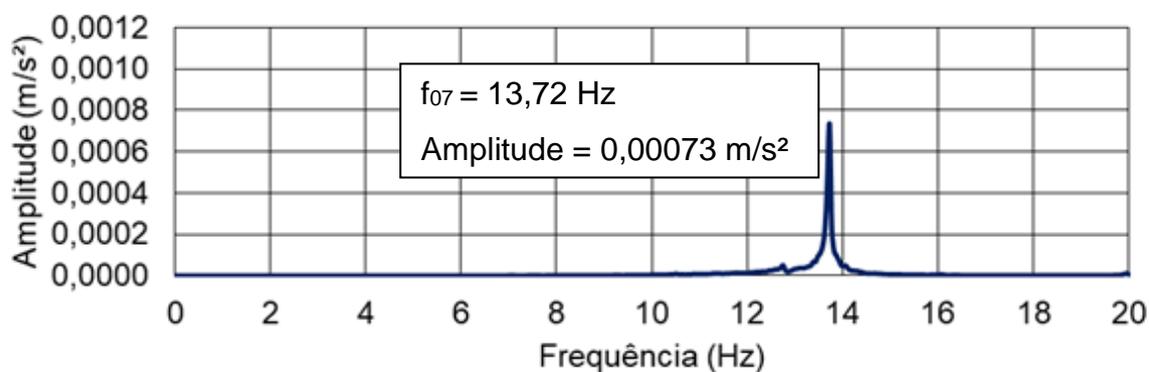


Figura 117 – Ensaio 1: espectro de frequência [sétimo modo:  $h = 90 \text{ cm}$ . Eixo X]

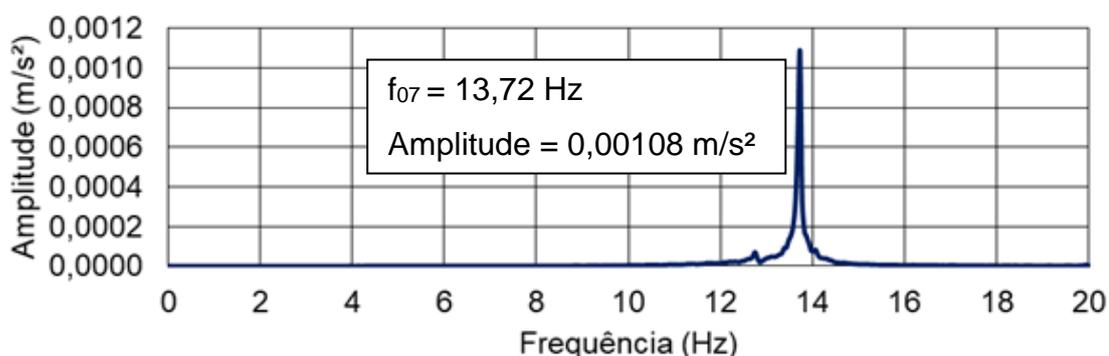


Figura 118 – Ensaio 1: espectro de frequência [sétimo modo: h = 60 cm. Eixo X]

Com relação ao segundo modo de vibração, a Tabela 15 mostra a correlação entre as amplitudes das frequências encontradas nas Figuras 107 a 110 e as amplitudes adotadas para esboçar o segundo modo de vibração. O segundo modo de vibração pode ser visualizado na Figura 119. No que diz respeito ao sétimo modo de vibração, a Tabela 16 mostra a correlação entre as amplitudes das frequências encontradas nas Figuras 115 a 118 e as amplitudes adotadas para esboçar o sétimo modo de vibração. O sétimo modo de vibração pode ser visualizado na Figura 120.

Tabela 15 – Correlação entre amplitudes do segundo modo de vibração (eixo X)

Acelerômetro / altura	Amplitude da Frequência (m/s <sup>2</sup> )	Amplitude do Modo de Vibração
Dytran 3053 (h = 150 cm)	0,00707	1,00
Dytran 3051 (h = 120 cm)	0,00705	0,99
Kyowa FU5900022 (h = 90 cm)	0,00562	0,79
Kyowa FU5900024 (h = 60 cm)	0,00297	0,42
Base (h = 0 cm)	-	0

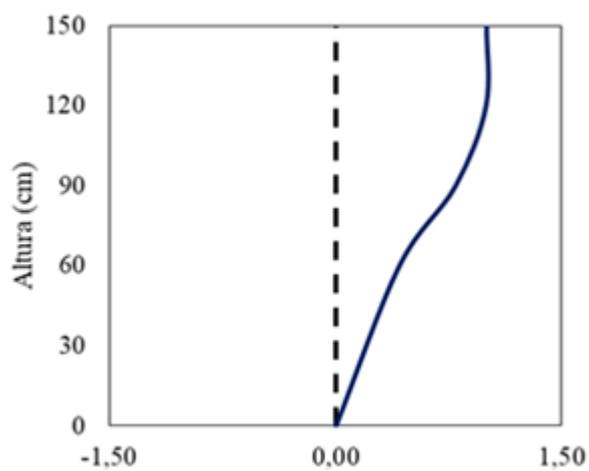


Figura 119 – Ensaio 1: 2º Modo de Vibração Experimental

Tabela 16 – Correlação entre amplitudes do sétimo modo de vibração (eixo X)

Acelerômetro / altura	Amplitude da Frequência (m/s <sup>2</sup> )	Amplitude do Modo de Vibração
Dytran 3053 (h = 150 cm)	0,00103	0,95
Dytran 3051 (h = 120 cm)	0,00017	0,16
Kyowa FU5900022 (h = 90 cm)	0,00073	-0,67
Kyowa FU5900024 (h = 60 cm)	0,00108	-1,00
Base (h = 0 cm)	-	0,00

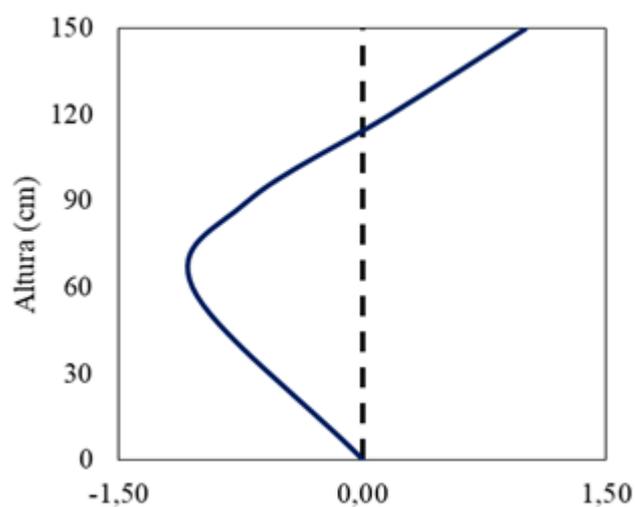


Figura 120 – Ensaio 1: 7º Modo de Vibração Experimental

Os coeficientes de amortecimentos modais da estrutura relativos ao segundo e sétimo modos de vibração foram obtidos pelo método de decremento logarítmico a partir dos dados no domínio do tempo relacionados aos respectivos modos de vibração apresentados nas Figuras 103 a 106 e Figuras 111 a 114, respectivamente. A Tabela 17 apresenta os coeficientes de amortecimento do segundo e sétimo modos de vibração.

Tabela 17 – Coeficientes de amortecimento (eixo X)

Modo de vibração	Coefficiente de amortecimento $\xi$ (%)
$f_{02}$	0,55
$f_{07}$	0,42

Em síntese, neste ensaio, foram obtidos cinco diferentes valores de frequências naturais da estrutura correspondentes cinco diferentes modos de vibração, sendo três modos de vibração correspondentes a modos de vibração de flexão na direção Z ( $f_{01}$ ,  $f_{04}$  e  $f_{05}$ ), dois modos de vibração correspondentes a modos de vibração de flexão na direção X ( $f_{02}$  e  $f_{07}$ ). As frequências naturais  $f_{03}$  e  $f_{06}$  não apareceram durante os ensaios pois são frequências naturais referentes a modos vibração de torção da estrutura. A Figura 121 apresenta um resumo das frequências naturais e modos de vibração obtidos no ensaio.

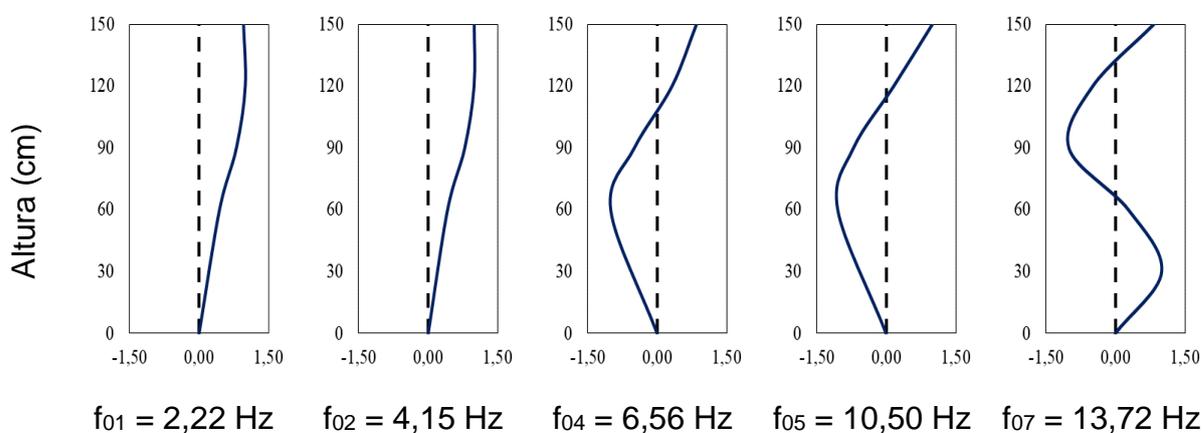


Figura 121 – Frequências naturais e modos de vibração obtidos no Ensaio 1

Neste ensaio também foram obtidos cinco diferentes valores de coeficientes de amortecimento da estrutura (ver Tabela 18), associados aos cinco modos de vibração obtidos. Analisando a Tabela 18, nota-se que, com exceção do coeficiente de amortecimento associado ao sétimo modo de vibração, os demais coeficientes apresentam um comportamento crescente, partindo do primeiro modo de vibração em diante. Este padrão está de acordo com o padrão que se é esperado, descrito na literatura. O fato de o coeficiente de amortecimento referente ao sétimo modo de vibração ter se mostrado exceção a esse padrão pode ser um indicativo de que este valor está apresentando uma baixa precisão. Esta conclusão é corroborada com o fato de haver uma má qualidade do sinal da aceleração no domínio do tempo referentes este modo de vibração (ver Figuras 111 a 114), que apresentam oscilações indesejadas em seu formato, prejudicando assim a aplicação do método do decremento logarítmico.

Tabela 18 – Coeficientes de amortecimento obtidos no ensaio 1

Modo de vibração	Coefficiente de amortecimento $\xi$ (%)
f <sub>01</sub>	0,22
f <sub>02</sub>	0,55
f <sub>04</sub>	0,68
f <sub>05</sub>	0,93
f <sub>07</sub>	0,42

#### 4.4 Ensaio 2: Excitação manual: PDV 100

Este ensaio tem como objetivo servir de parâmetro de sustentação dos resultados do ensaio realizado com os acelerômetros no item 4.3 em termos de frequências naturais da estrutura. Assim como dito anteriormente, é de suma importância à escolha do ponto de excitação da estrutura, e no caso deste ensaio, a escolha do ponto medição da resposta da estrutura, ou seja, o ponto de contato da estrutura com o feixe do laser do vibrômetro PDV 100. O ponto de excitação da estrutura foi escolhido de forma a evitar ao máximo excentricidades de aplicação de

carga, e conseqüentemente movimentos de torção na estrutura durante o ensaio. Outro fator determinante para escolha da região de aplicação da carga foi à busca por maior fluidez e amplitude de movimento.

É necessário ressaltar que o sistema de medição com vibrometria a laser é um sistema com uma única saída de dados (SISO), ou seja, por fornecer apenas um ponto de resposta ao longo da altura do edifício, portanto, não sendo possível obter os modos de vibração da estrutura através deste ensaio.

Em ambos os ensaios (direção Z e direção X) foi adotada uma altura de 120 cm para a aplicação da carga de excitação “manual” na estrutura. Esta excitação foi aplicada horizontalmente.

O aparelho de vibrometria a laser PDV 100 está conectado ao seu sistema de aquisição de dados que, pelo efeito Doppler, ou seja, pela variação da frequência assim como do comprimento de onda do feixe de luz incidido e refletido na estrutura, obtém como resposta dados da velocidade no domínio do tempo. Esta resposta é enviada ao software de aquisição de dados e pós-processamento “*Polytec Vibrometer Software*” que permite a obtenção da resposta no domínio da frequência, bem como a adequada filtragem dos sinais obtidos.

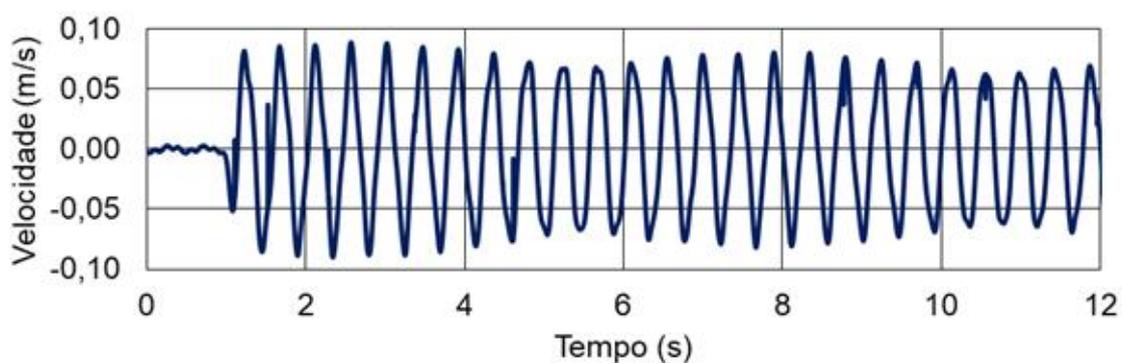
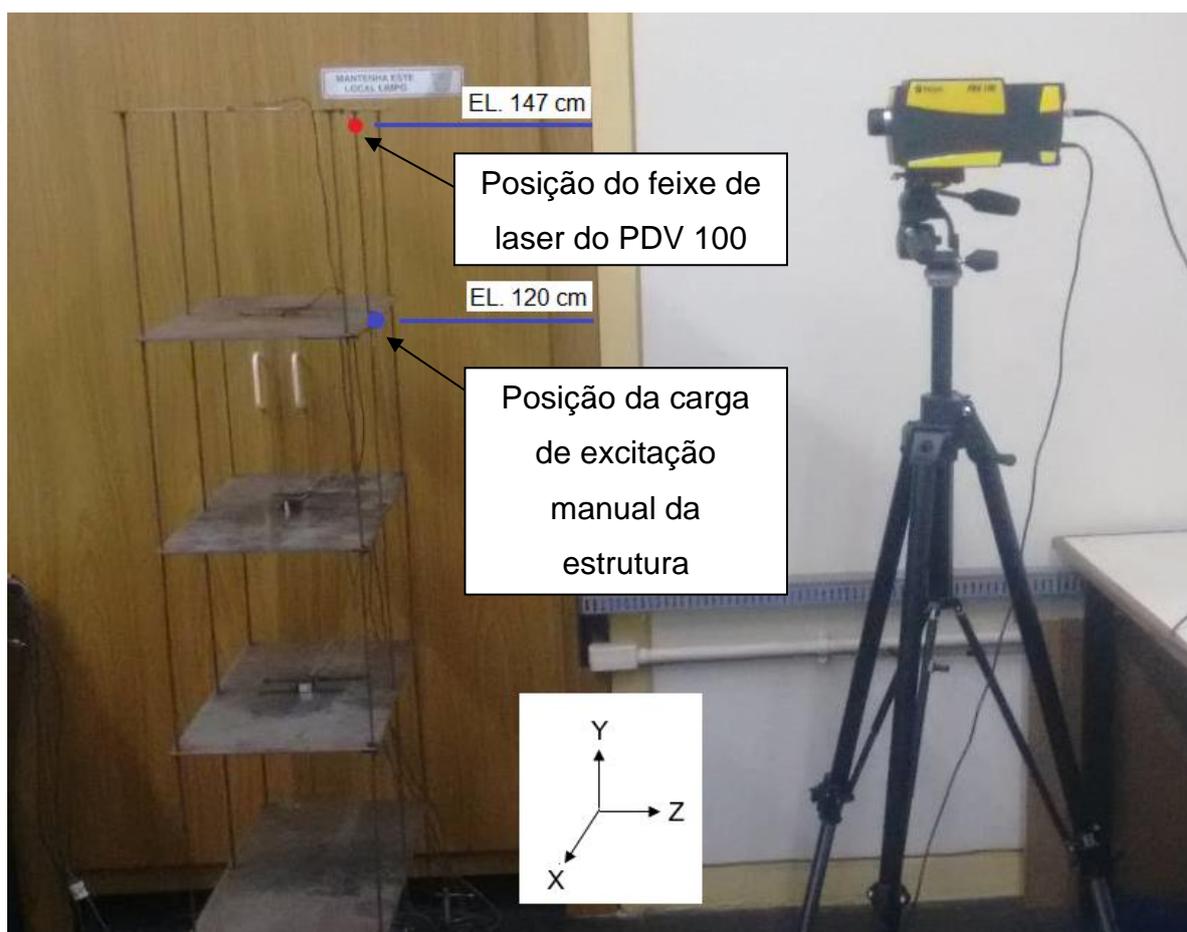
É importante ressaltar que uma vez que a carga imprimida na estrutura pela excitação manual não foi mensurada, não é possível obter a FRF do ponto analisado neste ensaio. Entretanto, as frequências naturais da estrutura são igualmente identificadas através da FFT (*Fast Fourier Transform* – transformada rápida de Fourier) correspondente à resposta de saída associada ao PDV 100 utilizado na análise modal experimental da estrutura, que são automaticamente elaboradas pelo software.

#### 4.4.1 Ensaio 2: excitação manual: PDV-100 (Direção Z)

A altura do posicionamento do feixe de laser do vibrômetro na estrutura neste ensaio foi de 147 cm. O ponto de excitação da estrutura, bem como o posicionamento adotado para o contato da estrutura com o feixe de laser do vibrômetro referentes ao ensaio na direção Z, podem ser observados na Figura 122.

A partir dos ensaios experimentais devido a uma excitação manual na direção Z, foram obtidos resultados descritos no domínio do tempo (acelerações, velocidades e deslocamentos). O resultado de velocidade no domínio do tempo pode ser visto na

Figura 123. Os resultados de aceleração no domínio do tempo e deslocamento no domínio do tempo estão apresentados nas Figuras 211 e 212, respectivamente, no Anexo 1. A resposta no domínio da frequência na direção Z é apresentada na Figura 124 extraída do software de dados e pós-processamento *Polytec Vibrometer Software*.



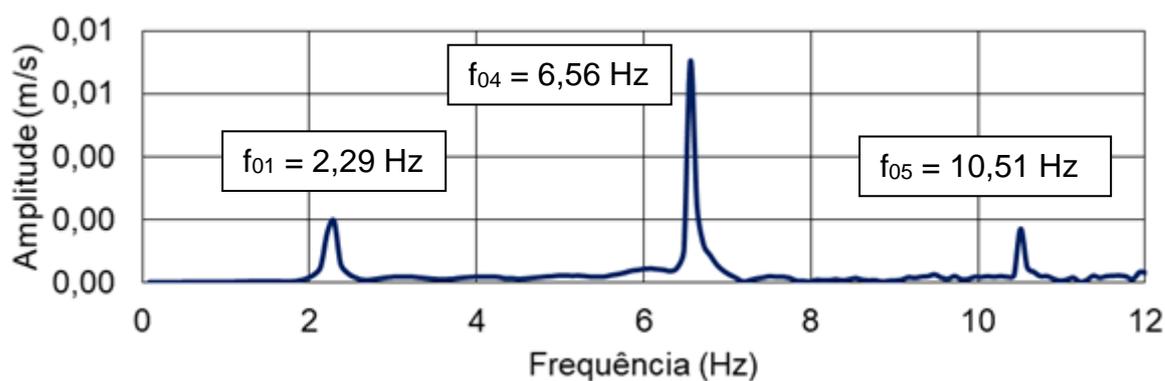


Figura 124 – Ensaio 2: espectro de frequência [h = 147 cm. Eixo Z]

#### 4.4.2 Ensaio 2: excitação manual: PDV-100 (Direção X)

A altura do posicionamento do feixe de laser do vibrômetro na estrutura neste ensaio foi de 150 cm. O ponto de excitação da estrutura, bem como o posicionamento adotado para o contato da estrutura com o feixe de laser do vibrômetro referentes ao ensaio na direção X, podem ser observados na Figura 125.

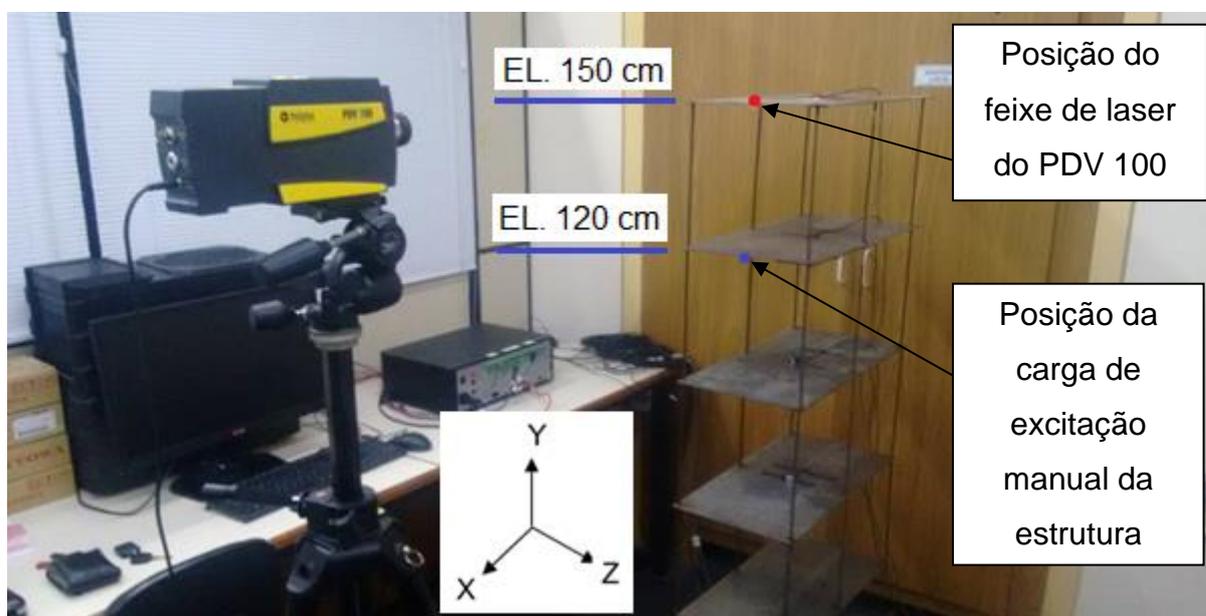


Figura 125 Posição do feixe de laser e posição do ponto de excitação (eixo X)

A partir dos ensaios experimentais devido a uma excitação manual na direção X, foram obtidos resultados descritos no domínio do tempo (acelerações, velocidades

e deslocamentos). O resultado da velocidade no domínio do tempo está apresentado na Figura 126. Os resultados de aceleração no domínio do tempo e velocidade no domínio do tempo estão apresentados nas Figuras 213 e 214, respectivamente, localizadas no Anexo 1. A resposta no domínio da frequência na direção X é apresentada na Figura 127 extraída do software de dados e pós-processamento *Polytec Vibrometer Software*.

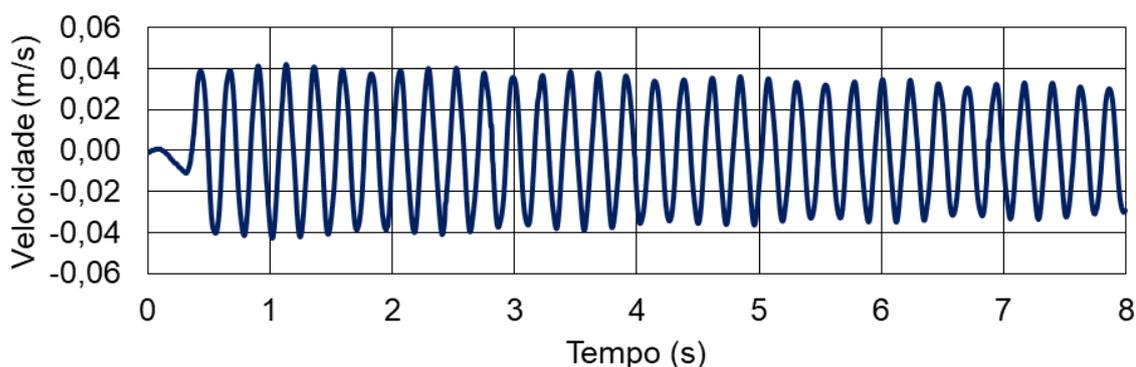


Figura 126 – Ensaio 2: velocidade no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X]

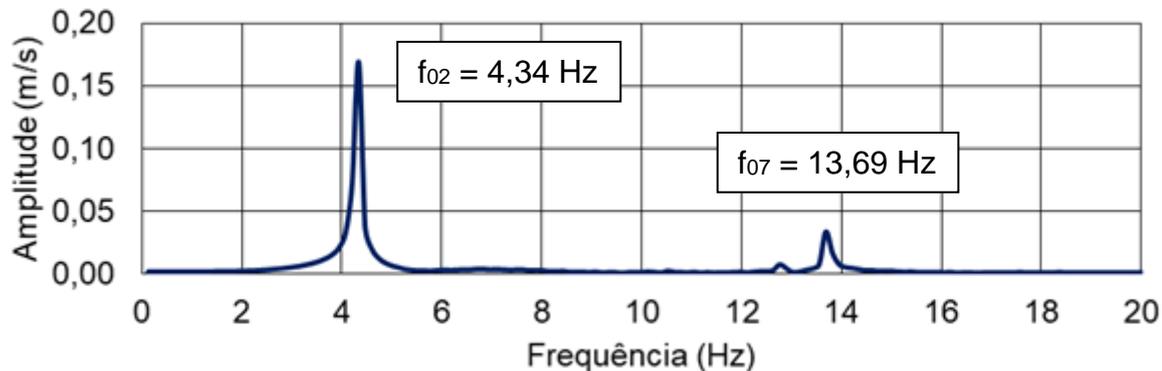


Figura 127 – Ensaio 2: espectro de frequência [h = 150 cm. Eixo X]

#### 4.4.3 Análise dos resultados do Ensaio 2

Analisando os resultados referentes ao ensaio na direção Z apresentados na Figura 124, nota-se que é possível identificar três picos de frequência correspondentes a três modos de vibração referentes à flexão [ $f_{01} = 2,29$  Hz;  $f_{04} = 6,56$  Hz;  $f_{05} = 10,51$  Hz]. Por outro lado, no tocante aos resultados referentes ao ensaio na direção X apresentados na Figura 127, nota-se que é possível identificar dois picos de frequência correspondentes a dois modos de vibração referentes à flexão [ $f_{02} = 4,34$  Hz;  $f_{07} = 13,69$  Hz]. Estes valores, tanto referentes a direção Z quanto referentes

a direção X, são bem próximos dos valores de frequência obtidos no ensaio com os acelerômetros no item 4.3, fator corroborante com a validade dos resultados obtidos. Observa-se que não foram identificadas  $f_{03}$  e  $f_{06}$  em nenhum dos ensaios. Este fato ocorre, pois  $f_{03}$  e  $f_{06}$  são frequências correspondentes a modos de vibração de torção.

#### 4.5 Ensaio 3: Excitação manual: Vibration

Este ensaio tem como objetivo servir como mais um parâmetro de sustentação dos resultados dos ensaios realizados com os acelerômetros no item 4.3 em termos de frequências naturais da estrutura. Assim como dito anteriormente, é de suma importância à escolha do ponto de excitação da estrutura, e no caso deste ensaio, a escolha do posicionamento do smartphone sobre a mesma. O ponto de excitação da estrutura fora escolhido de forma a evitar ao máximo excentricidades de aplicação de carga e, conseqüentemente, movimentos de torção na estrutura durante o ensaio. Outro fator determinante no tocante a escolha da região de aplicação da carga foi a busca por maior fluidez e amplitude de movimento. O smartphone foi posicionado sobre a laje de cobertura do edifício, pois esta é a região com maior amplitude de movimento.

É necessário ressaltar que o sistema de medição com o aplicativo Vibration é um sistema com uma única saída de dados (SISO), ou seja, fornece apenas um ponto de resposta ao longo da altura do edifício. Sendo assim, não será possível obter os modos de vibração da estrutura através deste ensaio.

Em ambos os ensaios (Direção Z e direção X), foi adotada uma altura de 120 cm para o ponto de aplicação da carga (que como nos ensaios anteriores, será aplicada horizontalmente) e uma altura de 150 cm para o posicionamento do *smartphone*.

É importante ressaltar que, assim como nos ensaios realizados nos itens 4.3 e 4.4, uma vez que a carga aplicada na estrutura pela excitação manual não foi mensurada, não é possível obter a FRF do ponto analisado neste ensaio. Entretanto, as frequências naturais da estrutura são igualmente identificadas através da FFT (*Fast Fourier Transform* – transformada rápida de Fourier) correspondente à resposta de saída.

#### 4.5.1 Ensaio 3: excitação manual: Vibration (Direção Z)

O ponto de excitação da estrutura, bem como o posicionamento do iPhone referentes ao ensaio na direção Z, podem ser observados na Figura 128.

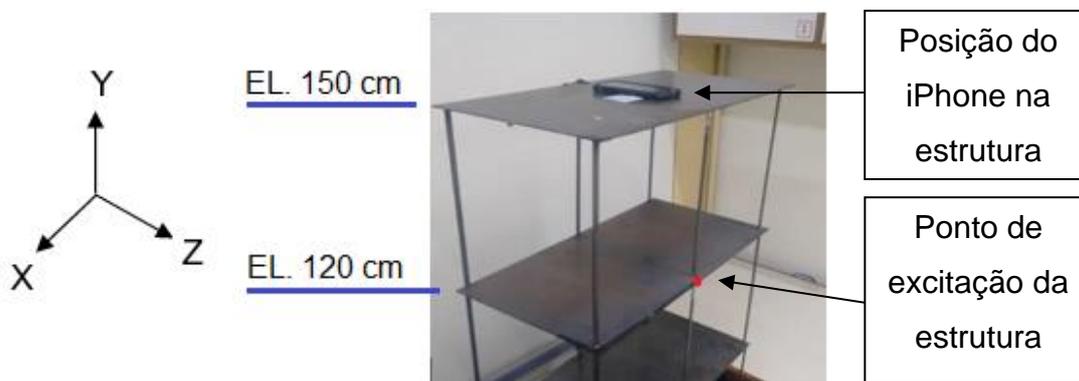


Figura 128 – Posição do iPhone e do ponto de excitação manual (eixo Z)

A partir dos ensaios experimentais devido a uma excitação manual na direção Z, foram obtidos resultados descritos no domínio do tempo (acelerações, velocidades e deslocamentos). O resultado de aceleração no domínio do tempo pode ser visto na Figura 129. O resultado de velocidade no domínio do tempo e o resultado de deslocamento no domínio do tempo são apresentados nas Figuras 215 e 216, respectivamente, localizadas no Anexo 1. A resposta no domínio da frequência na direção Z é apresentada na Figura 130.

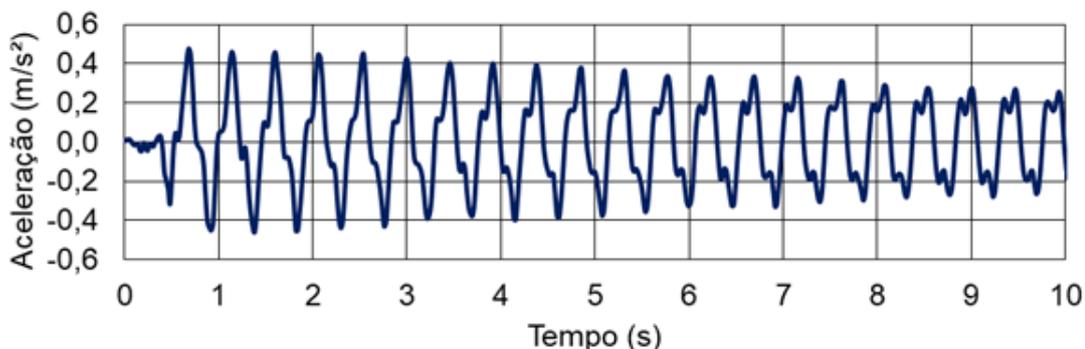


Figura 129 – Ensaio 3: aceleração no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z]

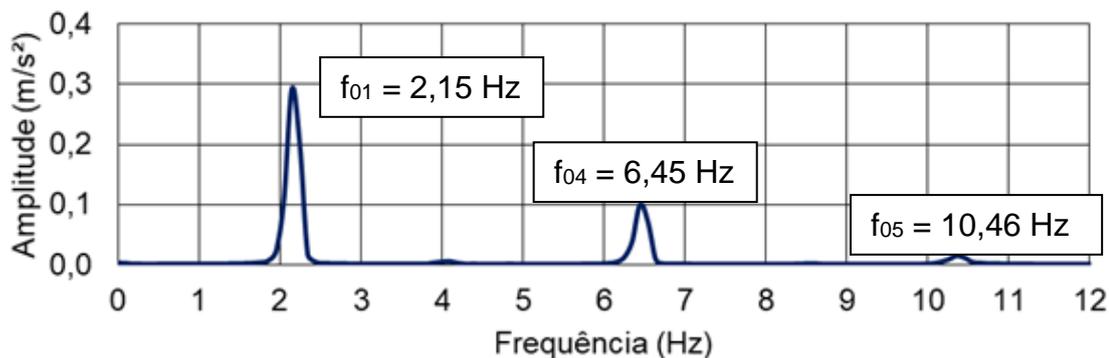


Figura 130 – Ensaio 3: espectro de frequência [h = 150 cm. Eixo Z]

#### 4.5.2 Ensaio 3: excitação manual: Vibration (Direção X)

O ponto de excitação da estrutura, bem como o posicionamento do iPhone referentes ao ensaio na direção X, podem ser observados na Figura 131.

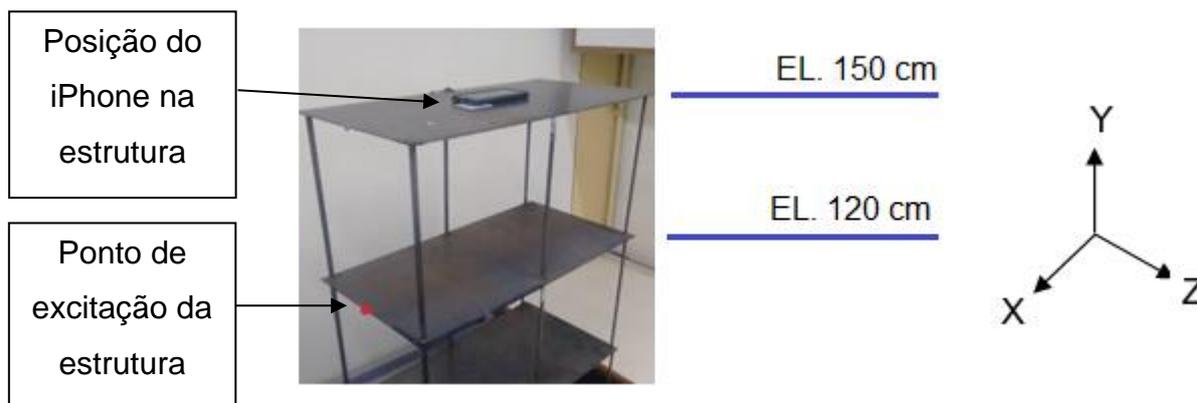


Figura 131 – Posição do iPhone e do ponto de excitação manual (eixo X)

A partir dos ensaios experimentais devido a uma excitação manual na direção X, foram obtidos resultados descritos no domínio do tempo (acelerações, velocidades e deslocamentos). O resultado de aceleração no domínio do tempo pode ser visto na Figura 132. O resultado de velocidade no domínio do tempo e o resultado de deslocamento no domínio do tempo estão apresentados nas Figuras 217 e 218, respectivamente, localizadas no Anexo 1. A resposta no domínio da frequência na direção X é apresentada na Figura 133.

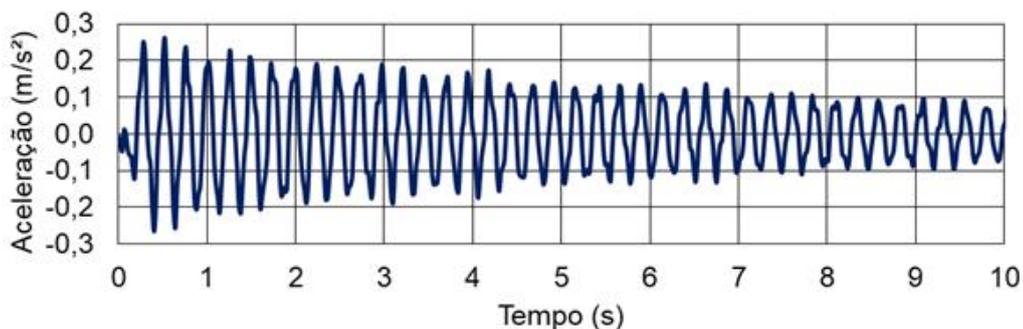


Figura 132 – Ensaio 3: aceleração no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X]

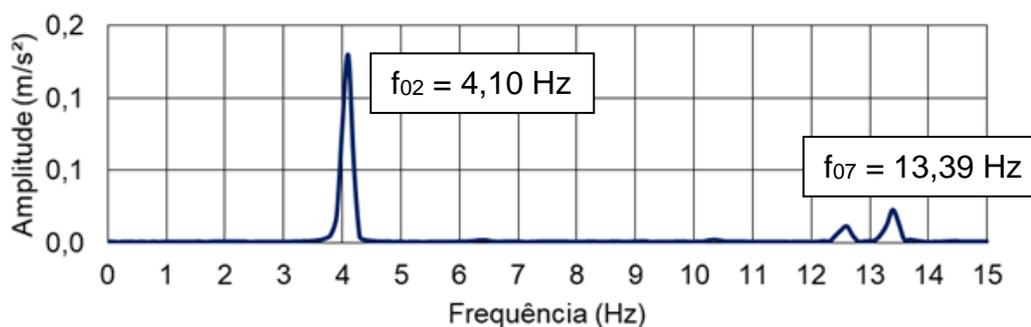


Figura 133 – Ensaio 3: espectro de frequência [h = 150 cm. Eixo X]

#### 4.5.3 Análise dos resultados do Ensaio 3

Analisando os resultados referentes ao ensaio na direção Z apresentados na Figura 130, nota-se que é possível identificar três picos de frequência correspondentes a três modos de vibração referentes à flexão [ $f_{01} = 2,15$  Hz;  $f_{04} = 6,45$  Hz;  $f_{05} = 10,46$  Hz]. Todavia, no tocante aos resultados referentes ao ensaio na direção X apresentados na Figura 133, nota-se que é possível identificar dois picos de frequência correspondentes a dois modos de vibração referentes à flexão [ $f_{02} = 4,10$  Hz;  $f_{07} = 13,39$  Hz]. Estes valores, tanto referentes a direção Z quanto referentes a direção X, são bem próximos dos valores de frequência obtidos no ensaio com os acelerômetros no item 4.3, fator corroborante com a validade dos resultados obtidos. Observa-se que, como ocorreu nos ensaios 1 e 2, neste também não foram identificadas  $f_{03}$  e  $f_{06}$  em nenhum dos ensaios. Este fato ocorre, pois  $f_{03}$  e  $f_{06}$  são frequências correspondentes a modos de vibração de torção.

#### 4.6 Ensaio 4: Excitação manual: Captura de vídeo

Este ensaio tem como objetivo servir como mais um parâmetro de sustentação dos resultados dos ensaios realizados com os acelerômetros no item 4.3 em termos de frequências naturais da estrutura. Assim como dito anteriormente, é de suma importância a escolha do ponto de excitação da estrutura, e no caso deste ensaio, a escolha do posicionamento da câmera de vídeo na filmagem. O ponto de excitação da estrutura foi escolhido de forma a evitar ao máximo excentricidades de aplicação de carga, e consequentemente movimentos de torção na estrutura durante o ensaio. Outro fator determinante no que se refere a escolha da região de aplicação da carga foi a busca por maior fluidez e amplitude de movimento.

No que diz respeito à filmagem do ensaio, sendo o objetivo da imagem a obtenção de um sinal representativo do deslocamento da estrutura no domínio do tempo, algumas precauções foram tomadas no momento do ensaio, tais como: realização do ensaio em um ambiente bem iluminado, que permita que a vídeo câmera permaneça imóvel durante todo o ensaio e o posicionamento adequado da vídeo câmera o mais perpendicular possível do movimento da estrutura.

O software que fará a leitura da imagem de vídeo e registrará a trajetória do deslocamento da estrutura necessita de uma região de análise como guia, portanto, na laje superior da estrutura foi colado um papel com algumas marcações, as quais, uma funcionará como guia para o software captar a trajetória, e outras funcionarão como parâmetro de medida. Este parâmetro de medida é importante, pois é ele que vai situar o software da ordem de grandeza dos movimentos. A Figura 134 mostra as marcações feitas na estrutura durante o ensaio para auxiliar o *software Tracker*.

É necessário ressaltar que o sistema de medição com filmagem de vídeo é um sistema com uma única saída de dados (SISO), ou seja, por fornecer apenas um ponto de resposta ao longo da altura do edifício, não será possível obter os modos de vibração da estrutura através deste ensaio.

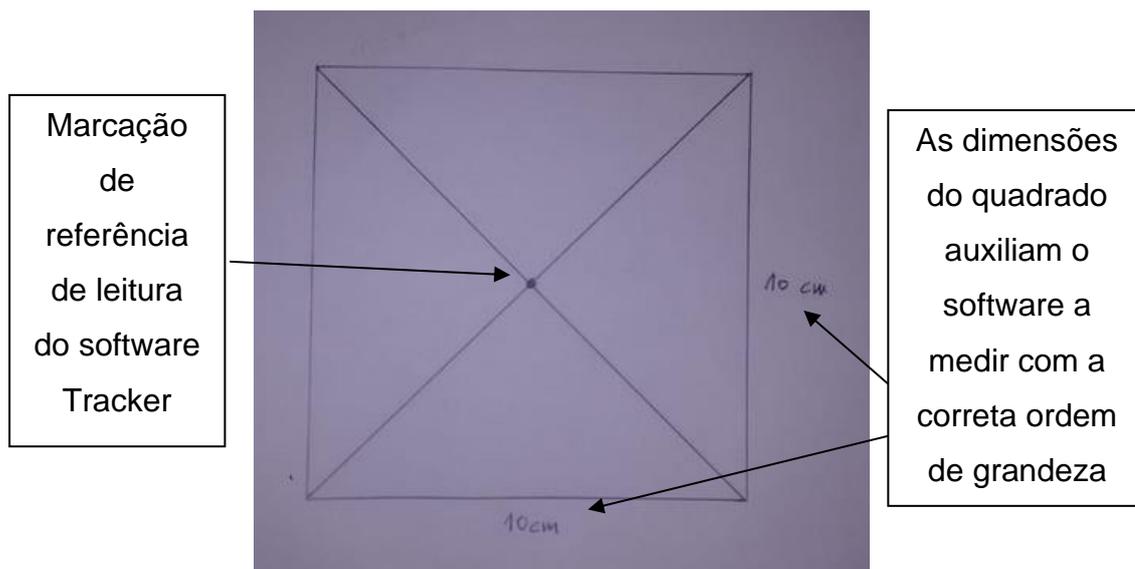


Figura 134 – Marcações feitas no topo da estrutura para auxiliar na análise

O ponto de excitação da estrutura foi escolhido a uma altura de 120 cm da base e o posicionamento do smartphone foi definido baseado em uma proximidade suficiente para que as marcações feitas na estrutura estejam nítidas na filmagem de vídeo e estejam aparentes durante todo o processo de filmagem. Vale ressaltar que a câmera de vídeo deve estar tanto mais alinhada e perpendicular da trajetória do movimento da estrutura quanto possível.

É importante ressaltar que uma vez que a carga imprimida na estrutura pela excitação manual não foi mensurada, não é possível obter a FRF do ponto analisado neste ensaio. Entretanto, as frequências naturais da estrutura são igualmente identificadas através da FFT (*Fast Fourier Transform* – transformada rápida de Fourier) correspondente à resposta de saída associada a análise com a câmera de vídeo elaborada pelo *software Tracker*. O *software Tracker* não é capaz de gerar as FFTs, portanto, visando a elaboração das mesmas, foram exportados os dados de deslocamento no domínio do tempo para o *software Excel*, que foi o software responsável pela elaboração das mesmas.

#### 4.6.1 Ensaio 4: excitação manual: Captura de vídeo (Direção Z)

A Figura 135 apresenta o posicionamento da câmera de vídeo bem como o ponto de excitação da estrutura escolhido para o ensaio na direção Z.

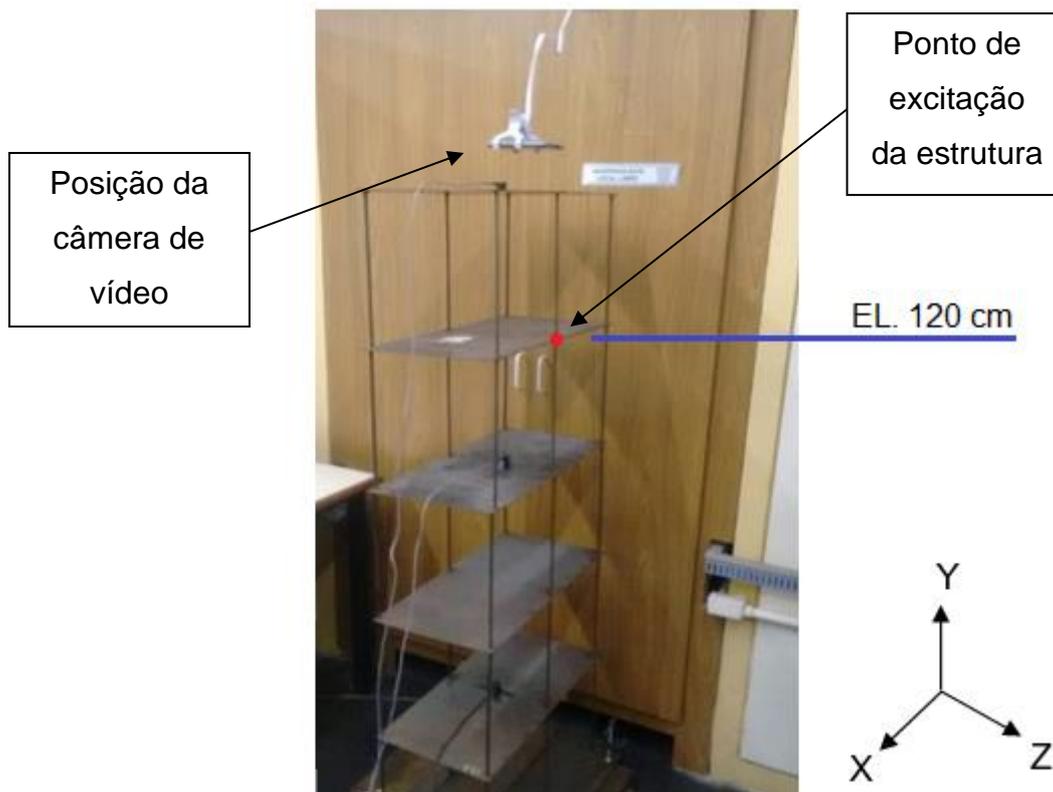


Figura 135 – Posição da câmera e do ponto de excitação (eixo Z)

A partir dos ensaios experimentais devido a uma excitação manual na direção Z, foram obtidos resultados descritos no domínio do tempo (acelerações, velocidades e deslocamentos). O resultado de deslocamento no domínio do tempo pode ser visualizado na Figura 136. O resultado de aceleração no domínio do tempo e o resultado de velocidade no domínio do tempo estão apresentados nas Figuras 219 e 220, respectivamente, localizadas no Anexo 1. A resposta no domínio da frequência na direção Z é apresentada na Figura 137.

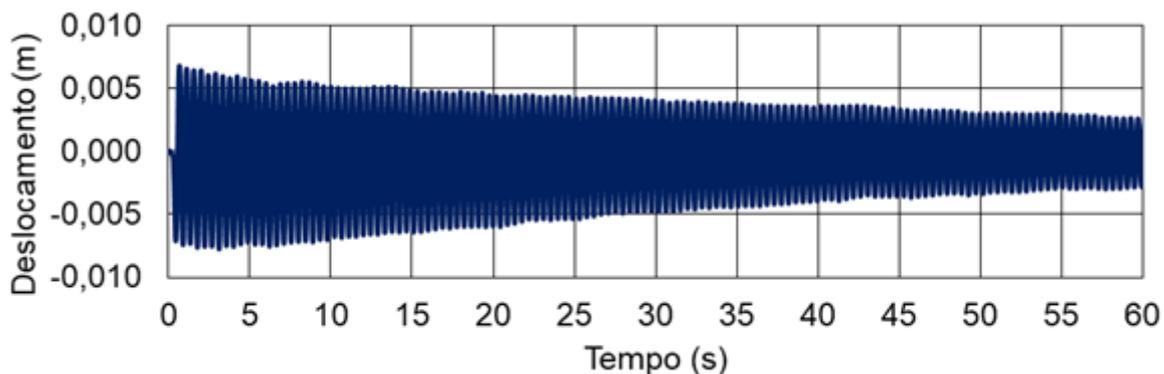


Figura 136 – Ensaio 4: deslocamento no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z]

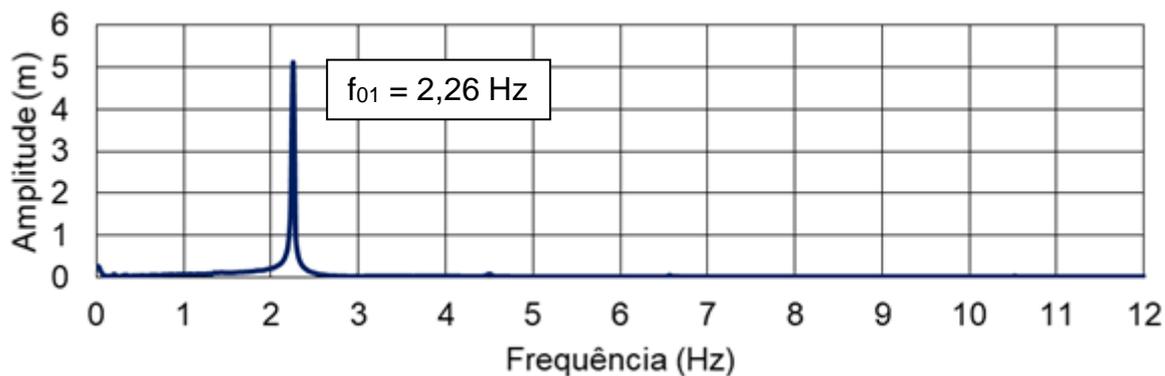


Figura 137 – Ensaio 4: espectro de frequência [h = 150 cm. Eixo Z]

#### 4.6.2 Ensaio 4: excitação manual: Captura de vídeo (Direção X)

A Figura 138 apresenta o posicionamento da câmera de vídeo bem como o ponto de excitação da estrutura escolhido para o ensaio na direção X.

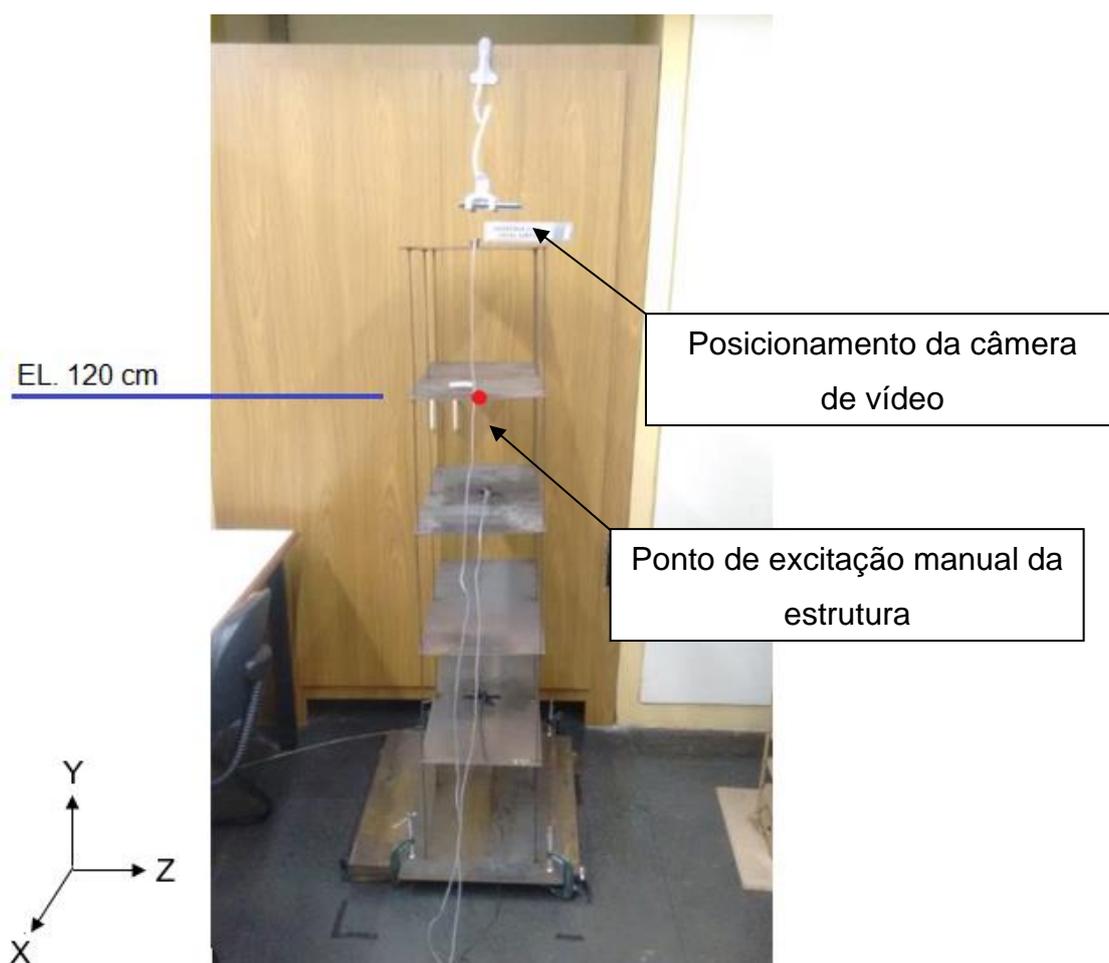


Figura 138. Posição da câmera e do ponto de excitação (eixo X)

A partir dos ensaios experimentais devido a uma excitação manual na direção X, foram obtidos resultados descritos no domínio do tempo (acelerações, velocidades e deslocamentos). O resultado do deslocamento no domínio do tempo pode ser visualizado na Figura 139. O resultado de aceleração no domínio do tempo e o resultado de velocidade no domínio do tempo estão apresentados nas Figuras 221 e 222, respectivamente, e estão localizados no Anexo 1. A resposta no domínio da frequência na direção X é apresentada na Figura 140.

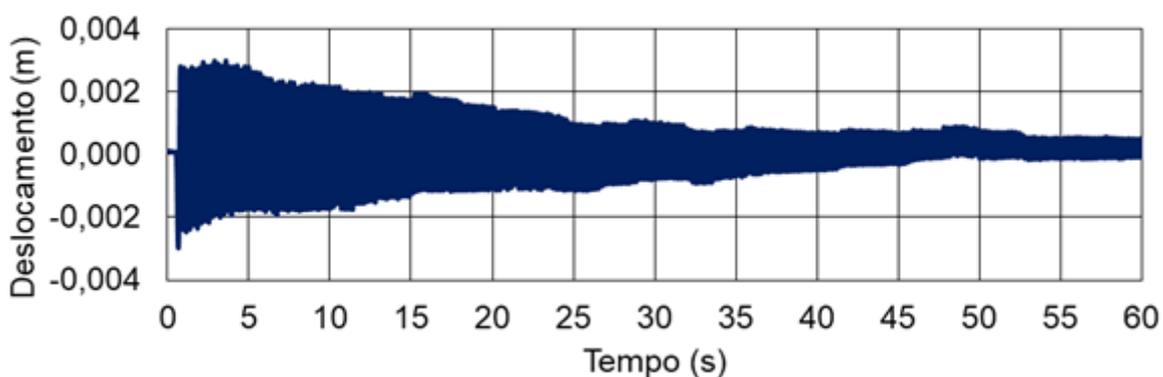


Figura 139 – Ensaio 4: deslocamento no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X]

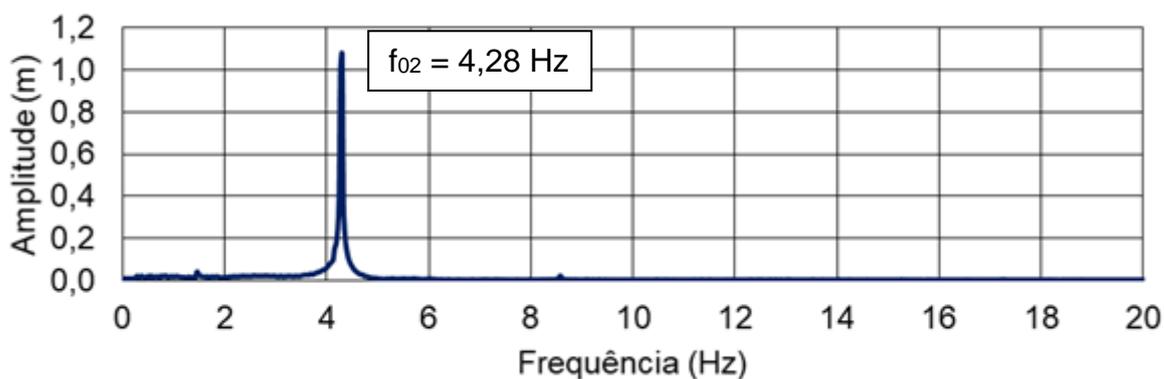


Figura 140 – Ensaio 4: espectro de frequência [h = 150 cm. Eixo X]

#### 4.6.3 Análise dos resultados do Ensaio 4

Analisando os resultados referentes ao ensaio na direção Z apresentados na Figura 137, nota-se que, diferentemente dos resultados anteriores (realizados nos itens 4.3, 4.4 e 4.5), é possível identificar apenas a primeira frequência natural correspondente ao primeiro modo de vibração da estrutura [ $f_{01} = 2,29$  Hz], não sendo identificadas nem a quarta ( $f_{04}$ ) e nem a quinta ( $f_{05}$ ) frequências naturais de forma clara

(apesar de serem perceptíveis pequenas protuberâncias no gráfico nas regiões correspondentes a estas duas frequências). O mesmo fenômeno ocorre nos resultados referentes ao ensaio na direção X apresentados na Figura 140, onde é possível identificar apenas a segunda frequência natural correspondente ao segundo modo de vibração da estrutura [ $f_{02} = 4,28$  Hz], não sendo possível identificar a sétima frequência natural ( $f_{07}$ ). Estes valores identificados, tanto referentes a direção Z quanto referentes a direção X, são bem próximos dos valores correspondentes de frequência obtidos, tanto no ensaio principal com os acelerômetros no item 4.3, quanto nos ensaios dos itens 4.4 e 4.5, fator corroborante com a validade dos resultados obtidos. No que se refere as frequências relacionadas a modo de flexão que não foram identificadas ( $f_{04}$ ,  $f_{05}$  e  $f_{07}$ ), há que se levar em consideração que este é um método simplista que tem um grau de precisão bastante inferior quando comparado com os ensaios com os acelerômetros e com o vibrômetro *PDV 100*.

Observa-se que, como ocorreu nos ensaios anteriores, neste também não foram identificadas  $f_{03}$  e  $f_{06}$  em nenhum dos ensaios. Este fato ocorre, pois  $f_{03}$  e  $f_{06}$  são frequências correspondentes a modos de vibração de torção.

#### 4.7 Ensaio 5: excitação com martelo de impacto ICP® IMPACT HAMMER: PDV 100

Diferentemente dos ensaios anteriores, neste ensaio, a excitação da estrutura será feita com martelo de impacto. O ponto de excitação da estrutura, e o ponto de leitura do vibrômetro PDV 100 são particularmente muito importantes neste ensaio, pois os mesmos devem ser reproduzidos também na análise numérica transiente que será elaborada posteriormente pelo software ANSYS (Ansys (2009)). Neste ensaio, foi definido que o ponto de excitação teria exatamente a mesma altura que o ponto de leitura do vibrômetro, entretanto, como não é possível utilizar o mesmo ponto para ambos, excitação e leitura (pois o martelo causaria interferências na leitura dos movimentos da estrutura), foi definido que ambos seriam feitos na mesma altura, porém, em lados opostos do edifício. Tanto o ponto de excitação da estrutura com o martelo de impacto quanto o ponto de leitura do vibrômetro *PDV 100* estão a uma altura de 150 cm.

É importante ressaltar que uma vez que a carga aplicada na estrutura pela excitação com o martelo de impacto foi mensurada pelo transdutor de força presente

na “cabeça” do martelo, é possível obter a FRF do ponto analisado neste ensaio, e com a obtenção destes dados, posteriormente, durante este trabalho, será possível realizar a análise numérica transiente através do software ANSYS (Ansys (2009)).

A resposta no domínio da frequência é definida pela FFT (*Fast Fourier Transform* – transformada rápida de Fourier) correspondente à resposta de saída associada ao *PDV 100* utilizado, FFT correspondente à resposta associada ao martelo de impacto, e também a FRF (Frequency Response Function – função de resposta em frequência), onde é combinada a resposta do *PDV 100* e do martelo de impacto.

Um outro dado de grande importância neste ensaio é o gráfico da coerência do ensaio. Este gráfico é importante pois mostra o quão representativo da realidade é a resposta, em uma escala de 0 a 1, onde 0 representa 0% de representatividade e 1 representa 100% de representatividade.

#### 4.7.1 Ensaio 5: excitação com martelo de impacto ICP® IMPACT HAMMER: PDV-100 (Direção Z)

O ponto de excitação da estrutura com o martelo de impacto bem como o posicionamento adotado para o contato da estrutura com o feixe de laser do vibrômetro referentes ao ensaio na direção Z podem ser observados na Figura 141.

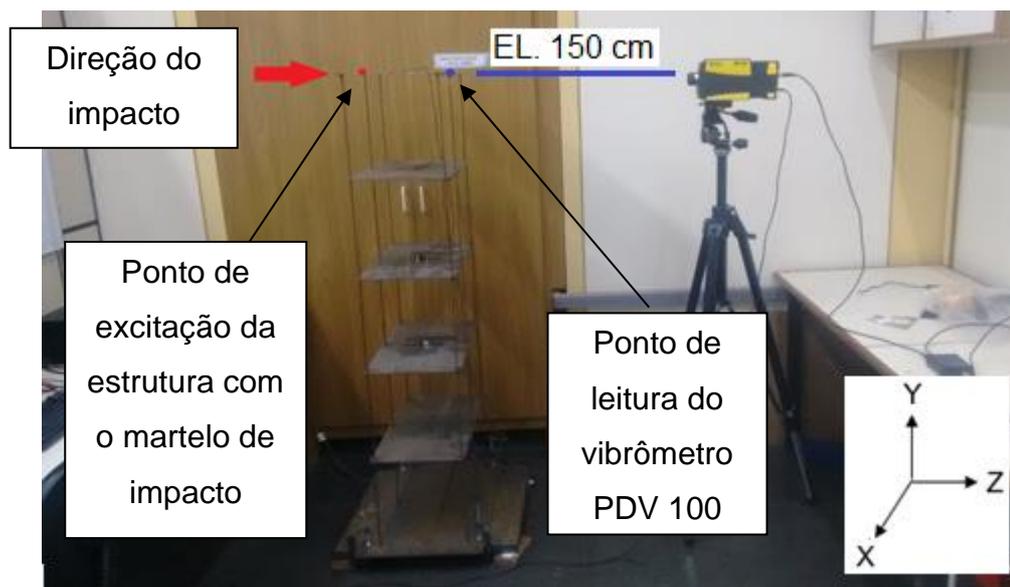


Figura 141 – Posição - ICP® IMPACT HAMMER e PDV 100 (eixo Z)

A partir dos ensaios experimentais devido a uma excitação com o martelo de impacto na direção Z, foram obtidos resultados descritos no domínio do tempo (acelerações, velocidades, deslocamentos e força). O resultado de velocidade no domínio do tempo pode ser visto na Figura 142 e o resultado da força de impacto do martelo no domínio do tempo pode ser visto na Figura 143. O resultado de aceleração no domínio do tempo, e o resultado de deslocamento no domínio do tempo estão apresentados nas Figuras 223 e 224, respectivamente, localizadas no Anexo 1. A resposta da FFT associada ao vibrômetro *PDV 100* na direção Z é apresentada na Figura 144, a resposta da FFT associada ao martelo de impacto é apresentada na Figura 145, e a resposta da FRF é apresentada na Figura 146. Na Figura 147 é apresentado o gráfico da coerência do ensaio.

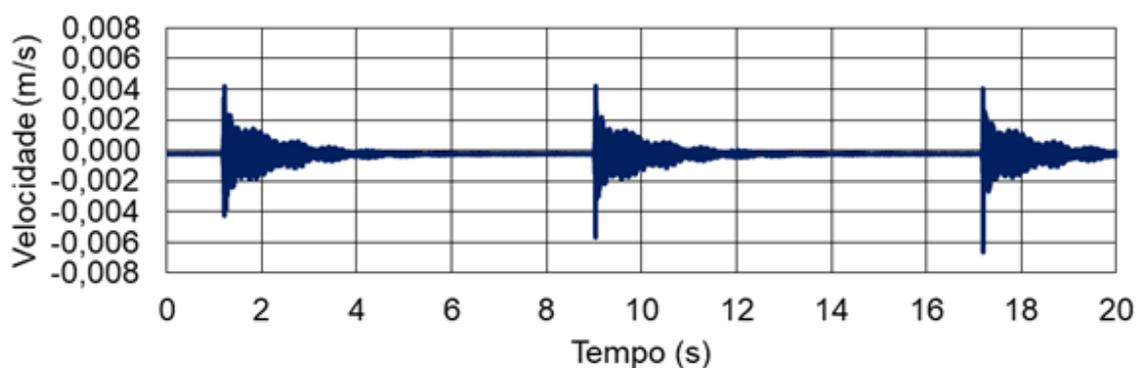


Figura 142 – Ensaio 5: velocidade no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z]

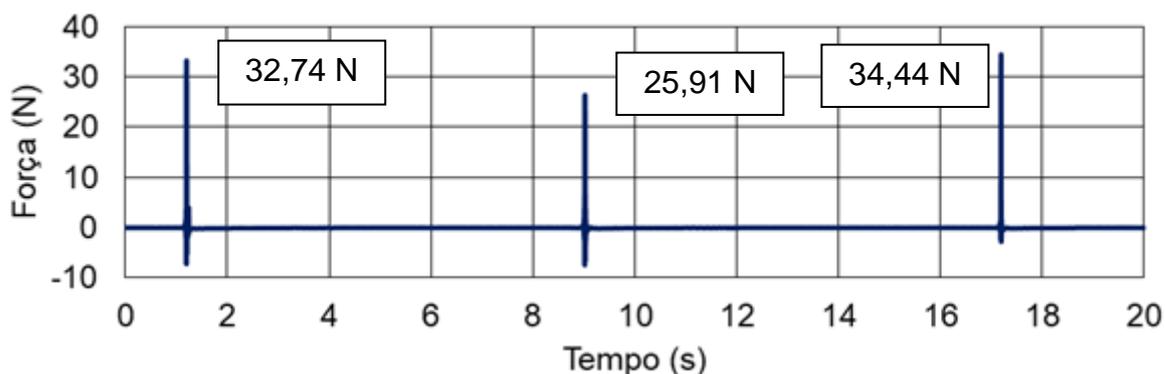


Figura 143 – Ensaio 5: força no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z]

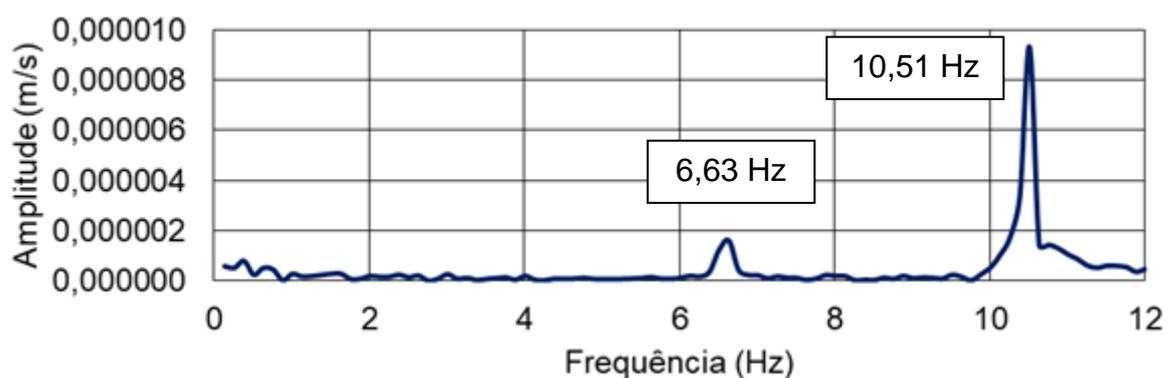


Figura 144 – Ensaio 5: espectro de resposta em FFT [h = 150 cm. Eixo Z]

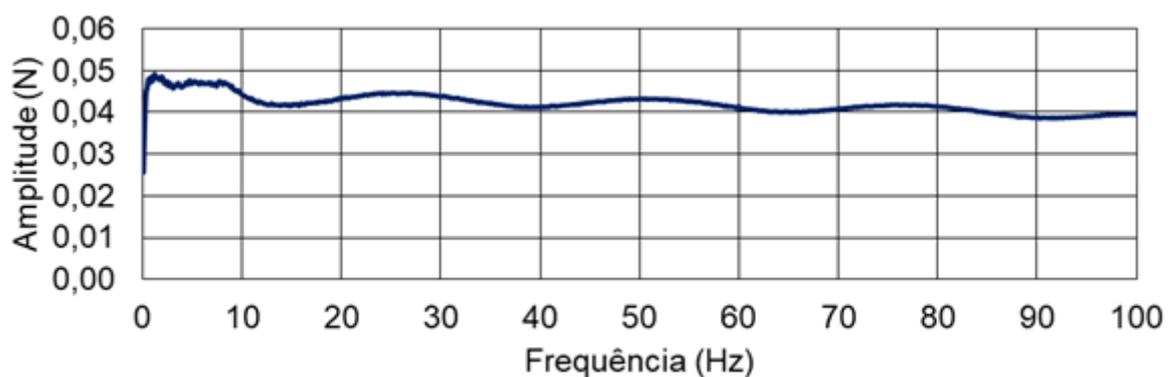


Figura 145 – Ensaio 5: espectro de resposta do martelo [h = 150 cm. Eixo Z]

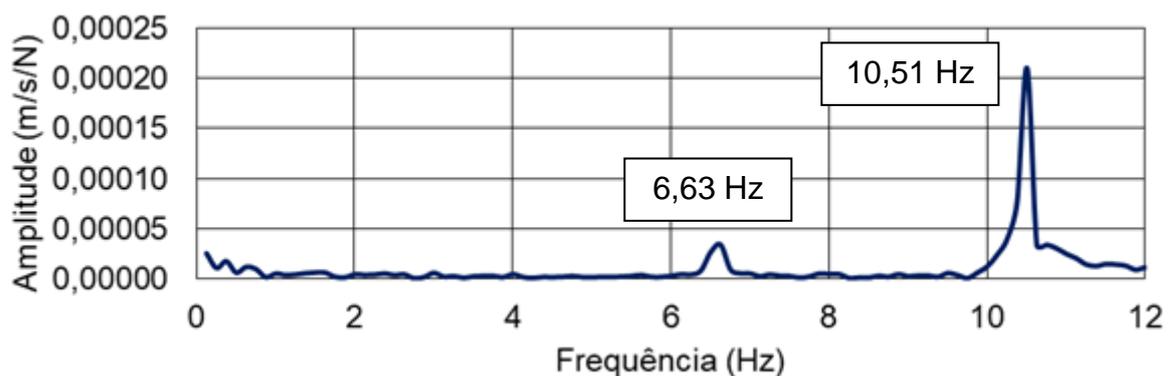


Figura 146 – Ensaio 5: espectro de resposta em FRF [h = 150 cm. Eixo Z]

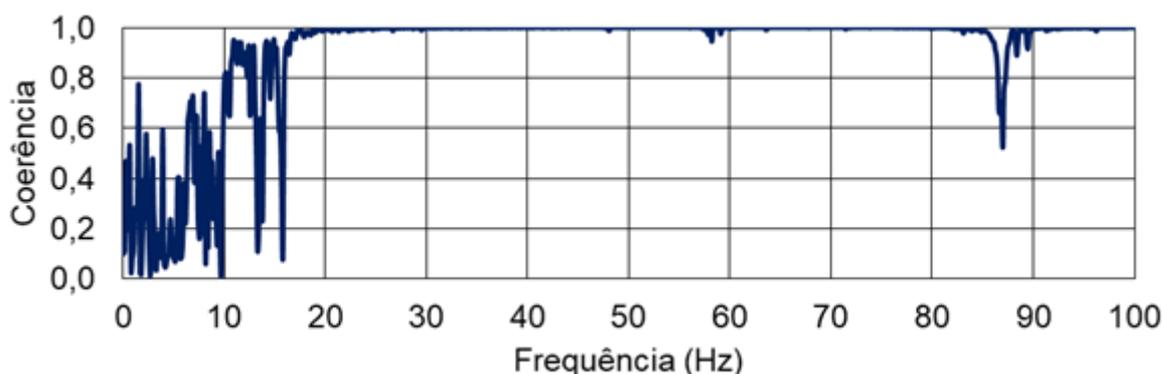


Figura 147 – Ensaio 5: coerência do ensaio [h = 150 cm. Eixo Z]

#### 4.7.2 Ensaio 5: excitação com martelo de impacto ICP® IMPACT HAMMER: PDV-100 (Direção X)

O ponto de excitação da estrutura com o martelo de impacto bem como o posicionamento adotado para o contato da estrutura com o feixe de laser do vibrômetro referentes ao ensaio na direção X podem ser observados na Figura 148.

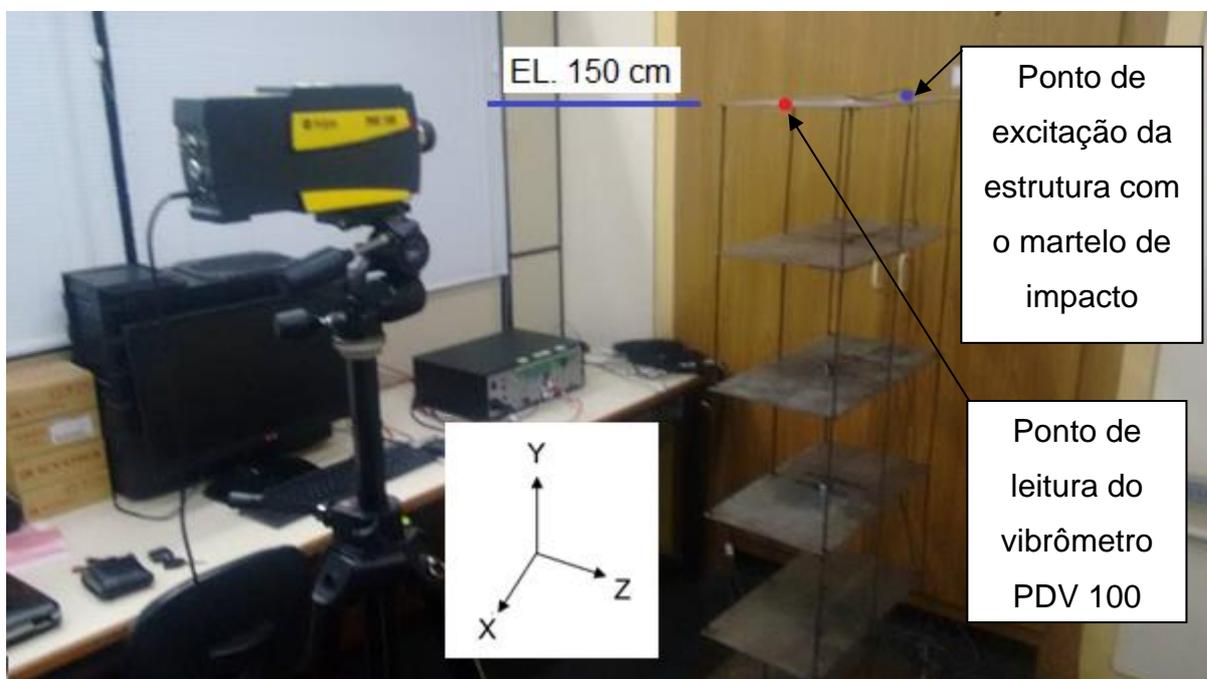


Figura 148 – Posição - ICP® IMPACT HAMMER e PDV 100 (eixo X)

A partir dos ensaios experimentais devido a uma excitação com o martelo de impacto na direção X, foram obtidos resultados descritos no domínio do tempo

(acelerações, velocidades, deslocamentos e força). O resultado de velocidade no domínio do tempo pode ser visto na Figura 149, e o resultado da força de impacto do martelo no domínio do tempo pode ser visto na Figura 150. O resultado de aceleração no domínio do tempo e o resultado de deslocamento no domínio do tempo podem ser vistos nas Figuras 225 e 226, respectivamente, localizadas no Anexo 1. A resposta da FFT associada ao vibrômetro PDV 100 na direção X é apresentada na Figura 151, a resposta da FFT associada ao martelo de impacto é apresentada na Figura 152, e a resposta da FRF é apresentada na Figura 153. Na Figura 154 será apresentado o gráfico da coerência do ensaio.

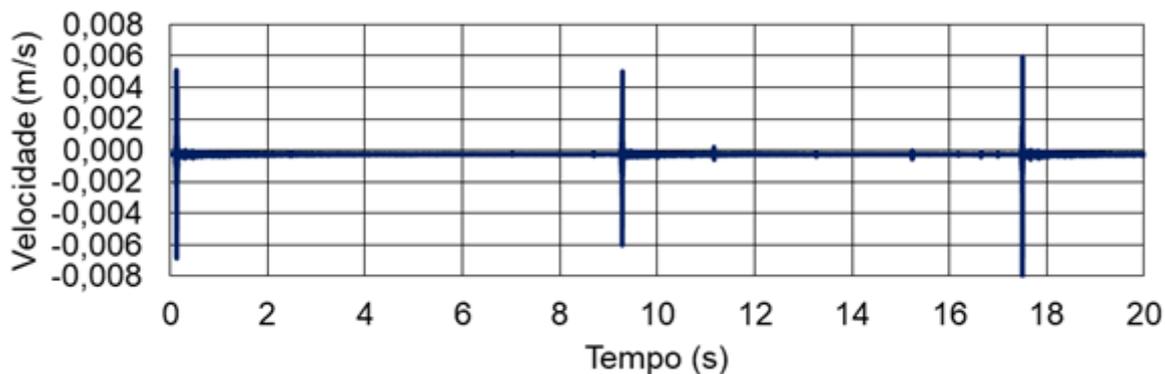


Figura 149 – Ensaio 5: velocidade no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X]

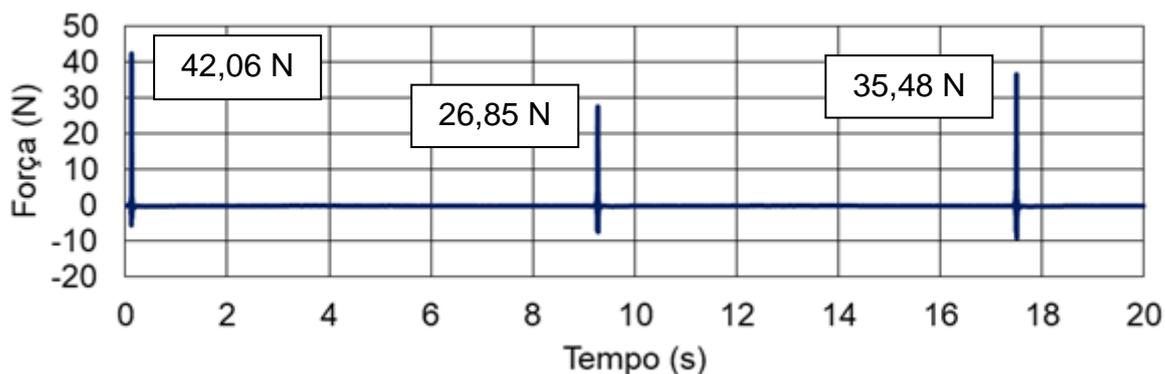


Figura 150 – Ensaio 5: força no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X]

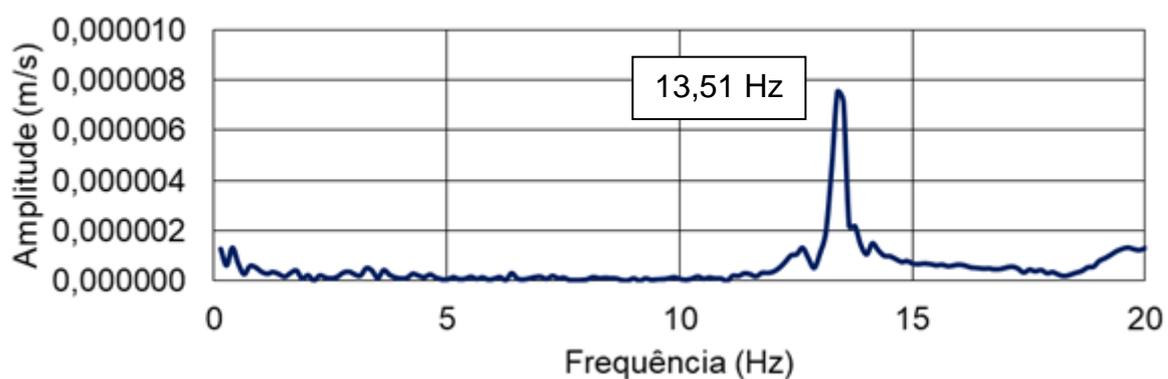


Figura 151 – Ensaio 5: espectro de resposta em FFT [h = 150 cm. Eixo X]

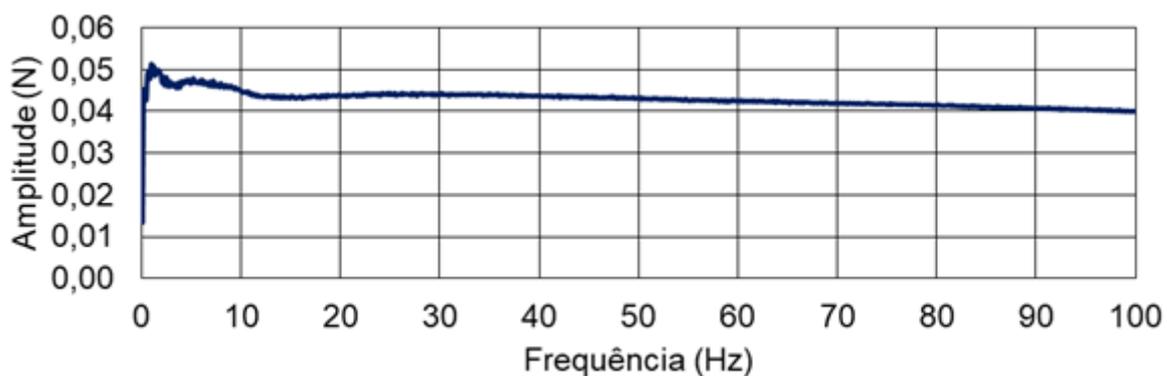


Figura 152 – Ensaio 5: espectro de resposta do martelo [h = 150 cm. Eixo X]

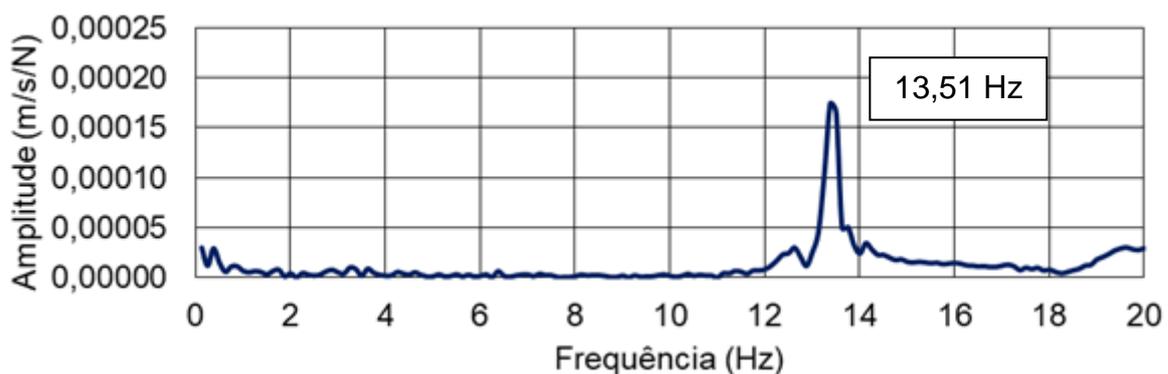


Figura 153 – Ensaio 5: espectro de resposta em FRF [h = 150 cm. Eixo X]

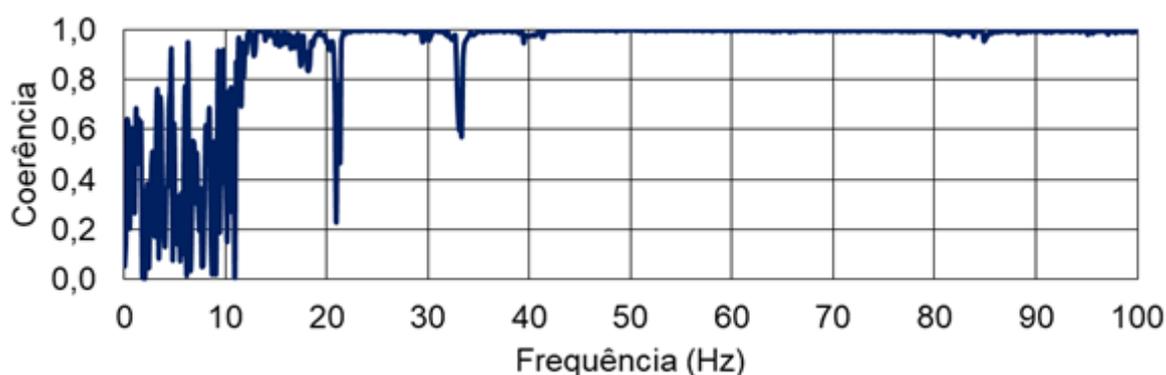


Figura 154 – Ensaio 5: coerência do ensaio [h = 150 cm. Eixo X]

#### 4.7.3 Análise dos resultados do ensaio 5

Analisando os resultados tanto na FFT (Figura 144) quanto na FRF (Figura 146) referentes a direção Z, foi possível visualizar a quarta e quinta frequências naturais [ $f_{04} = 6,63$  Hz,  $f_{05} = 10,51$  Hz], fator que sustenta os resultados correspondentes obtidos nos ensaios de vibração livre com excitação manual, entretanto não foi possível visualizar a primeira frequência natural ( $f_{01}$ ). Analisando o gráfico de coerência deste ensaio (Figura 147), nota-se que a região entre zero e 16 Hz não apresenta um bom percentual de representatividade. Este ensaio foi repetido diversas vezes, e em todos os ensaios foi constatada esta má qualidade na coerência para baixas frequências.

Ao analisar os resultados referentes a direção X, nota-se um comportamento muito semelhante ao ocorrido nos resultados referentes a direção Z. Tanto na FFT (Figura 151) quanto na FRF (Figura 153) foi possível visualizar apenas a sétima frequência natural [ $f_{07} = 13,51$  Hz], fator que sustenta os resultados correspondentes obtidos nos ensaios de vibração livre com excitação manual, entretanto não foi possível visualizar a segunda frequência natural ( $f_{02}$ ). Analisando a Figura 154, nota-se que, assim como a coerência apresentada na direção Z, a deste ensaio também sofreu problemas, apresentando uma região entre zero e 11 Hz com baixo percentual de representatividade. Este ensaio também foi repetido inúmeras vezes, e em todos os ensaios foi constatada esta má qualidade na coerência para baixas frequências.

Devido esta tendência permanecer em ambos os ensaios com a utilização de um martelo de impacto (como também será constatado no ensaio 6 no item 4.8, utilizando-se um excitador diferente), chega-se à conclusão de que existem problemas na confecção da estrutura que dificultam a obtenção destes parâmetros para baixas

frequências, tais como problemas de fabricação, tanto no que diz respeito a imperfeição geométrica da estrutura, quanto na elaboração das ligações entre os pilares e as lajes (pois durante os ensaios, algumas soldas se soltaram devido aos impactos do martelo). Outra explicação é a geometria da estrutura que, para este tipo de ensaio, favoreceu muito mais os efeitos de torção do que os de flexão, fenômeno que pode ter interferido sensivelmente nos resultados. Vale acrescentar também que, outro fator que sustenta a invalidade destas respostas é a amplitude das frequências obtidas, que não são consideradas corretas, quando comparadas com a amplitude das frequências obtidas na análise transiente, como poderá ser conferido mais à frente no item 5.5.3.

#### 4.8 Ensaio 6: excitação com martelo de impacto Dytran Instruments: PDV 100

Assim como no ensaio 5, neste ensaio, a excitação da estrutura será feita com martelo de impacto, porém, de outra marca, maior e com mais capacidade de transmissão de carga. O objetivo deste ensaio é verificar se é possível obter um melhor resultado do que o obtido no ensaio 5 (pois suspeitava-se que o martelo do ensaio 5 talvez não fosse do tamanho adequado para a realização deste ensaio), que apresentou um resultado insatisfatório. Neste ensaio 6, todos os parâmetros adotados na realização do ensaio são exatamente iguais aos adotados no ensaio 5 (com a exceção do martelo), portanto, todos os dados referentes a este ensaio podem ser visualizados no item 4.7).

##### 4.8.1 Ensaio 6: excitação com martelo de impacto Dytran Instruments: PDV 100 (Direção Z)

A partir dos ensaios experimentais devido a uma excitação com o martelo de impacto na direção Z, foram obtidos resultados descritos no domínio do tempo (acelerações, velocidades, deslocamentos e força). O resultado de velocidade no domínio do tempo pode ser visto na Figura 155 e o resultado da força de impacto do martelo no domínio do tempo pode ser visto na Figura 156. O resultado da aceleração no domínio do tempo e o resultado do deslocamento no domínio do tempo estão apresentados nas Figuras 227 e 228, respectivamente, localizadas no Anexo 1. A resposta da FFT associada ao vibrômetro PDV 100 na direção Z é apresentada na

Figura 157, a resposta da FFT associada ao martelo de impacto é apresentada na Figura 158, e a resposta da FRF é apresentada na Figura 159. Na Figura 160 é apresentado o gráfico da coerência do ensaio.

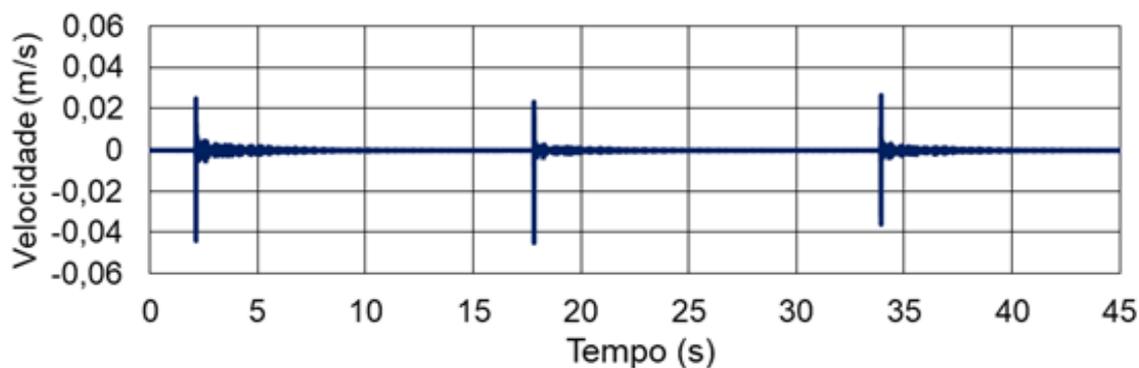


Figura 155 – Ensaio 6: velocidade no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z]

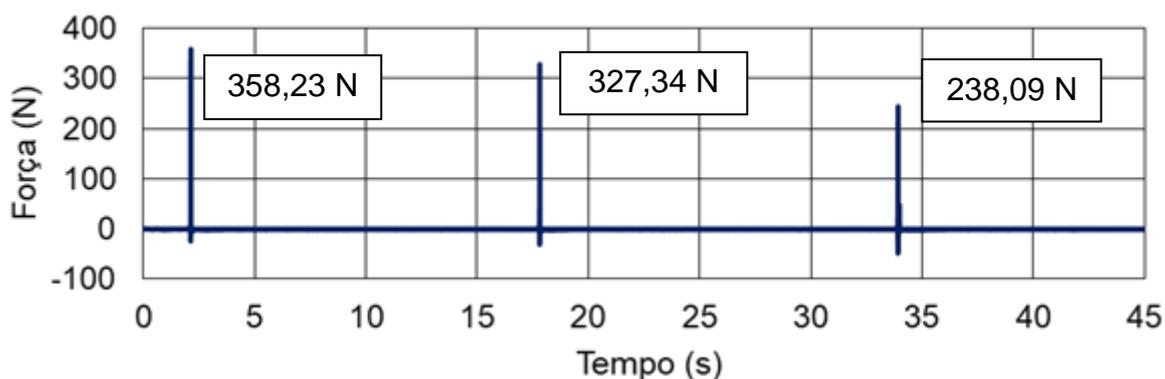


Figura 156 – Ensaio 6: força no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z]

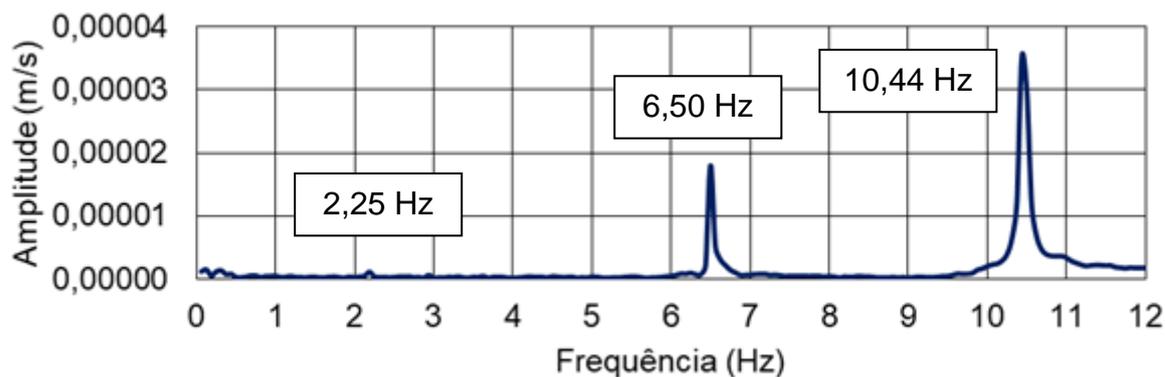


Figura 157 – Ensaio 6: espectro de resposta em FFT [h = 150 cm. Eixo Z]

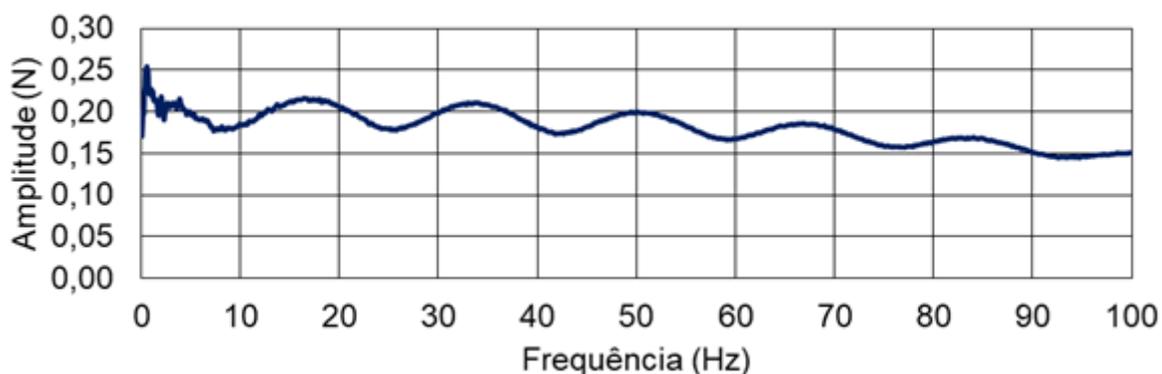


Figura 158 – Ensaio 6: espectro de resposta do martelo [h = 150 cm. Eixo Z]

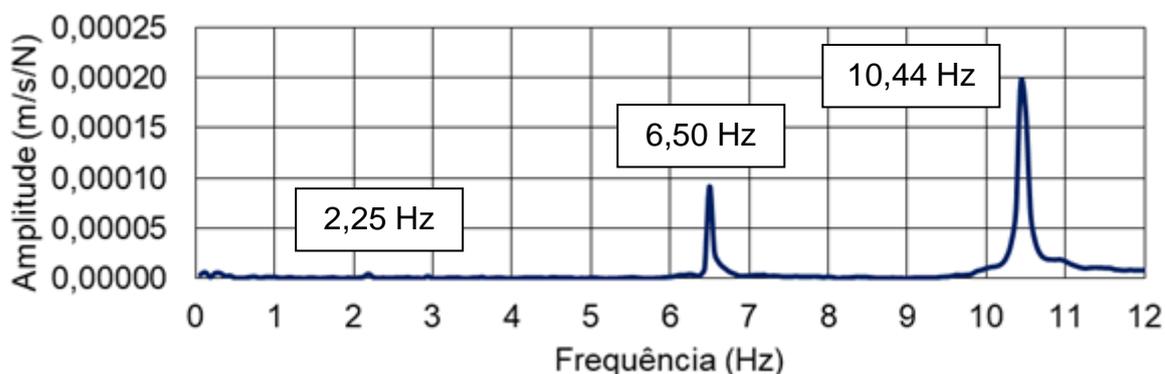


Figura 159 – Ensaio 6: espectro de resposta em FRF [h = 150 cm. Eixo Z]

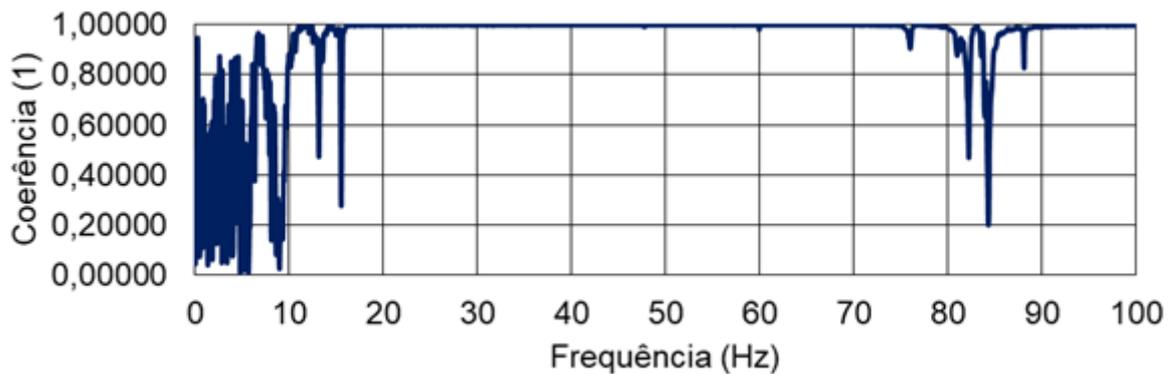


Figura 160 – Ensaio 6: coerência do ensaio [h = 150 cm. Eixo Z]

#### 4.8.2 Ensaio 6: excitação com martelo de impacto Dytran Instruments: PDV-100 (Direção X)

A partir dos ensaios experimentais devido a uma excitação com o martelo de impacto na direção X, foram obtidos resultados descritos no domínio do tempo

(acelerações, velocidades, deslocamentos e força). O resultado de velocidade no domínio do tempo pode ser visto na Figura 161 e o resultado da força de impacto do martelo no domínio do tempo pode ser visto na Figura 162. O resultado da aceleração no domínio do tempo e o resultado do deslocamento no domínio do tempo podem ser vistos nas Figuras 229 e 230, respectivamente, localizadas no Anexo 1. A resposta da FFT associada ao vibrômetro PDV 100 na direção X é apresentada na Figura 163, a resposta da FFT associada ao martelo de impacto é apresentada na Figura 164, e a resposta da FRF é apresentada na Figura 165. Na Figura 166 será apresentado o gráfico da coerência do ensaio.

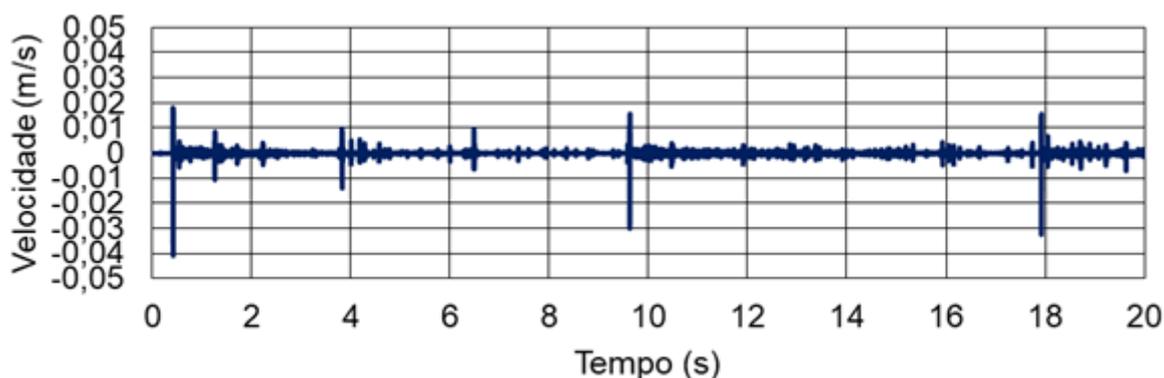


Figura 161 – Ensaio 6: velocidade no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X]

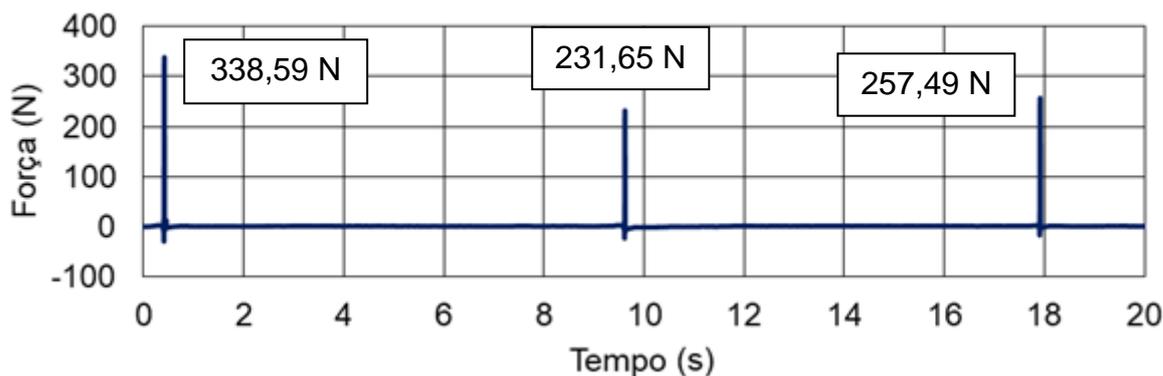


Figura 162 – Ensaio 6: força no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X]

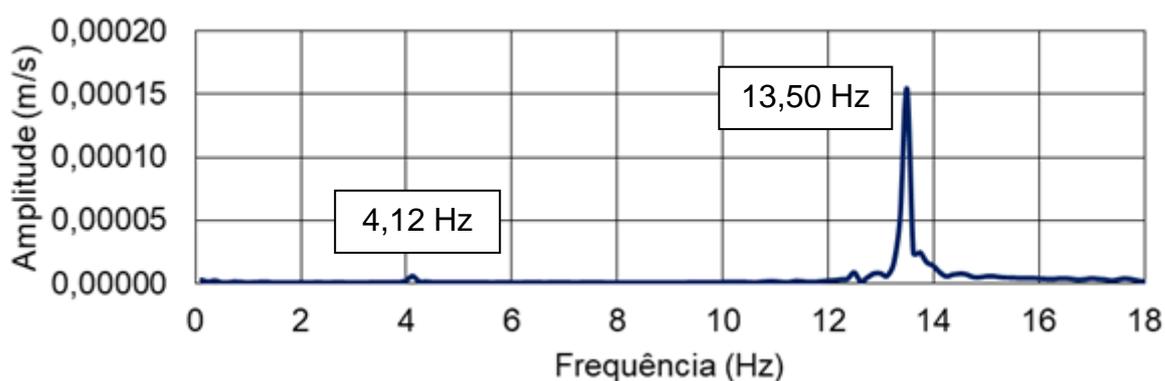


Figura 163 – Ensaio 6: espectro de resposta em FFT [h = 150 cm. Eixo X]

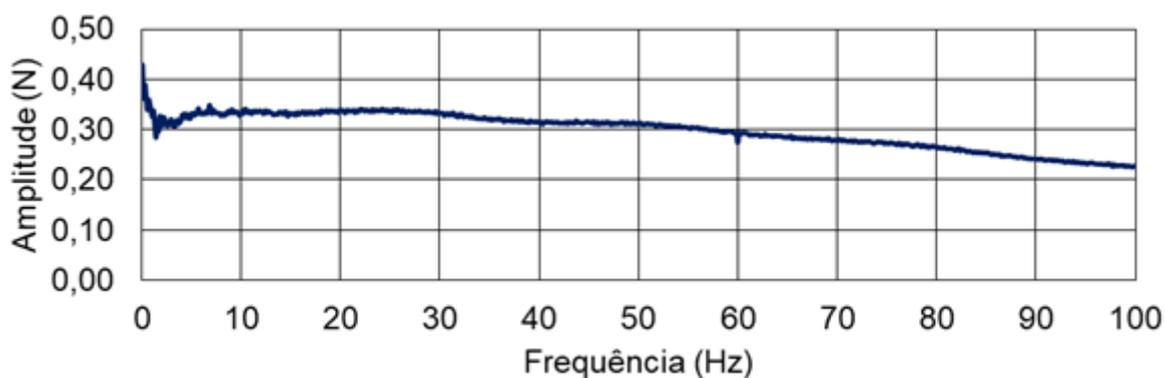


Figura 164 – Ensaio 6: espectro de resposta do martelo [h = 150 cm. Eixo X]

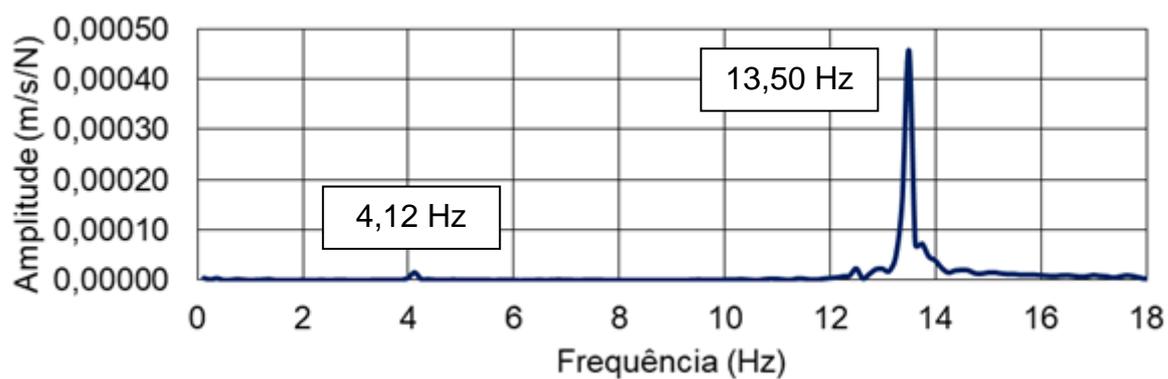


Figura 165 – Ensaio 6: espectro de resposta em FRF [h = 150 cm. Eixo X]

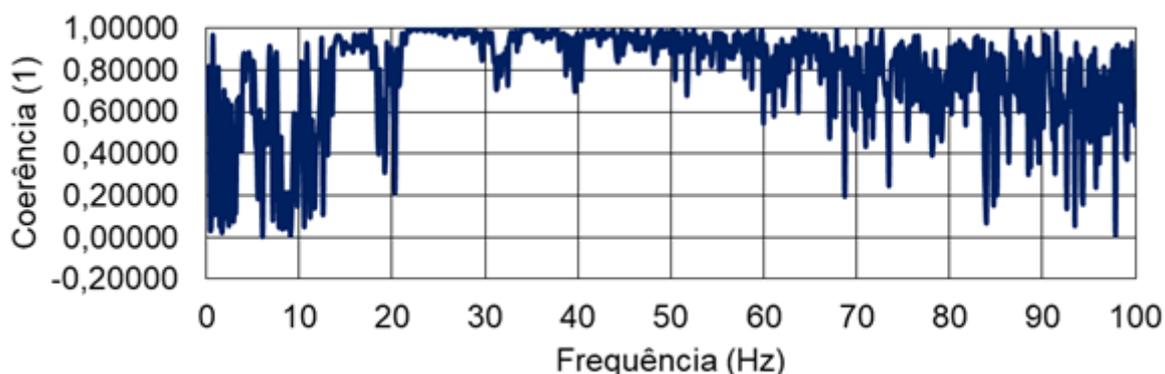


Figura 166 – Ensaio 6: coerência do ensaio [h = 150 cm. Eixo X]

#### 4.8.3 Análise dos resultados do ensaio 6

Analisando os resultados tanto na FFT (Figura 157) quanto na FRF (Figura 159) referentes a direção Z, foi possível visualizar com bastante clareza a quarta e quinta frequências naturais [ $f_{04} = 6,50$  Hz,  $f_{05} = 10,44$  Hz], e também foi possível observar uma leve protuberância referente a primeira frequência natural [ $f_{01} = 2,25$  Hz], fator que sustenta os resultados obtidos nos ensaios de vibração livre com excitação manual. Analisando o gráfico de coerência deste ensaio (Figura 160), nota-se que a região entre zero e 16 Hz não apresenta um bom percentual de representatividade.

Ao analisar os resultados referentes a direção X, nota-se um comportamento muito semelhante ao ocorrido nos resultados referentes a direção Z. Tanto na FFT (Figura 163) quanto na FRF (Figura 165) foi possível visualizar com bastante clareza apenas a sétima frequência natural [ $f_{07} = 13,50$  Hz], e também foi possível observar uma leve protuberância referente a segunda frequência natural [ $f_{02} = 4,12$  Hz], fator que sustenta os resultados correspondentes obtidos nos ensaios de vibração livre com excitação manual. Analisando a Figura 166, nota-se que, assim como a coerência apresentada na direção Z, a deste ensaio também sofreu problemas, apresentando uma região entre zero e 11 Hz com baixo percentual de representatividade.

Vale ressaltar que ambos os ensaios, tanto na direção Z, como na direção X, foram repetidos diversas vezes, e em todos os ensaios foi constatada esta má qualidade na coerência para baixas frequências. Este fenômeno também ocorreu no ensaio 5, e reforça a tese descrita na seção 4.7.3 de que a estrutura não é adequada para este tipo de ensaio.

Vale acrescentar também que, outro fator que sustenta a invalidade destas

respostas é a amplitude das frequências obtidas, que não são consideradas corretas, quando comparadas com a amplitude das frequências obtidas na análise transiente, como poderá ser conferido mais à frente no item 5.5.3.

#### 4.9 Resumo dos resultados das análises

A partir dos ensaios experimentais realizados nos ensaios 1 a 6, foram obtidos resultados relacionados as cinco primeiras frequências naturais da estrutura referentes a modos de flexão ( $f_{01}$ ,  $f_{02}$ ,  $f_{04}$ ,  $f_{05}$  e  $f_{07}$ ). Desta forma, a Tabela 19 apresenta um breve resumo dos resultados e a diferença máxima obtida entre os valores de cada frequência natural.

Tabela 19 – Resumo dos resultados dos ensaios

Freq.	Direção	Frequências naturais dos Ensaios (Hz)						Dif. Máx. %
		Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 6	
$f_{01}$	Z	2,22	2,29	2,15	2,26	-	2,25	6,11
$f_{02}$	X	4,15	4,34	4,10	4,28	-	4,12	5,12
$f_{04}$	Z	6,56	6,56	6,45	-	6,56	6,50	1,68
$f_{05}$	Z	10,50	10,51	10,46	-	10,49	10,44	0,67
$f_{07}$	X	13,72	13,69	13,69	-	13,51	13,50	1,53

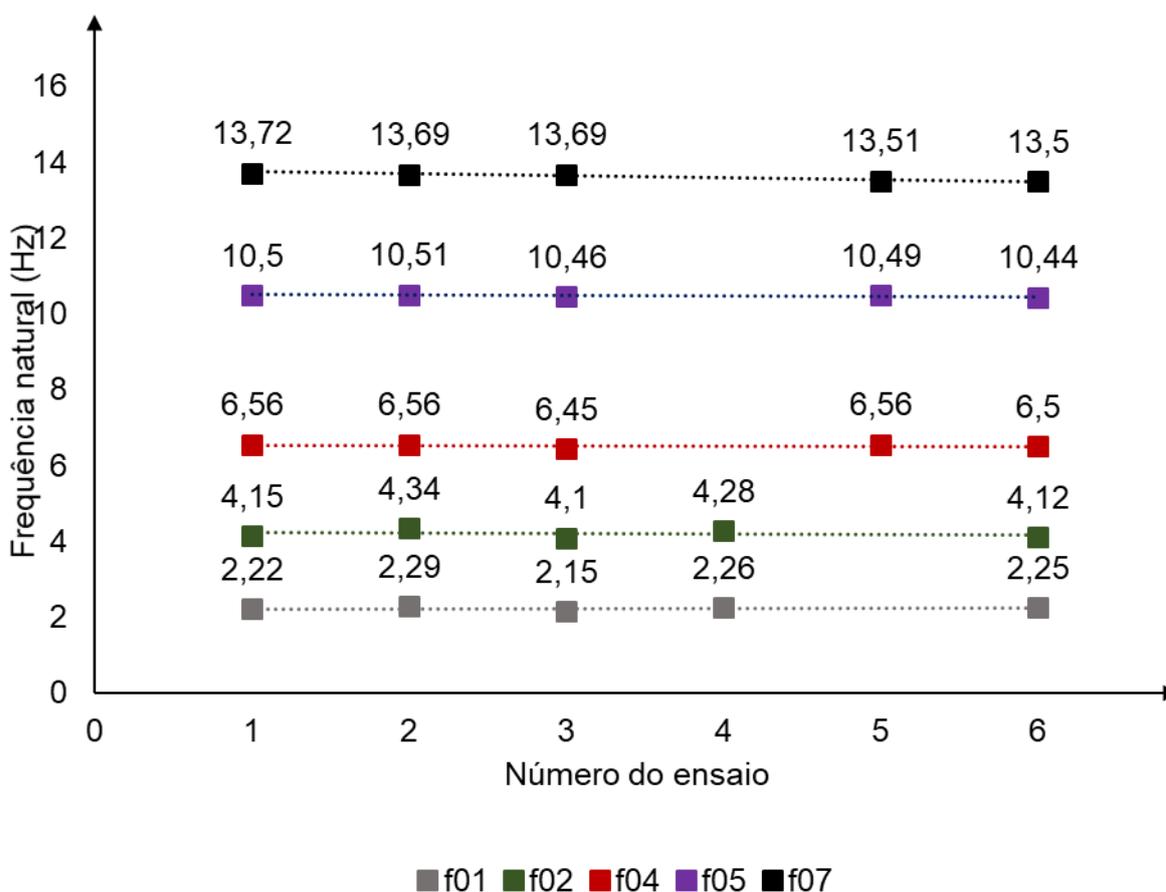


Figura 167 – Padrão de resultados dos ensaios

Analisando a Tabela 19 e a Figura 167, nota-se que, de fato, os valores das frequências naturais obtidos em cada ensaio se aproximam bastante um do outro, com variações quase imperceptíveis em relação as linhas de tendência, apresentando diferença máxima entre valores da ordem de 6,11%, mesmo quando na utilização de métodos mais simplistas de medição, como os métodos dos ensaios 3 e 4. Vale ressaltar que a variação entre os valores de frequências obtidos podem derivar de diversos fatores, tais como: a utilização de diversos métodos de medição distintos, com diferentes níveis de precisão, as condições de utilização do edifício construído para o ensaio (que durante os testes sofreu algumas avarias devido as cargas aplicadas a estrutura), as condições dos equipamentos utilizados para a realização dos testes que, devido ao tempo de uso sem a necessária calibração periódica por parte dos fabricantes, podem apresentar imprecisões em seus resultados, fatores relacionados as condições do ambiente durante a realização dos ensaios, como vibrações indesejáveis, que podem interferir diretamente nos resultados, e falhas e

imprecisões humanas no ato da realização dos ensaios, especialmente no ato de excitar a estrutura.

Ainda que os ensaios com a utilização do martelo de impacto (Ensaio 5 e 6) não tenham apresentado boas coerências em seus resultados, nota-se que os valores das frequências naturais que foram encontradas nestes ensaios se mostram corretos, apesar de não possuírem amplitudes de frequência consideradas coerentes. Vale ressaltar que, ao comparar estes dois ensaios (Ensaio 5 e 6), onde a única variável diferente foi o modelo utilizado (e, conseqüentemente, suas características), nota-se que, utilizando o martelo Dytran Instruments (martelo com maior capacidade de transmissão de força para a estrutura) no ensaio 6, foi possível obter, ainda que bem levemente, as duas primeiras frequências naturais da estrutura, mostrando, assim, que o martelo utilizado no ensaio 5 não teve energia suficiente para mobilizar a massa modal dos primeiros modos de vibração da estrutura. Entretanto, observou-se em ambos os ensaios, valores de amplitude de frequência incoerentes. Este fato corrobora a tese de que, possivelmente, a própria estrutura, com suas características e imperfeições físicas e geométricas, não favoreceu a realização deste tipo de ensaio, e foi a maior responsável pelos maus resultados, pois durante os mesmos, observou-se uma influência significativa dos efeitos de torção na estrutura.

No que diz respeito aos modos de vibração encontrados através do Ensaio 1, nota-se que, ao tomar como parâmetro os modos de vibração obtidos através da análise numérica (ver item 5.3), todos os cinco modos de vibração obtidos através da monitoração experimental esboçaram formatos coerentes e muito próximos do esperado, que como poderá ser conferido no item 5.5.2, possuem leves diferenças, possivelmente provenientes da quantidade reduzida de acelerômetros utilizados nos ensaios (fazendo com que os deslocamentos da maior parcela da estrutura ao longo da altura fossem obtidas por aproximação gráfica), das diferenças de precisão dos acelerômetros de diferentes marcas (que possuem características distintas), bem como da falta da adequada calibração dos acelerômetros devido ao elevado tempo de uso sem a necessária revisão periódica por parte dos fabricantes.

Em relação aos coeficientes de amortecimento obtidos através do ensaio 1, nota-se que, como esperado, com a exceção do coeficiente de amortecimento relacionado ao sétimo modo de vibração, os demais coeficientes de amortecimento seguem um padrão crescente do primeiro modo de vibração em diante. Vale ressaltar que o sétimo modo de vibração não apresentou um sinal limpo no domínio do tempo

(ver Figuras 111 a 114), apresentando oscilações indesejadas no sinal. Este fenômeno certamente prejudicou a obtenção do coeficiente de amortecimento de forma precisa.

Vale ressaltar que cada ensaio experimental foi feito separadamente e, para cada teste, em cada direção, foram realizadas um mínimo de 10 repetições. No que diz respeito aos ensaios com resultados menos precisos ou insatisfatórios [como o ensaio 4 que apresentou apenas 1 pico de frequência (ver item 4.6), e os ensaios 5 e 6 que apresentaram problemas nos gráficos de coerência (ver itens 4.7 e 4.8)], foram realizadas um mínimo de 20 repetições.

#### 4.10 Considerações do capítulo

No presente capítulo foram apresentados os 6 ensaios experimentais que compõem este trabalho, sendo eles: Ensaio 1: excitação manual com leitura utilizando acelerômetros (ADS 2002); Ensaio 2: excitação manual com leitura utilizando vibrometria a laser (PDV 100); Ensaio 3: excitação manual com leitura utilizando acelerômetro presente no iPhone (aplicativo Vibration); Ensaio 4: excitação manual com leitura utilizando filmagem de vídeo (software Tracker); Ensaio 5: Excitação utilizando martelo de impacto (ICP IMPACT HAMMER) com leitura utilizando vibrometria a laser (PDV 100); Ensaio 6: Excitação utilizando martelo de impacto (Dytran Instruments) com leitura utilizando vibrometria a laser (PDV 100). Em cada experimento foram descritos os passos adotados, foram apresentados os parâmetros de interesse e, ao fim de cada ensaio, foram feitas observações referentes aos resultados encontrados, com o objetivo de verificar a compatibilidade de resultados entre os diferentes ensaios.

## 5. CALIBRAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS E MODOS DE VIBRAÇÃO

### 5.1 Considerações iniciais

Neste capítulo é feita a calibração numérica dos autovalores (frequências naturais) e dos autovetores (modos de vibração), referentes ao modelo estrutural investigado no presente trabalho, com os resultados experimentais obtidos no capítulo anterior. O problema de autovalor, associado a uma análise de vibração livre, é resolvido a partir do programa computacional ANSYS (Ansys (2009)). O objetivo consiste em identificar as frequências naturais do modelo computacional e seus respectivos modos de vibração com as propriedades reais da estrutura. Após a análise de autovalores e autovetores do modelo numérico em elementos finitos (MEF), será descrito qual a diferença do modelo calibrado com os resultados experimentais obtidos. Será feita também uma análise transiente do modelo numérico, valendo-se dos dados de força no domínio do tempo, registrados no ensaio experimental com o martelo de impacto no item 4.7 e, posteriormente, serão comparados seus dados no domínio do tempo (aceleração, velocidade e deslocamento) e dados no domínio da frequência com as respostas apresentadas no referido ensaio.

### 5.2 Análise das frequências naturais do modelo em elementos finitos (Autovalores)

Através das análises de vibração livre do modelo calibrado, utilizando o programa computacional ANSYS (Ansys (2009)), foram obtidos os valores das frequências naturais (autovalores) e os respectivos modos de vibração (autovetores). A Tabela 20 apresenta os valores das dez primeiras frequências naturais da estrutura.

É necessário ressaltar que esta dissertação está estudando apenas frequências naturais relacionadas a modos de vibração de flexão. E em cada direção (X e Z) foram estudadas um limite máximo de até a terceira frequência natural da estrutura. Sendo assim, as frequências  $f_{01}$ ,  $f_{02}$ ,  $f_{04}$ ,  $f_{05}$ , e  $f_{07}$  são frequências naturais relacionadas a modos de vibração de flexão que se encontram dentro deste limite estipulado, e servirão de base comparativa para os resultados das análises experimentais. As frequências  $f_{08}$  e  $f_{09}$ , apesar de também representarem frequências naturais de flexão, não serão estudadas neste trabalho, pois representam a quarta e a quinta frequências naturais na direção Z, e estão fora do limite estipulado para o

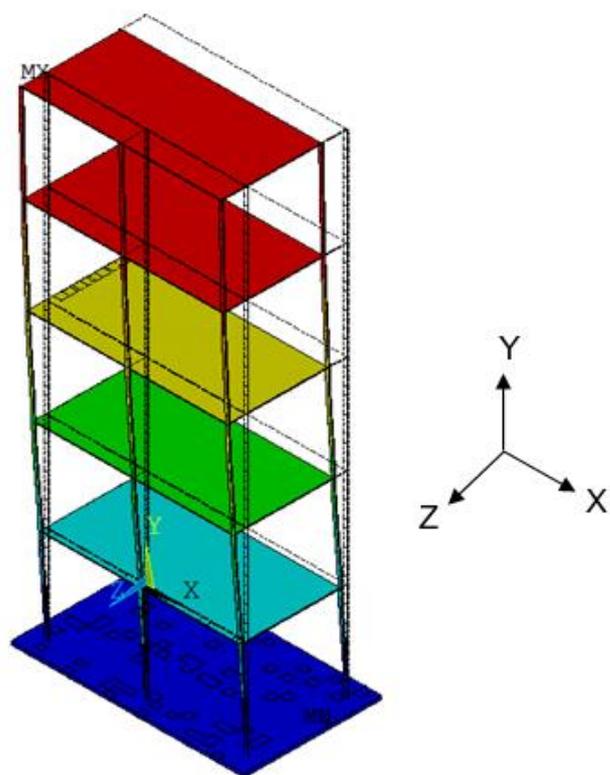
estudo. As frequências  $f_{03}$ ,  $f_{06}$  e  $f_{10}$  são frequências naturais relacionadas a modos de torção, e não são objetos de estudo desta dissertação.

Tabela 20 – Frequências naturais do modelo em elementos finitos.

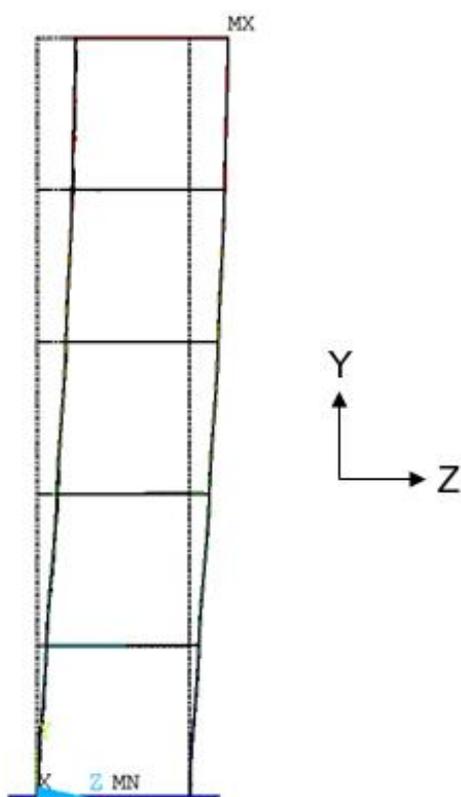
Frequências Naturais (Hz)		Modos de Vibração	
$f_{01}$	2,34	Modo 1	1º Modo de flexão na direção Z
$f_{02}$	3,93	Modo 2	1º Modo de flexão na direção X
$f_{03}$	4,00	Modo 3	1º Modo de torção
$f_{04}$	7,06	Modo 4	2º Modo de flexão na direção Z
$f_{05}$	11,75	Modo 5	3º Modo de flexão na direção Z
$f_{06}$	12,65	Modo 6	2º Modo de torção
$f_{07}$	12,98	Modo 7	2º Modo de flexão na direção X
$f_{08}$	16,05	Modo 8	4º Modo de flexão na direção Z
$f_{09}$	19,21	Modo 9	5º Modo de flexão na direção Z
$f_{10}$	23,22	Modo 10	3º Modo de torção

### 5.3 Análise dos modos de vibração do modelo numérico (Autovetores)

Nas Figuras 168 a 177 são apresentados os dez primeiros modos de vibração referentes ao Modelo calibrado, correspondentes às dez primeiras frequências naturais da estrutura descritas pela Tabela 20.

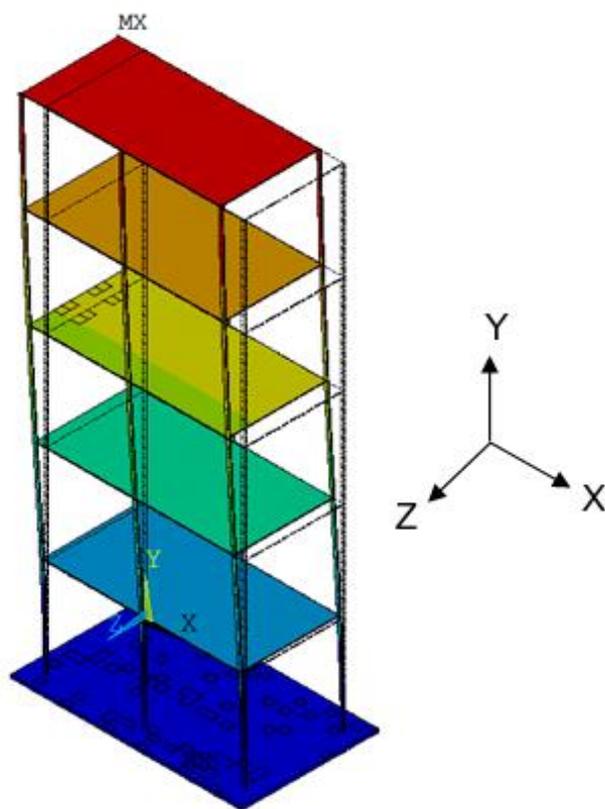


a) Vista 3D

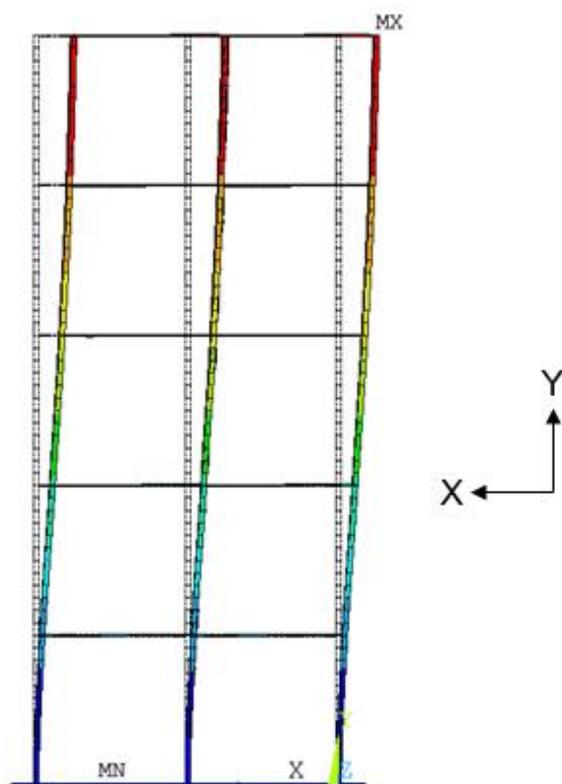


b) Vista lateral

Figura 168 – Modo de vibração da primeira frequência natural  $f_{01} = 2,34$  Hz

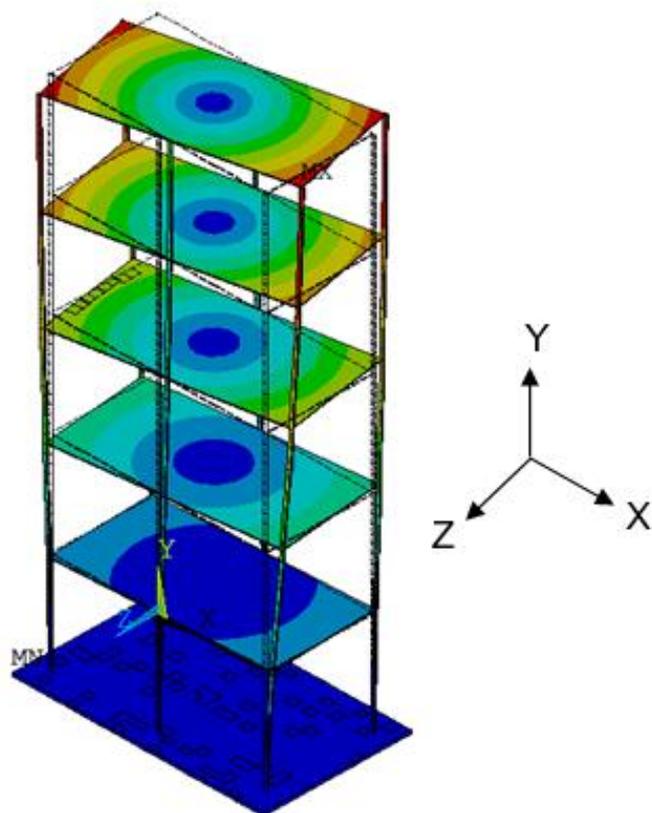


a) Vista 3D

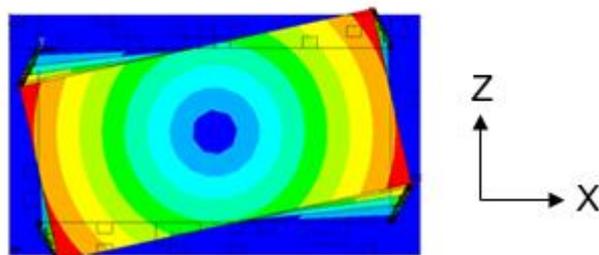


b) Vista frontal

Figura 169 – Modo de vibração da segunda frequência natural  $f_{02} = 3,93$  Hz



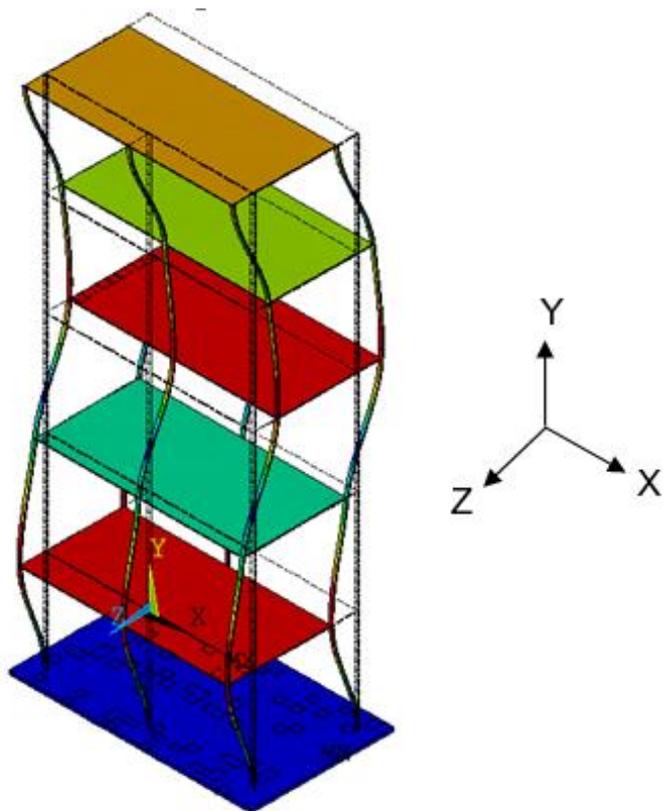
a) Vista 3D



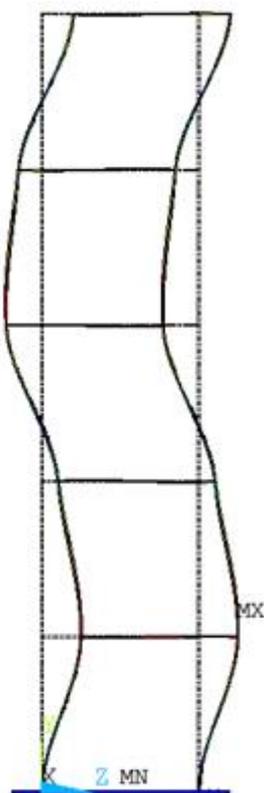
b) Vista superior

Figura 170 – Modo de vibração da terceira frequência natural  $f_{03} = 4,00$  Hz



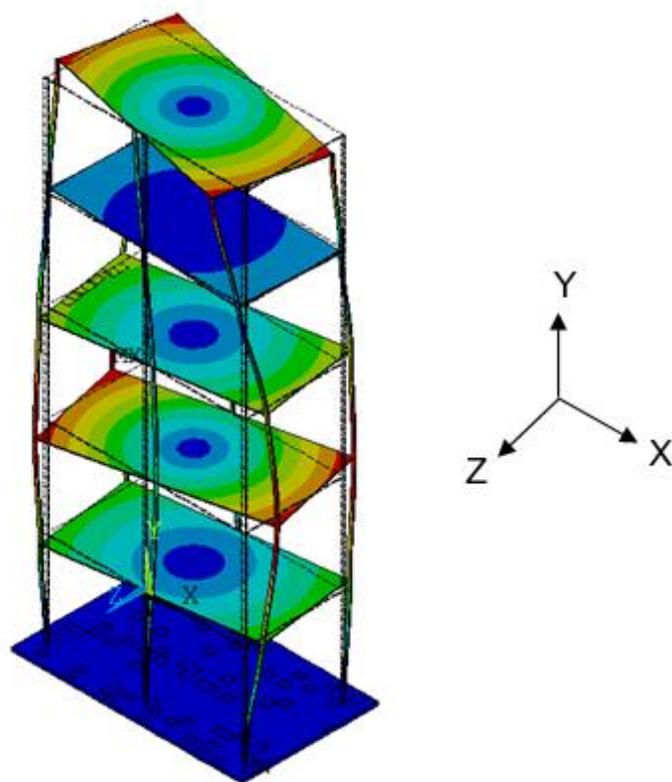


a) Vista 3D

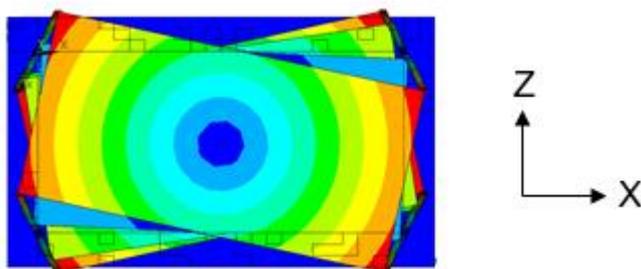


b) Vista lateral

Figura 172 – Modo de vibração da quinta frequência natural  $f_{05} = 11,75$  Hz

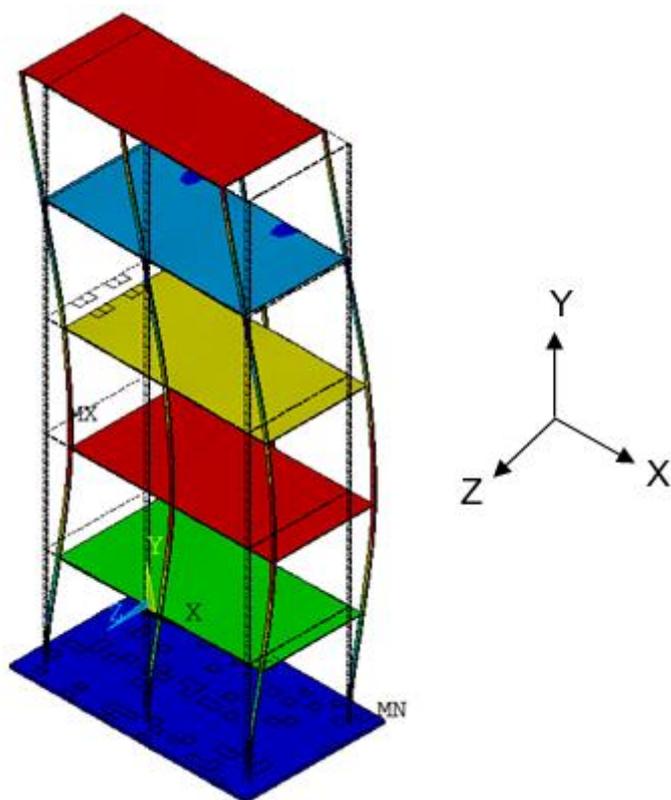


a) Vista 3D

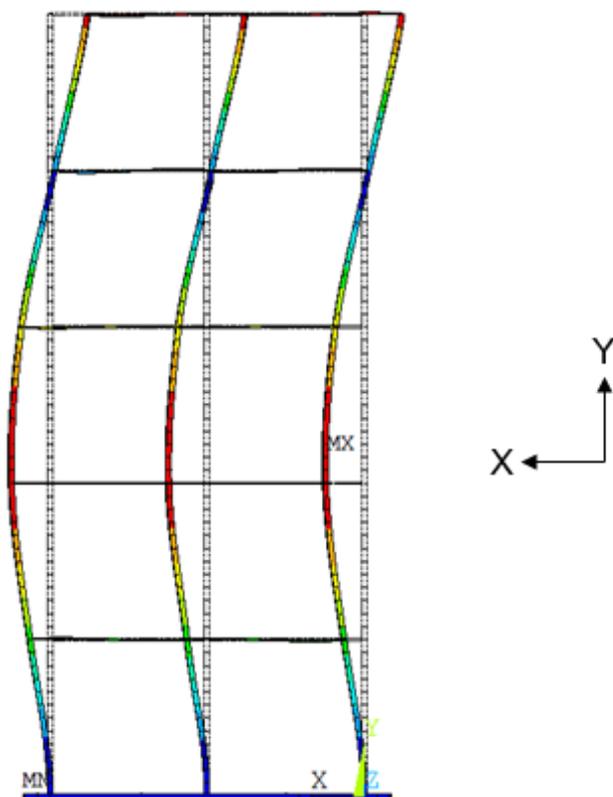


b) Vista superior

Figura 173 – Modo de vibração da sexta frequência natural  $f_{06} = 12,65$  Hz

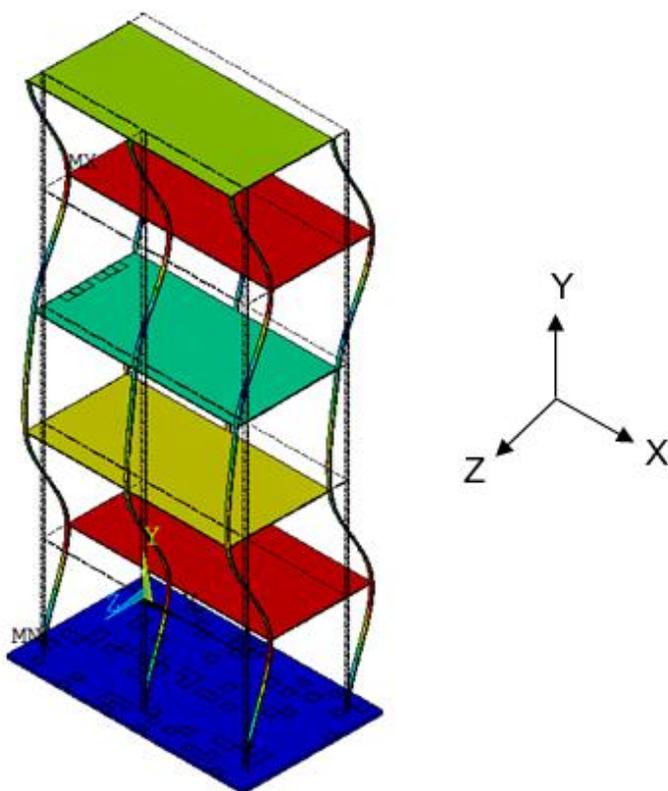


a) Vista 3D

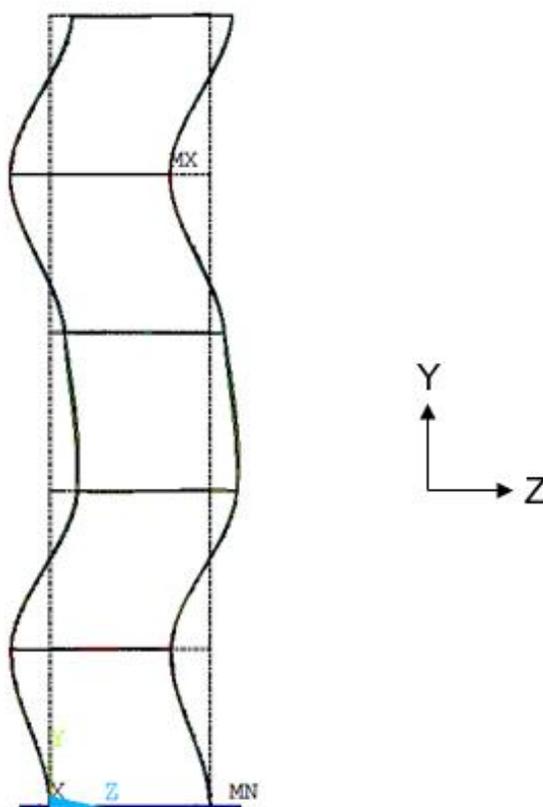


b) Vista frontal

Figura 174 – Modo de vibração da sétima frequência natural  $f_{07} = 12,98$  Hz

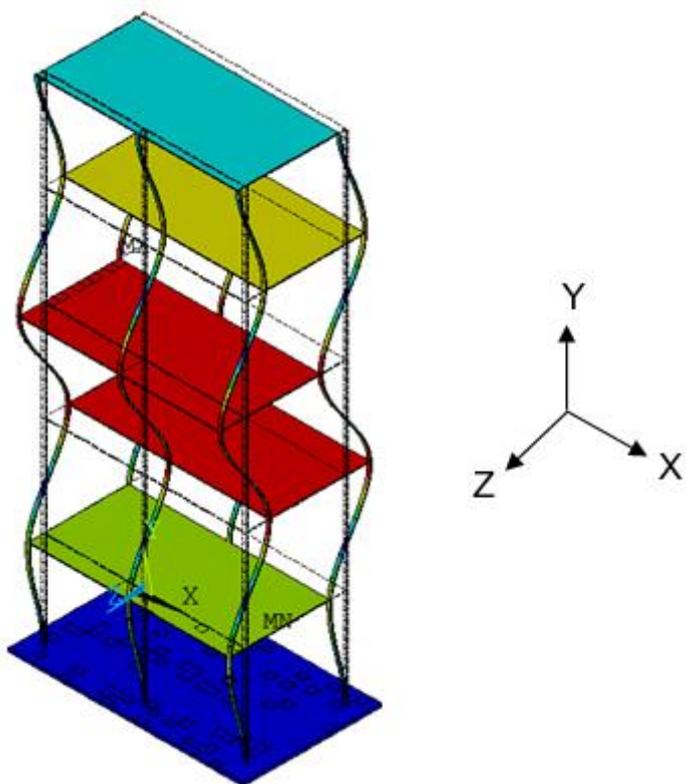


a) Vista 3D

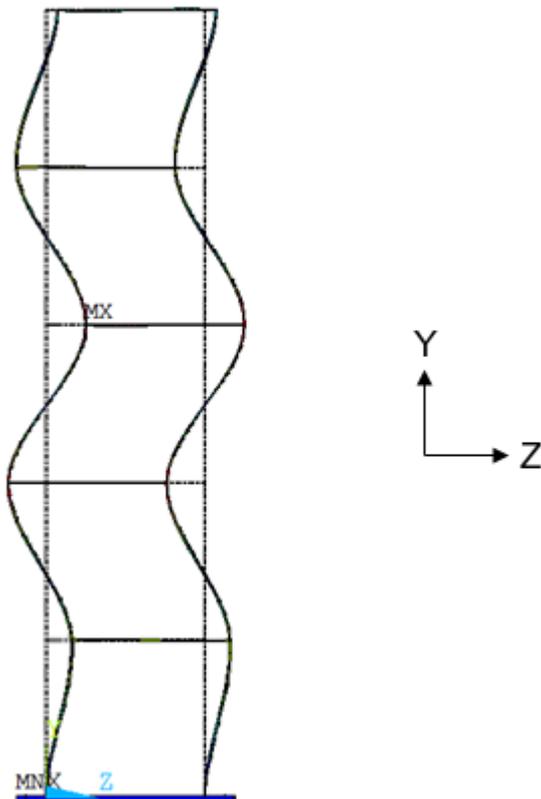


b) Vista lateral

Figura 175 – Modo de vibração da oitava frequência natural  $f_{08} = 16,05$  Hz

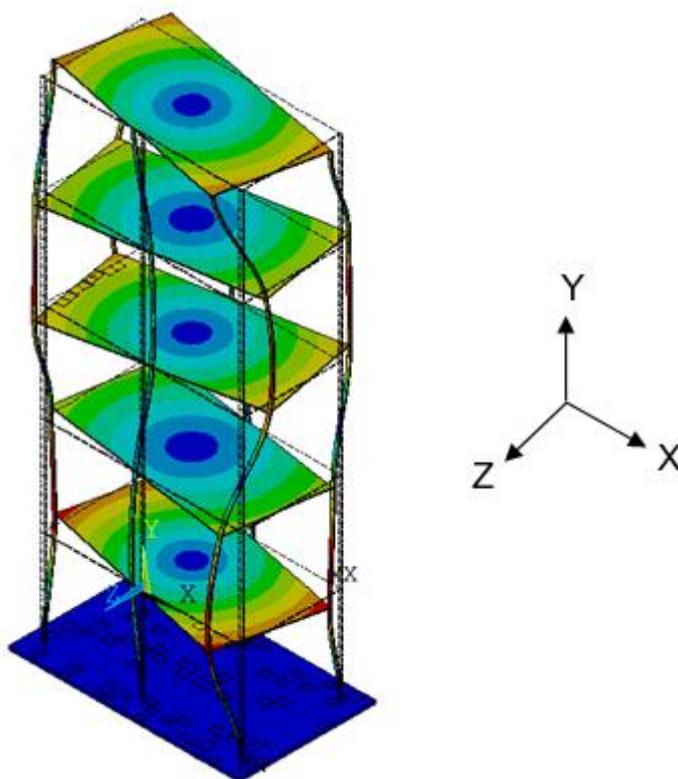


a) Vista 3D

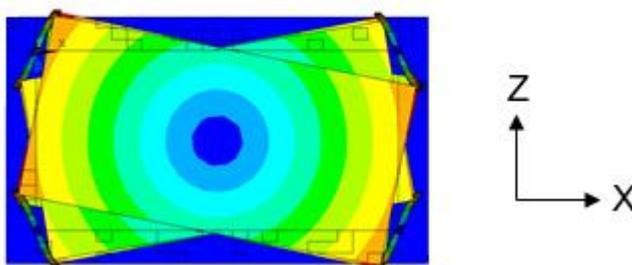


b) Vista lateral

Figura 176 – Modo de vibração da nona frequência natural  $f_{09} = 19,21$  Hz



a) Vista 3D



b) Vista superior

Figura 177 – Modo de vibração da décima frequência natural  $f_{10} = 23,22$  Hz

Analisando as Figuras 168 a 177, nota-se que, entre os 10 primeiros modos de vibração analisados, existe uma predominância de modos de vibração de flexão na direção Z, que é representada por 5 modos de vibração distintos. Este fato ocorre devido ao alto grau de flexibilidade presente na direção Z, tornando esta direção mais susceptível aos efeitos dinâmicos na estrutura. Por outro lado, a direção X, por ser uma direção com bastante rigidez, apresenta apenas dois modos de vibração referentes a flexão.

## 5.4 Análise transiente

Através da análise transiente do modelo (valendo-se dos dados de força no domínio do tempo obtidos no ensaio com o martelo de impacto no item 4.7, bem como seus respectivos dados de coeficiente de amortecimento), utilizando-se o programa computacional ANSYS (Ansys (2009)), foram obtidos dados de aceleração, velocidade e deslocamento no domínio do tempo, bem como dados de frequência do modelo numérico nas direções Z e X.

### 5.4.1 Análise transiente (Direção Z)

Através da análise transiente do modelo, valendo-se dos dados de força no domínio do tempo obtidos no ensaio com o martelo de impacto no item 4.7.1, bem como seu respectivo coeficiente de amortecimento obtido no item 4.3.1 (ver Tabela 3 no item 2.3), foram obtidos dados de aceleração, velocidade e deslocamento no domínio do tempo, bem como dados de frequência do modelo numérico na direção Z. O resultado de velocidade no domínio do tempo está apresentado na Figura 178 e o resultado da velocidade no domínio da frequência pode ser visualizado na Figura 179. O resultado de aceleração no domínio do tempo e o resultado de deslocamento no domínio do tempo podem ser visualizados nas Figuras 231 e 232, respectivamente, localizadas no Anexo 1.

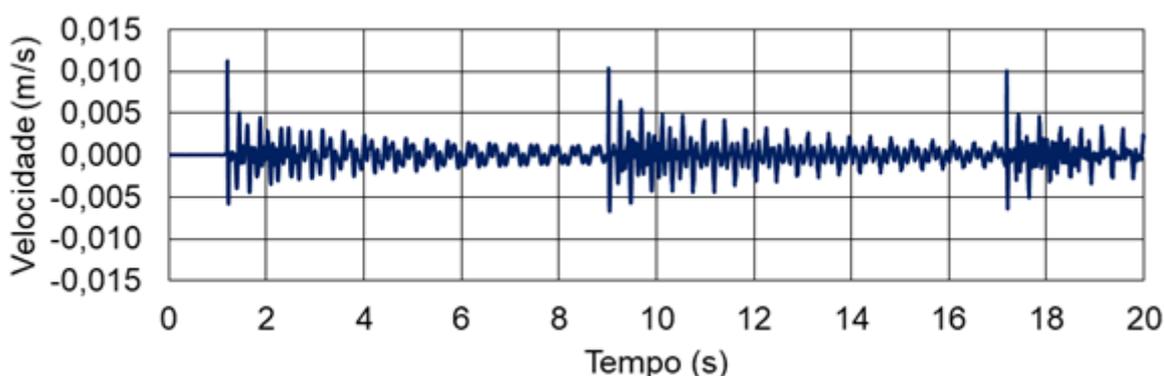


Figura 178 – velocidade no domínio do tempo (eixo Z)

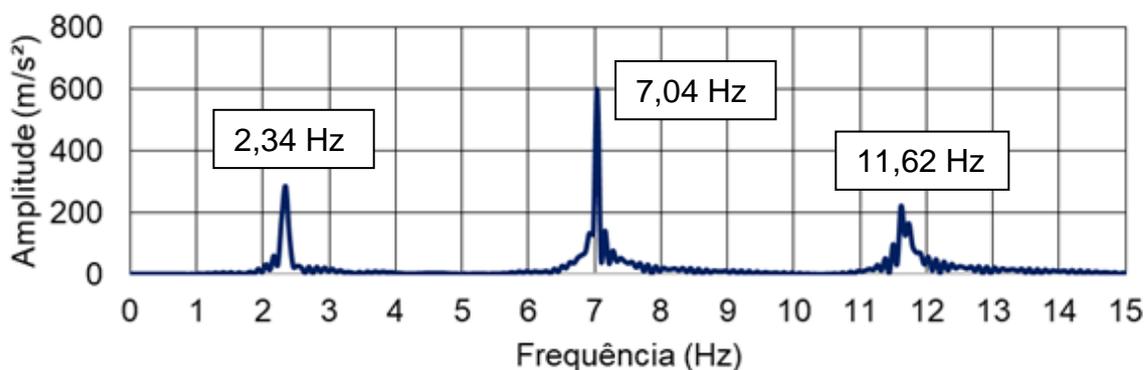


Figura 179 – espectro de resposta (eixo Z)

#### 5.4.2 Análise transiente (Direção X)

Através da análise transiente do modelo, valendo-se dos dados de força no domínio do tempo obtidos no ensaio com o martelo de impacto no item 4.7.2, bem como seu respectivo coeficiente de amortecimento obtido no item 4.3.2 (ver Tabela 3 no item 2.3), foram obtidos dados de aceleração, velocidade e deslocamento no domínio do tempo, bem como dados de frequência do modelo numérico na direção X. O resultado de velocidade no domínio do tempo está apresentado na Figura 180 e o resultado da velocidade no domínio da frequência pode ser visualizado na Figura 181. O resultado de aceleração no domínio do tempo e o resultado de deslocamento no domínio do tempo podem ser visualizados nas Figuras 233 e 234, respectivamente, localizadas no Anexo 1.

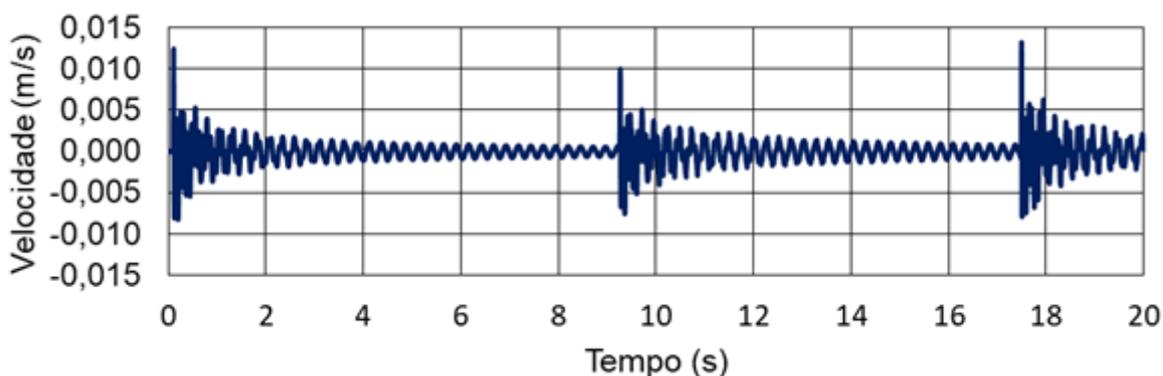


Figura 180 – velocidade no domínio do tempo (eixo X)

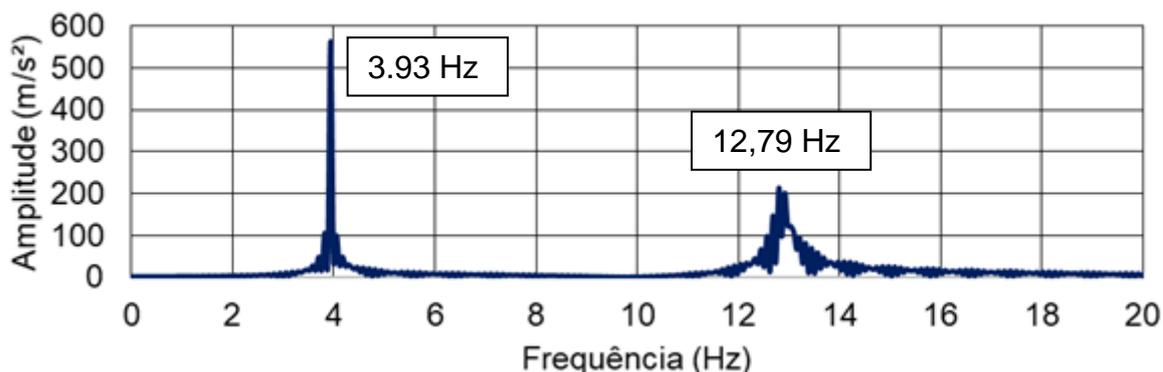


Figura 181 – espectro de resposta (eixo X)

## 5.5 Comparação do modelo numérico-computacional calibrado com os ensaios experimentais

Neste item serão apresentadas as comparações das frequências naturais da estrutura, dos modos de vibração e do comportamento da estrutura no domínio do tempo e da frequência quando submetida a um carregamento no domínio do tempo conhecido do ensaio com o martelo de impacto realizado no item 4.7.

### 5.5.1 Calibração das frequências naturais da estrutura

A seguir, apresentam-se os valores das frequências naturais de vibração do modelo numérico, obtidas via emprego do programa computacional ANSYS (Ansys(2009)), descrito anteriormente neste capítulo, em comparação com os valores destas frequências obtidas mediante os testes experimentais referentes aos ensaios 1 a 4, respectivamente, realizados sobre a estrutura, conforme descrito no capítulo quatro. Ressalta-se que os ensaios 5 e 6 foram retirados da presente comparação de resultados, por não terem apresentado valores adequados de coerência nas FRFs e, conseqüentemente, não terem apresentado resultados satisfatórios. Apesar de o ensaio 4 ter sido realizado de forma simplista mediante filmagem de vídeo com o emprego de um smartphone, ainda assim apresentou elevada precisão em relação as duas primeiras frequências naturais da estrutura, e desta forma, torna-se válido apresentar seus resultados. Os Ensaios 2, 3 e 4 foram realizados apenas como forma de validação dos resultados dos ensaios com os acelerômetros, bem como para

demonstrar as limitações e as inúmeras opções de equipamentos e métodos para monitoração experimental dinâmica de estruturas. A tabela 21 apresenta um resumo de todas as frequências naturais obtidas nos ensaios de vibração livre (ensaios 1 a 4) e a Tabela 22 apresenta um comparativo de todas as diferenças entre as frequências obtidas nos ensaios experimentais e as frequências obtidas na análise numérica, bem como as diferenças máximas obtidas para cada frequência natural quando analisados os quatro ensaios em conjunto.

Tabela 21 – Tabela comparativa de frequências naturais

Freq.	Direção	Ensaio Experimental				Análise Numérica (Hz)
		Ensaio 1 (Hz)	Ensaio 2 (Hz)	Ensaio 3 (Hz)	Ensaio 4 (Hz)	
f <sub>01</sub>	Z	2,22	2,29	2,15	2,26	2,34
f <sub>02</sub>	X	4,15	4,34	4,10	4,28	3,93
f <sub>04</sub>	Z	6,56	6,56	6,45	-	7,06
f <sub>05</sub>	Z	10,50	10,51	10,46	-	11,75
f <sub>07</sub>	X	13,72	13,69	13,39	-	12,98

Tabela 22 – Tabela comparativa de diferenças máximas

Freq.	Direção	Ensaio Experimental				Diferença Máxima (%)
		Ensaio 1 %	Ensaio 2 %	Ensaio 3 %	Ensaio 4 %	
f <sub>01</sub>	Z	5,13	2,14	8,12	3,42	8,12
f <sub>02</sub>	X	5,30	9,45	4,14	8,18	9,45
f <sub>04</sub>	Z	7,08	7,08	8,64	-	8,64
f <sub>05</sub>	Z	10,64	10,55	10,98	-	10,98
f <sub>07</sub>	X	5,39	5,19	3,06	-	5,39

Comparando-se os valores das frequências naturais da estrutura, pode-se perceber que o modelo estrutural em estudo está bem representado numericamente pelo

modelo computacional desenvolvido via método dos elementos finitos (Ansys (2009)). As características dinâmicas do sistema, no que diz respeito às frequências naturais estão bem representadas, pois a diferença máxima existente em todos os ensaios, quando comparadas com a análise numérica, foi de 10,98%, valor considerado aceitável. Analisando a frequência fundamental da estrutura, esta diferença máxima se reduz para 8,12%. Se analisados apenas os dois primeiros ensaios, que são ensaios realizados com equipamentos próprios para este fim, observa-se uma diferença variando de 2,14% a 5,13% em relação a frequência fundamental.

Vale ressaltar que essa diferença acontece devido a diversos fatores, tais como: diferenças geométricas entre o modelo físico e o modelo numérico (visto que o modelo físico possui diversas imperfeições geométricas em sua elaboração, tais como: diferenças de espessuras, desaprumo de pilares, pilares curvados, lajes com margem exterior aos pilares), diferenças de condições de contorno (visto que o modelo numérico considera um engastamento perfeito na base, enquanto que, no modelo físico não é possível reproduzir este engastamento em sua totalidade, tornando o modelo físico naturalmente mais flexível) e imperfeições físicas, principalmente no que diz respeito às soldas entre os pilares e as lajes.

Levando em consideração as diferenças obtidas e as justificativas apresentadas, os resultados demonstram que a análise numérica do modelo elaborada pelo software ANSYS (Ansys (2009)) representa de forma fidedigna os resultados da estrutura em termos de frequências naturais, quando comparados com os resultados dos testes experimentais.

### 5.5.2 Comparação dos modos de vibração da estrutura

As Figuras 182 a 186 apresentam a comparação dos cinco primeiros modos experimentais de vibração relacionados a flexão (obtidos via monitoração experimental no Ensaio 1) com os cinco modos correspondentes de flexão obtidos via modelo em elementos finitos, gerados pela correlação das amplitudes obtidas nos gráficos de domínio da frequência e as amplitudes dos modos de vibração do modelo. Cabe ressaltar, que, não havia um acelerômetro posicionado no primeiro andar da estrutura ( $h = 30$ ), e os dados dos modos de vibração referentes a esta altura foram inseridos no gráfico pelo princípio da simetria.

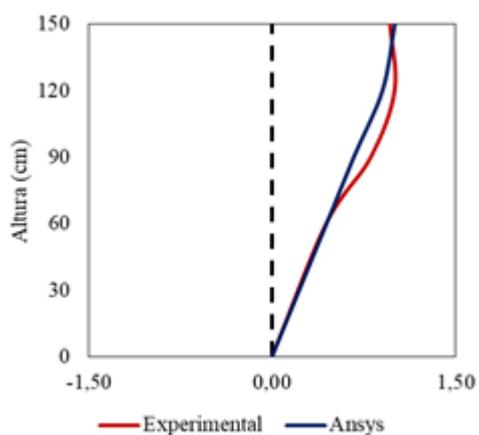


Figura 182 – Comparação dos modos de vibração da estrutura: primeiro modo (eixo Z)

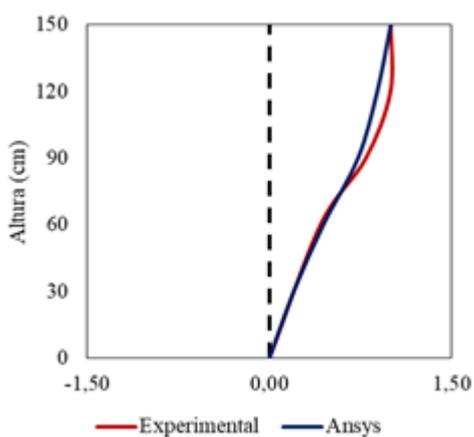


Figura 183 – Comparação dos modos de vibração da estrutura: segundo modo (eixo X)

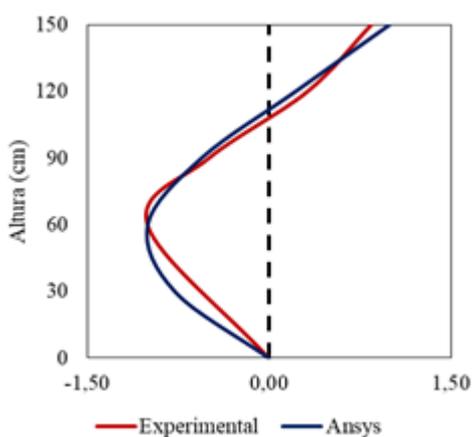


Figura 184 – Comparação dos modos de vibração da estrutura: quarto modo (eixo Z)

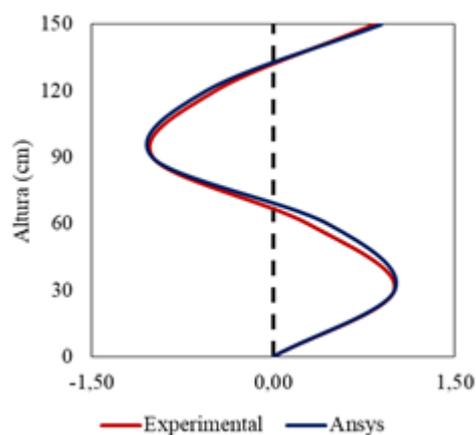


Figura 185 – Comparação dos modos de vibração da estrutura: quinto modo (eixo Z)

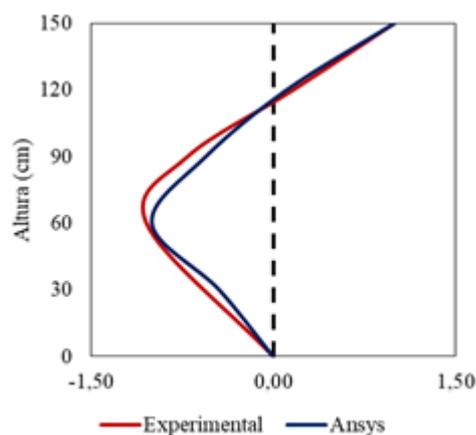


Figura 186 – Comparação dos modos de vibração da estrutura: sétimo modo (eixo X)

Observa-se que existe uma boa representatividade em todos os modos de vibração apresentados, com mínimas margens de erro em determinados pontos da estrutura. Estas margens de erro acontecem, possivelmente, devido a utilização de apenas quatro acelerômetros (únicos disponíveis para a realização deste trabalho) ao longo do comprimento para definir os modos de vibração, onde, naturalmente, quanto maior a quantidade de acelerômetros ao longo do comprimento, melhor seria a discretização do modo de vibração. Outra justificativa plausível são as imperfeições geométricas existentes no modelo construído em laboratório, bem como condições não ideais de engastamento da base que, por mais bem elaboradas que fossem, não conseguem reproduzir um engaste perfeito como reproduzido no modelo numérico.

### 5.5.3 Comparação do comportamento da estrutura referente a análise transiente

A as Figuras 187 a 189 apresentam, respectivamente, um comparativo da aceleração, velocidade e deslocamento no domínio do tempo, dos resultados obtidos através do ensaio experimental com o martelo de impacto do item 4.7 e dos resultados da análise numérica transiente, ambos referentes a direção Z. A Figura 190 apresenta um comparativo do espectro de resposta de ambas as análises na direção Z. Vale ressaltar que esta análise numérica foi elaborada com dados oriundos das análises experimentais realizadas, tais como os dados de força no domínio do tempo registrados pelo martelo de impacto no item 4.7 e os dados de amortecimento da estrutura obtidos na análise experimental realizada no item 4.3. Os comparativos de aceleração, velocidade e deslocamento referentes a direção X podem ser visualizados, respectivamente, nas Figuras 191 a 193, e o comparativo do espectro de frequências na direção X pode ser visualizado na Figura 194.

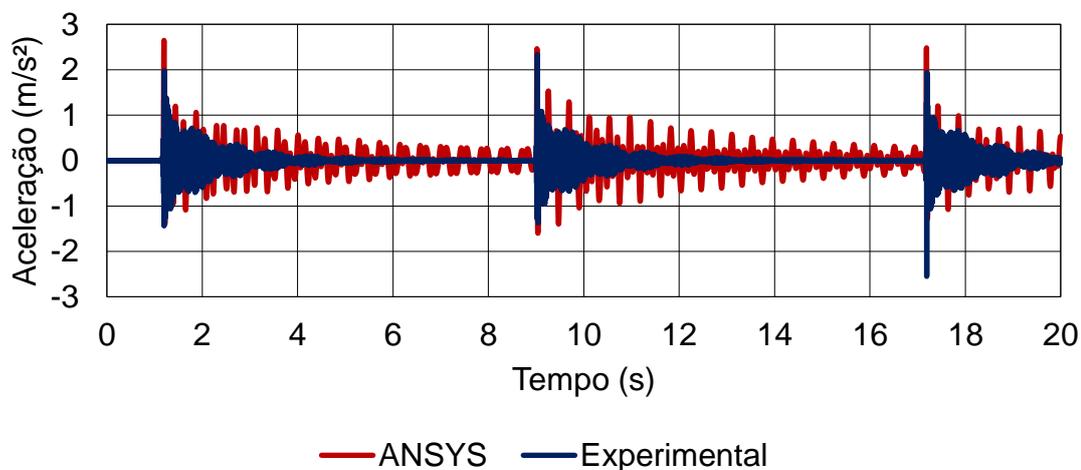


Figura 187 – Aceleração no domínio do tempo. Comparativo (eixo Z)

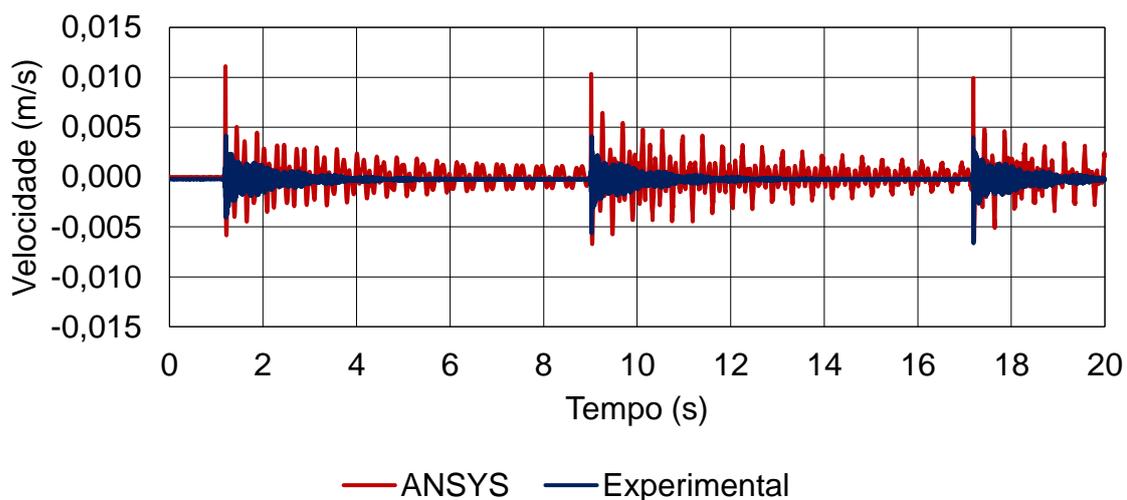


Figura 188 – Velocidade no domínio do tempo. Comparativo (eixo Z)

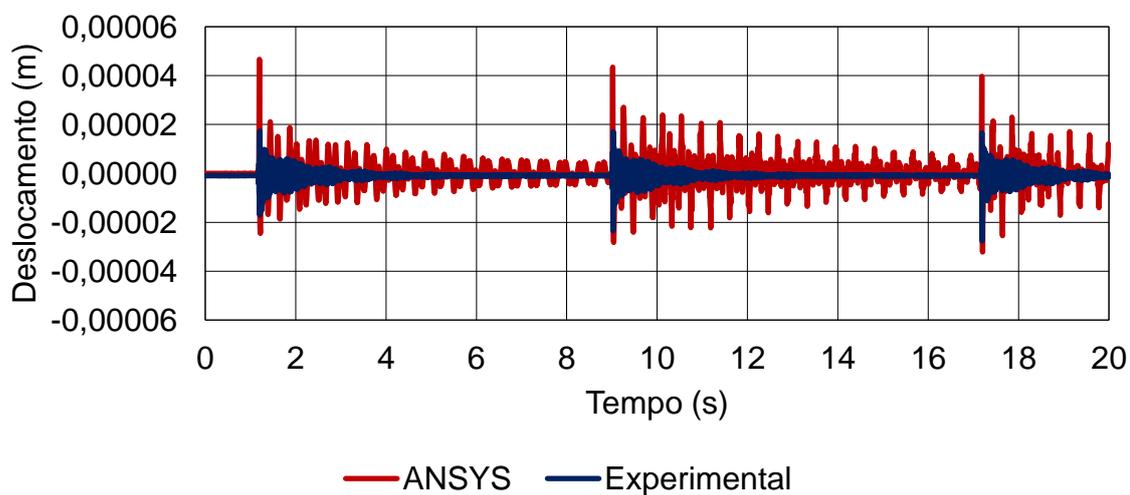


Figura 189 – Deslocamento no domínio do tempo. Comparativo (eixo Z)

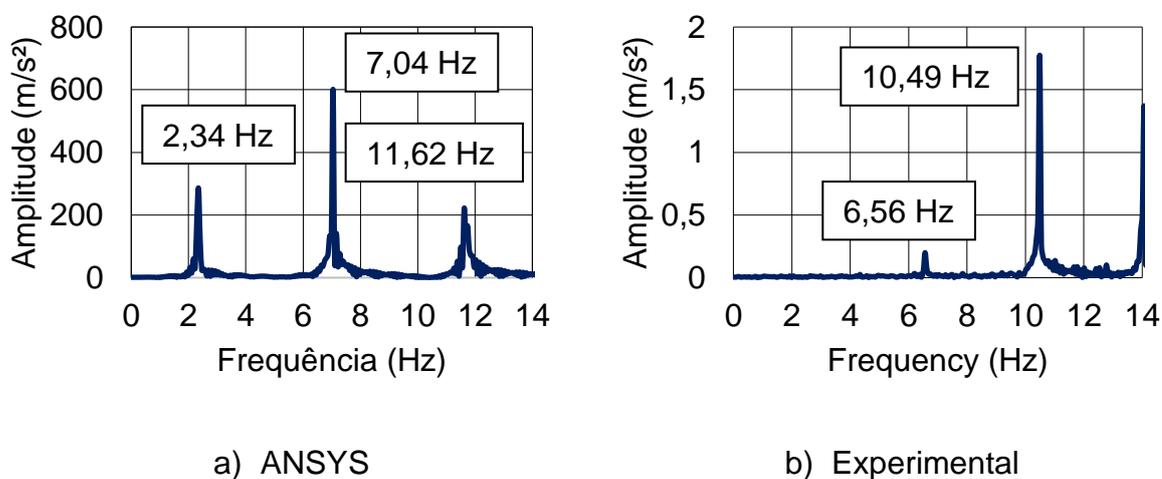


Figura 190 – Espectro de resposta. Comparativo (eixo Z)

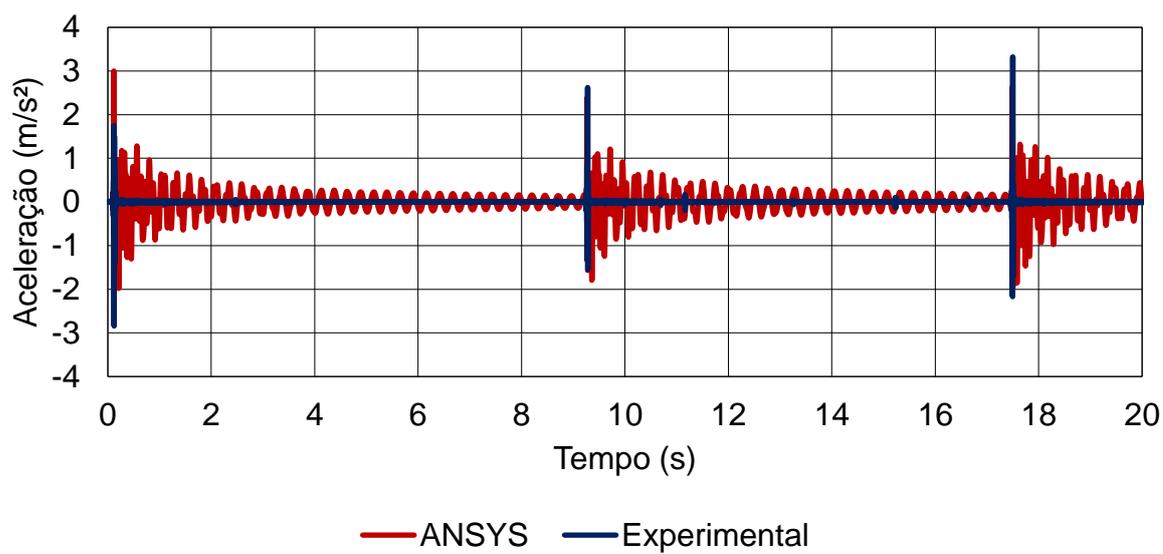


Figura 191 – Aceleração no domínio do tempo. Comparativo (eixo X)

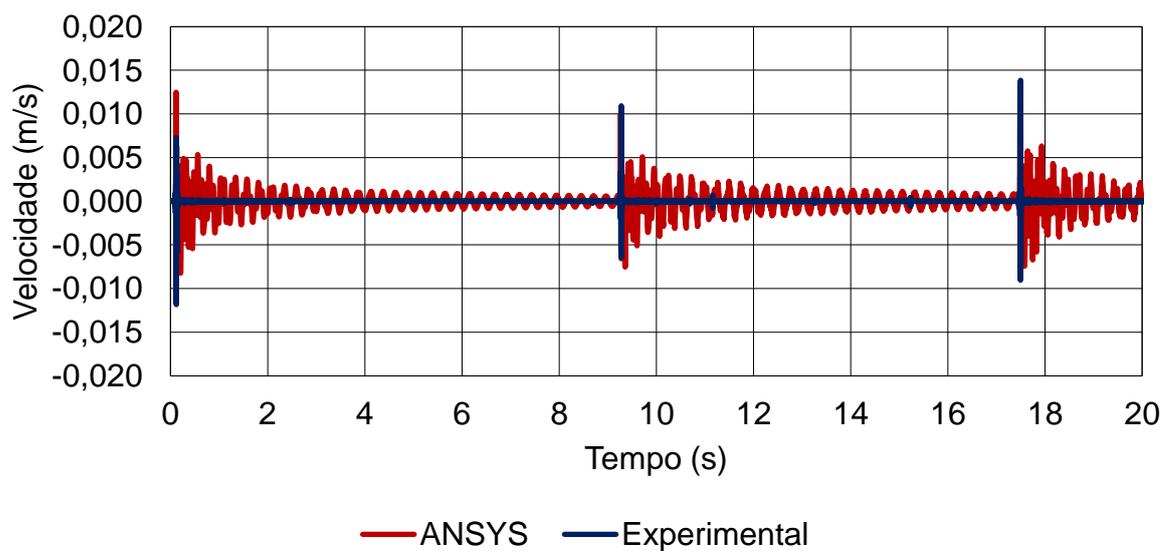


Figura 192 – Velocidade no domínio do tempo. Comparativo (eixo X)

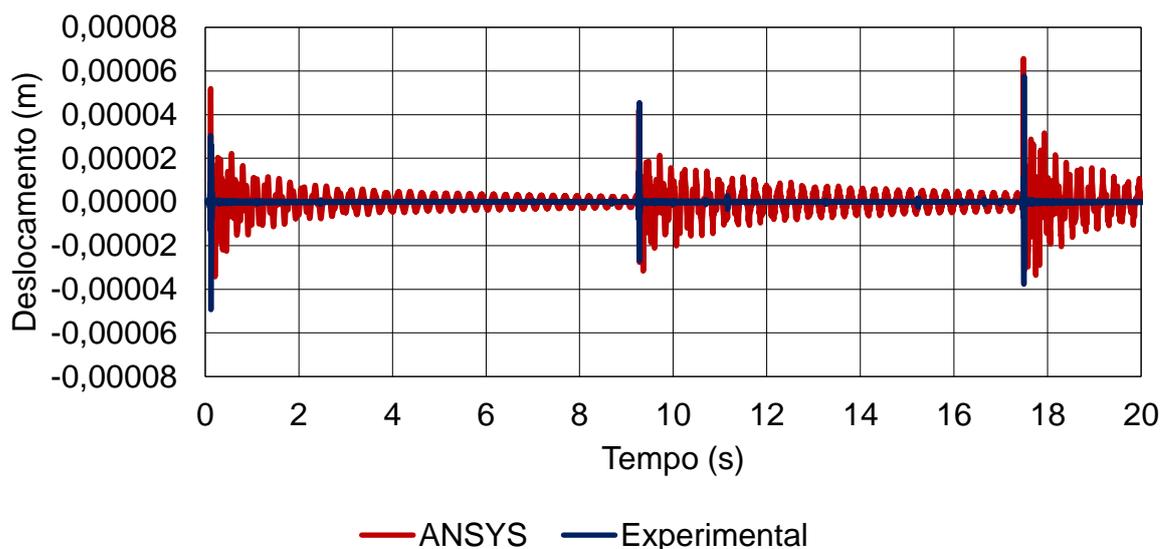


Figura 193 – Deslocamento no domínio do tempo. Comparativo (eixo X)

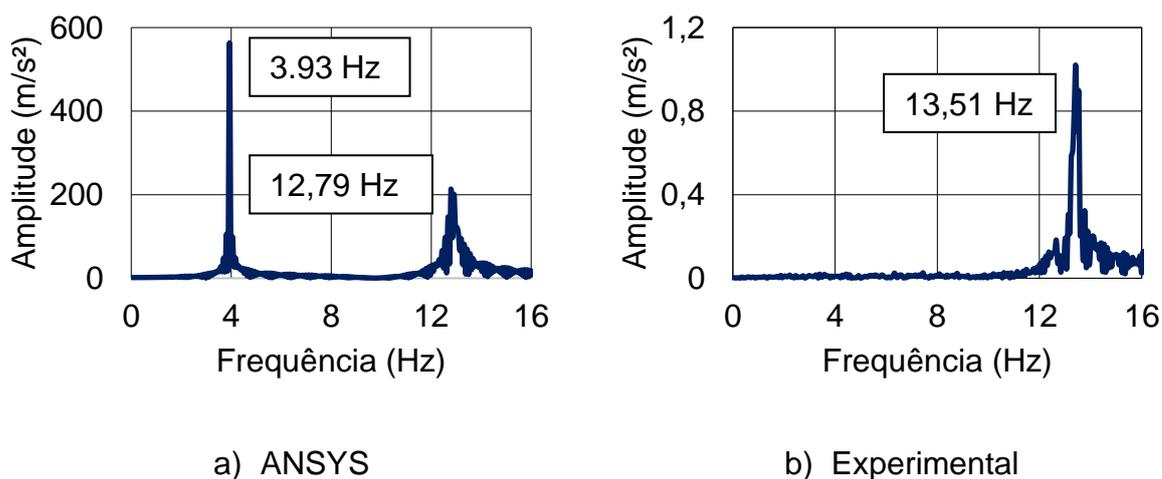


Figura 194 – Espectro de resposta. Comparativo (eixo X)

Analisando o espectro de frequência na direção Z (Figura 190), é possível notar que o ensaio experimental com o martelo não conseguiu captar a primeira frequência natural da estrutura. Além disso, nota-se uma enorme diferença quando comparadas as amplitudes entre o ensaio experimental e a análise numérica transiente. Este fato ocorreu, pois como visto nos itens 4.7.1 e 4.8.1, os ensaios realizados com o uso de um martelo de impacto não obtiveram uma boa coerência para baixas frequências, prejudicando assim os resultados desta análise. Estes mesmos problemas podem ser constatados nos ensaios realizados na direção X (Figura 194) onde não foi possível captar a segunda frequência natural da estrutura, também apresentando problemas

com a coerência do ensaio (ver item 4.7.2 e 4.8.2) e amplitudes de frequência incompatíveis. Devido a este fato ter ocorrido em ambos os ensaios experimentais com martelo de impacto, chega-se à conclusão de que existem problemas na confecção da estrutura que dificultam a obtenção destes parâmetros para baixas frequências, tais como problemas de fabricação, tanto no que diz respeito a imperfeição geométrica da estrutura, quanto na elaboração das ligações entre os pilares e as lajes (pois durante os ensaios, algumas soldas se soltaram devido aos impactos do martelo). Outra explicação é a geometria da estrutura que, para este tipo de ensaio, favoreceu muito mais os efeitos de torção do que os de flexão, fenômeno que pode ter interferido sensivelmente nos resultados. Outro problema que pode ser notado, tanto na direção Z (Figuras 187 a 189) quanto (e principalmente) na direção X (Figuras 191 a 193), é a diferença do comportamento dos gráficos no domínio do tempo, onde se nota um amortecimento mais acentuado no ensaio experimental quando comparado com a análise numérica transiente. Tais problemas encontrados durante os ensaios tornam os resultados desta análise insatisfatórios.

## 5.6 Considerações do capítulo

No presente capítulo foi apresentada a calibração do modelo numérico em termos de calibração de frequências naturais da estrutura, calibração dos modos de vibração da estrutura, e calibração do comportamento da estrutura no domínio do tempo e da frequência quando submetida a uma força conhecida. Nestas calibrações citadas, são feitas comparações entre os resultados obtidos nos ensaios e os resultados obtidos nas análises numéricas, apresentando seus respectivos valores, percentuais de diferença e comparação gráfica. Em cada calibração de resultado é feito um breve resumo dos resultados obtidos, em forma de tabela, e são elaborados comentários referentes à qualidade dos resultados.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1 Introdução

O objetivo deste trabalho de pesquisa diz respeito à calibração do comportamento estrutural dinâmico de edifícios, quando submetidos a ações dinâmicas. Deste modo, foi elaborado um modelo de edifício em aço construído em laboratório.

Ao longo do estudo, foram realizadas monitorações experimentais dinâmicas com base no emprego de estratégias do tipo SIMO (*Single Input Multiple Output*) e SISO (*Single Input Single Output*). Desta forma, foram utilizados vários equipamentos visando a medição experimental, tais como: acelerômetros, um dispositivo de aquisição de dados com base em vibrometria a laser (*Portable Digital Vibrometer: PDV 100*), e também smartphones que, apesar de proporcionarem uma forma mais simplista de medição, surgem como uma boa alternativa pelo fácil acesso aos equipamentos no mercado. Além dos equipamentos de medição, foram utilizados dois martelos de impacto na realização de alguns ensaios, que possibilitam à obtenção das reais cargas dinâmicas impostas a estrutura.

Um modelo numérico-computacional tridimensional, elaborado via método dos elementos finitos, por meio do emprego do programa computacional ANSYS (Ansys (2009)), foi desenvolvido para o estudo do efeito das ações dinâmicas na estrutura. Com este modelo, foi feita uma análise de vibração livre da estrutura, e também uma análise de vibração forçada, valendo-se dos dados das reais cargas dinâmicas impostas à estrutura nos ensaios experimentais com a utilização do martelo de impacto.

Com base no emprego dos dados oriundos dos testes experimentais, referentes à resposta dinâmica do edifício, a calibração do modelo numérico computacional foi realizada convenientemente, com base na comparação das respostas da estrutura em termos de frequências naturais e modos de vibração.

## 6.2 Conclusões

Apresenta-se a seguir um breve resumo das conclusões obtidas ao longo deste trabalho de pesquisa, onde foi realizado um estudo de cunho experimental e numérico. Os resultados experimentais deste estudo foram obtidos com base no desenvolvimento de dezenas de testes e foram empregados na calibração do modelo numérico utilizado para uma investigação extensa acerca do comportamento dinâmico de um edifício em aço, quando submetido a ações dinâmicas. Ao longo deste trabalho de pesquisa foram apresentadas inúmeras conclusões relevantes, sendo que estas serão apresentadas na sequência do texto de forma itemizada, com ênfase em aspectos ou parâmetros específicos utilizados na análise do comportamento dinâmico da estrutura em estudo.

- a) Estratégias utilizadas na monitoração experimental dinâmica: SIMO (*Single Input Multiple Output*) e SISO (*Single Input Single Output*)

Duas estratégias empregadas na a monitoração experimental dinâmica de estruturas (SIMO e SISO) foram utilizadas ao longo do estudo. Percebe-se que a medição do tipo SIMO [força de excitação aplicada sobre um ponto da estrutura (*entrada*) e a resposta dinâmica (*saída*) obtida simultaneamente em vários pontos] é a única técnica experimental, dentre as técnicas utilizadas, capaz de fornecer os modos de vibração da estrutura, pois fornece diferentes pontos de resposta ao longo da altura do edifício no mesmo ensaio. Todavia, neste tipo de experimento, com os equipamentos disponíveis para a realização deste trabalho, não foi possível obter o controle da entrada do sinal (*excitação*), sendo obtida apenas a Transformada Rápida de Fourier (FFT) da resposta dinâmica (*saída*).

Por outro lado, apresenta-se também a técnica conhecida como SISO [força aplicada e resposta dinâmica são obtidas simultaneamente sobre cada ponto da estrutura, pois a partir da medição da força de excitação (*entrada*) e da resposta dinâmica (*saída*), as Funções de Resposta em Frequência (FRF) de cada ponto do modelo podem ser obtidas, representando-se assim a relação entre o sinal de saída (resposta dinâmica: aceleração) sobre o sinal de entrada (excitação dinâmica: força), em relação a cada ponto da estrutura]. Nesta técnica, por ser a única técnica capaz de correlacionar o sinal de entrada com o sinal de saída com o equipamento disponível

para análise, a resposta estrutural dinâmica obtida neste tipo de ensaio experimental é mais confiável, pois apresenta um grau de coerência da resposta dinâmica (picos de frequências) definido com mais qualidade e precisão.

#### b) Frequências naturais e modos de vibração obtidos experimentalmente

Neste trabalho foi definido previamente que o estudo seria focado nas 10 primeiras frequências naturais da estrutura, e dentro deste limite, em cada direção (X e Z) seriam estudadas até no máximo a terceira frequência natural associada à flexão nesta direção. Desta forma, os resultados da investigação experimental revelam a identificação de cinco frequências naturais da estrutura, correspondentes a cinco modos de vibração de flexão, aos quais, três são correspondentes a flexão na direção Z, e dois são correspondentes a flexão na direção X. As demais cinco frequências restantes não foram estudadas, pois representam modos de vibração de torção, ou modos de vibração de flexão na direção Z que estão além da terceira frequência natural, portanto, estando fora dos limites estipulados previamente. Cabe ressaltar que os valores das frequências naturais, correspondentes aos modos de vibração de flexão, obtidos dos seis testes experimentais ao longo do trabalho foram apresentados e comparados entre si, quantitativamente, e foram observados valores de frequências muito próximos, com diferenças máximas da ordem de 10%. Assim sendo, destaca-se, a partir dos resultados oriundos dos testes experimentais, que o valor da primeira frequência natural da estrutura foi de 2,22 Hz (Ensaio 1); 2,29 Hz (Ensaio 2); 2,15 Hz (Ensaio 3), 2,26 Hz (Ensaio 4), não encontrada no ensaio 5 e 2,25 Hz (Ensaio 6). No tocante a segunda frequência natural os valores experimentais obtidos dos ensaios foram, respectivamente, 4,15 Hz (Ensaio 1); 4,34 Hz (Ensaio 2); 4,10 Hz (Ensaio 3) e 4,28 Hz (Ensaio 4), não encontrada no ensaio 5 e 4,12 (Ensaio 6). A terceira frequência natural representa uma frequência de torção. No que tange a quarta frequência natural, os valores foram de 6,56 Hz (Ensaio 1); 6,56 Hz (Ensaio 2); 6,45 Hz (Ensaio 3); não encontrada no ensaio 4; 6,63 Hz (Ensaio 5) e 6,50 Hz (Ensaio 6). Em relação a quinta frequência natural, os valores foram de 10,50 Hz (Ensaio 1); 10,51 Hz (Ensaio 2); 10,46 (Ensaio 3); não encontrada no ensaio 4; 10,51 Hz (Ensaio 5) e 10,44 Hz (Ensaio 6). A sexta frequência natural representa o segundo modo de torção da estrutura. No tocante a sétima frequência natural, os resultados obtidos foram 13,72 Hz (Ensaio 1); 13,69 Hz (Ensaio 2); 13,69 Hz (Ensaio 3); não encontrada no

ensaio 4; 13,51 Hz (Ensaio 5) e 13,50 Hz (Ensaio 6). As oitava e nona frequências naturais da estrutura representam a quarta e quinta frequências naturais de flexão na direção Z (portanto fora do limite estipulado no estudo); e a décima frequência natural da estrutura representa uma frequência de torção. Tal proximidade dos resultados ressalta a concordância entre os valores das frequências naturais obtidos experimentalmente, ao qual os autores consideram uma boa validação dos testes experimentais. Convém chamar a atenção do leitor para o fato de que o Ensaio 3, em cada direção (X e Z), fornece apenas o valor da primeira frequência da estrutura, pois o mesmo foi realizado de maneira simplificada e de baixa precisão, utilizando filmagem de vídeo. Ressalta-se também que os ensaios cinco e seis, elaborados com os martelos de impacto, tiveram problemas com as respectivas coerências nos ensaios, e devido a este fato, ou não registraram, ou registraram com pouca precisão as primeiras frequências naturais da estrutura.

#### c) Coeficiente de amortecimento estrutural experimental

Os coeficientes de amortecimento do edifício investigado foram obtidos experimentalmente através do método do decremento logarítmico. Deste modo, o valor do coeficiente de amortecimento estrutural obtido em relação ao primeiro modo de vibração (primeiro modo de vibração de flexão na direção Z) foi igual a 0,22%. No que tange ao segundo modo de vibração (primeiro modo de vibração de flexão na direção X), o valor do coeficiente de amortecimento estrutural foi de 0,55%. Por outro lado, em relação ao quarto modo de vibração (segundo modo de vibração de flexão na direção Z), o coeficiente de amortecimento foi igual a 0,68%. No que se refere ao quinto modo de vibração da estrutura (terceiro modo de vibração de flexão na direção Z), o coeficiente de amortecimento foi de 0,93%. Finalmente, no tocante ao sétimo modo de vibração (segundo modo de vibração de flexão na direção X), o coeficiente de amortecimento teve o valor de 0,42%. Cabe ressaltar que, com exceção ao sétimo modo de vibração, partindo do primeiro modo de vibração em diante, os coeficientes de amortecimento apresentaram um comportamento crescente.

#### d) Frequências naturais e modos de vibração obtidos pela análise numérica

Através da análise modal numérica realizada pelo software ANSYS (Ansys

(2009)), foram obtidas as seguintes frequências naturais e modos de vibração da estrutura: a primeira frequência natural da estrutura foi igual a 2,34 Hz, e representa o primeiro modo de vibração de flexão na direção Z; a segunda frequência natural da estrutura teve valor de 3,93 Hz, e representa o primeiro modo de flexão na direção X; em relação a terceira frequência natural da estrutura, seu valor foi de 4,00 Hz, e representa o primeiro modo de torção da estrutura (não estudado neste trabalho); a quarta frequência natural foi igual a 7,06 Hz e diz respeito ao segundo modo de vibração de flexão na direção Z; a quinta frequência natural teve valor de 11,75 Hz e está relacionado ao terceiro modo de vibração de flexão na direção Z; em relação a sexta frequência natural, seu valor foi de 12,65 Hz, representando o segundo modo de vibração de torção (não estudado neste trabalho); no que diz respeito a sétima frequência natural, seu valor foi de 12,98 Hz, e diz respeito ao segundo modo de vibração de flexão na direção X; a oitava frequência natural teve seu valor igual a 16,05 Hz e está relacionada ao quarto modo de flexão na direção Z (não estudado neste trabalho); a nona frequência natural foi igual a 19,21 Hz e está relacionada ao quinto modo de vibração de flexão na direção Z (não estudado neste trabalho); finalmente, a décima frequência natural da estrutura foi igual a 23,22 Hz e está relacionada ao terceiro modo de vibração de torção (também não estudado neste trabalho). Observa-se que, ao analisar as frequências naturais encontradas na análise numérica notam-se valores ligeiramente superiores quando comparadas com as frequências encontradas nos ensaios experimentais. Os autores consideram este fenômeno natural, pois o modelo numérico computacional possui ligações perfeitas entre pilares e lajes, bem como condições de contorno de engastamento perfeito em sua base. Tais situações não foram possíveis de serem reproduzidas com exatidão no modelo do edifício em aço construído em laboratório (e vice versa), o que o torna conseqüentemente mais flexível do que o modelo numérico computacional.

#### e) Calibração das frequências naturais e modos de vibração

O modelo numérico da estrutura foi calibrado a partir das medições experimentais, apresentando resultados que os autores consideram coerentes, pois a diferença existente entre os valores numéricos e experimentais são muito pequenas, com valores máximos da ordem de 8,12%, 9,45%, 8,64%, 10,98% e 5,39% em relação ao primeiro, segundo, quarto, quinto e sétimo modos de vibração da estrutura,

respectivamente. Cabe ressaltar que as formas modais obtidas experimentalmente, mediante o emprego dos acelerômetros, coincidiram com aquelas geradas via análise modal numérica com uma concordância considerada razoavelmente boa pelos autores.

### 6.3 Sugestões para trabalhos futuros

- a) Construção de um modelo de edifício em laboratório com diferente geometria, com seções transversais de pilares menos esbeltas para que o edifício sofra menos influência de efeitos de torção em sua estrutura de modo a obter resultados mais confiáveis na análise numérica transiente.
- b) Proceder ensaios experimentais com outros tipos de instrumentos de vibração forçada.
- c) Proceder ensaios experimentais com edifícios menores utilizando túnel de vento.
- d) Desenvolvimento de estudos numéricos e experimentais com sistemas estruturais de edifícios com diferentes tipos de materiais, tais como madeira ou MDF, objetivando a realização de estudos comparativos.
- e) Proceder ensaios experimentais em modelos reduzidos mais próximos dos edifícios reais.
- f) Proceder ensaios experimentais com edifícios reais.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, R. G. M., TRAUTWEIN, L. M., BITTENCOURT, T. N. Comparativo e calibração de modelos numéricos a partir de dados de monitoramento de uma ponte rodoviária curva de concreto armado. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, V. 6, n. 1, pp. 121-138, 2013.

ANSYS. Swanson Analysis Systems, Inc., P.O. Box 65, Johnson Road, Houston, PA, 15342-0065, Version 10.0, Basic analysis procedures, Second edition, 2009.

ANTUNES, P. F. C. Análise dinâmica de estruturas com sensores de Bragg. 2007. Dissertação de Mestrado. Departamento de Física, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 97f, 2007.

ANTUNES, P., LIMA, H., PINTO, P., VARUM, H., ANDRÉ, P. Sensor óptico para monitoração do comportamento dinâmico de estruturas. Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: Cargas para Cálculo de Estruturas de Edificações, Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800, Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, 2008.

BACHMANN, H. e AMMANN, W. Vibrations in structures induced by man and machines, Structural Engineering Document 3e, International Association for Bridges and Structural Engineering, 1987.

BACHMANN, H., et al. Vibration problems in structures - practical guidelines. Basel (Switzerland):Institut für Baustatik und Konstruktion, Birkhäuser, 1995.

BARILE, A. Avaliação da resposta estrutural dinâmica de efeitos submetidos à ação do vento com base na comparação entre metodologias distintas para estimativa das acelerações. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em

Engenharia Civil, PGECIV. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 188p, 2019.

BASTOS, L. S. Estudo do comportamento estrutural e análise de conforto humano de edifícios de concreto armado. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 156p, 2015.

BASTOS, L. S., BARILE, A., SILVA, J. G. S., DEBONA, G. L. Assessment of the dynamic response of buildings: experimental monitoring and FEM simulations. Eighth International Conference On Advances on Civil, Structural and Mechanical Engineering (ACSM), pp. 27 – 32, 2018.

BILOSOVÁ, A. Modal Testing. Apostila, Ostrava, República Tcheca, 2011.

BOLINA, C. C., PALECHOR, E. U. L., VÁSQUEZ, M. P. R., NICACIO, W. G., GUTIERRES, M. P. D., LOPEZ, A. A. O. Vibrações: as frequências naturais estimada e experimental de uma estrutural. Congresso Nacional de Matemática Aplicada à Indústria, 2014.

BORGES, A. C. L., FONTE, A. O. C., PONTES FILHO, I. D. S.. Análise do comportamento estrutural de um edifício esbelto de 42 pavimentos. In: Congresso Brasileiro de Concreto, 51., 2009.

BRANDÃO, F., MESQUITA, E., DIÓRGENES, A., ANTUNES, P., VARUM, H. Caracterização dinâmica de uma edificação histórica do século XIX. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, V. 11, n. 7, pp. 52 – 75, 2018.

BRANDT, A. "Noise and vibration analysis – Signal analysis and experimental procedures". 1st ed. John Wiley & Sons, Inc, 2011.

BRASILIANO, A., Identificação de sistemas e atualização de modelos numéricos com vistas à avaliação da integridade estrutural. Tese de Doutorado. Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília (UNB), Brasília, 2005.

BS 6399. Loading for buildings. Code of practice for dead and imposed loads, Inglaterra, p. 1-16, 1996.

CATULO, R. D. C. D. Análise dinâmica experimental de edifícios de alvenaria e avaliação sísmica de um edifício tipo. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 103p, 2015.

CHOPRA, A. K. Dynamics of Structures – Theory and Applications to Earthquake Engineering. 3rd ed., Pearson Education, Inc., New Jersey, 2007.

CLOUGH, R. W., PENZIEN, J; Dynamics of Structures; McGraw-Hill, 634p, 1993.

CRAIG JR., R. R. Structural Dynamics. John Wiley & Sons, 527 p, 1981.

CUNHA, A., CAETANO, E. “Experimental Modal Analysis of Civil Engineering Structures”. Sound and Vibration, v. 40 (6), p.12-20, 2006.

DEBONA, G. L. Monitoração experimental e modelagem numérica sobre a resposta estrutural dinâmica de passarelas de pedestres. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 349p, 2016.

DEBONA, G. L., SILVA, J. G. S. Monitoração experimental e modelagem numérica do comportamento dinâmico de passarelas de pedestres. Congresso TEST&e Portugal, pp. 96 – 115, 2019.

DÍAZ, I. M., REYNOLDS, P. Acceleration feedback control of human-induced floor vibrations. Engineering Structures, 32, p.163-173, 2010.

FIGUEIREDO, E., PARK, G., FARAR, C. R., WONDEN, K., FIGUEIRAS, J. Machine learning algorithms for damage detection under operational and environmental variability. Int. J. Struct. Health Monit. 2011, 10, 559-572.

GOTO, T. Studies on wind-induced motion of tall buildings based on occupants reactions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 13, pp. 241-252, 1983.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION ISO 2631/2: Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 2: Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz). Switzerland, 1989.

JAREK, A., MARCONCIN, L. R., ROCHA, R. P. O., LACERDA, A., MACHADO, R. D. Modelagem e monitoramento de deformações em vigas de concreto biapoiadas com sensores de fibra ótica – Redes de Bragg e Método Distribuído. In: Congresso Brasileiro de Concreto, 53. 2011. Florianópolis. Anais... Curitiba: UFPR, 2011.

KORKMAZ, S. A Review of Active Structural Control: Challenges for Engineering Informatics. *Computers and Structures*, 89, p.2113-2132, 2011.

LAMB, S., KWOK, K. C. S., WALTON, D. A longitudinal field study of the effects of wind-induced building motion on occupant wellbeing and work performance. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 133, pp. 29-51, 2014.

LAVÔR, L. Conforto humano em edifícios altos excitados pelo vento: metodologias de determinação das acelerações e critérios de conforto. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

MARQUES, A., CANDEIAS, P., COSTA, A. C. Caracterização do comportamento dinâmico de edifícios através de análise modal experimental. 5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas (JPÉE), 2014.

MESQUITA, E., ANTUNES, P., HENRIQUES, A. A., ARÊDE, A., ANDRÊ, P. S., VARUM, H. Avaliação da fiabilidade estrutural baseado em sistema ótico de monitorização: caso de estudo. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, V. 9, n. 2, pp. 297 – 305, 2016.

MOREIRA, T. do V. Análise da sensibilidade dinâmica de edifícios com estruturas esbeltas. Tese de Doutorado. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, COPPE. Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 246p, 2002.

MURRAY, T.M., Allen, D.E., Ungar, E.E. Floor vibrations due to human activity, Steel Design Guide Series, American Institute of Steel Construction, AISC, Chicago, USA, 2003.

MUSZYNSKA, A., 2005, "Rotordynamics", Nevada: Taylor & Francis Group.

NAHUM, K. A. R, OLIVEIRA, D. R. C. Monitoramento de pilares em edifícios altos de concreto armado. Revista Ibracon, Rio de Janeiro, V. 3, n. 2, jun. 2010.

NÁPRSTEK, J., FISCHER, C. Auto-Parametric Semi-Trivial and Post-Critical Response of a Spherical Pendulum Damper. Computers and Structures, 87, p.1204-1215, 2009.

OHLSSON, S. Floor vibrations and human discomfort [Ph.D. thesis]. Chalmers University of Technology, Suécia, 1982.

PALAZZO, D. R.; SANTOS FILHO, M. L.; MOREIRA, A. R. A Utilização de Técnicas Geodésicas no Monitoramento de Estruturas pré-moldadas. In: Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Armado, 1. 2005. São Carlos. Resumo...Curitiba: UFPR, 2005.

PEREIRA, L. A. S, MAGLUTA, C., ROITMAN, N. Análise dinâmica de edifícios submetidos à excitação de base. XXXVI Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, 2015.

PIERDICCA, A., CLEMENTI, F., MEZZAPELLE, P., FORTUNATI, A., LENCI, S. One-year monitoring of a reinforced concrete school building: Evolution of dynamic behaviour during retrofitting works. X International Conference on Structural Dynamics, EURODDYN, 2017.

PRISLAN R., 2008. Laser doppler vibrometry and modal testing. University of Ljubljana.

RIBEIRO, R., LEITE, J., PINTO, N., CALÇADA, R. Avaliação Experimental dos Efeitos Dinâmicos induzidos pelo vento na torre de telecomunicações do monte da virgem. Congresso Test&e Portugal, pp. 16 – 29, 2019.

SAMCEF, software de modelagem numérica em elementos finitos, help: <http://www.samcef.com>

SILVA, I. A. R., SILVA, J. G. S. Análise estrutural dinâmica experimental e numérica de passarelas devido ao caminhar de pedestres. XIII Simpósio de Mecânica Computacional, 2018.

WYATT, T.A. Design Guide on the Vibration of Floors, SCI Publication 076, The Steel Construction Institute and Construction Industry Research and Information, London, 1989.

## ANEXO 1: GRÁFICOS TEMPORAIS

Neste Anexo 1, apresentam-se gráficos temporais de aceleração, velocidade e deslocamento, obtidos nos ensaios experimentais, e não apresentados no corpo da dissertação.

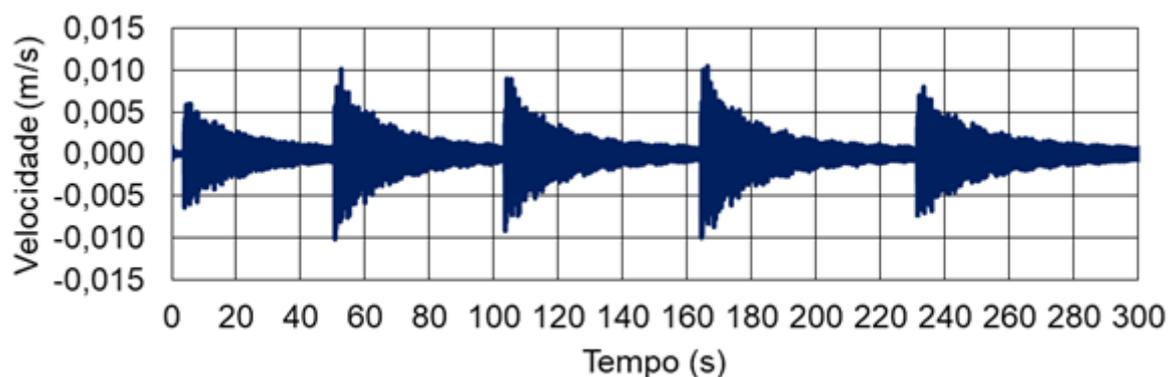


Figura 195 – Ensaio 1: velocidade no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z]

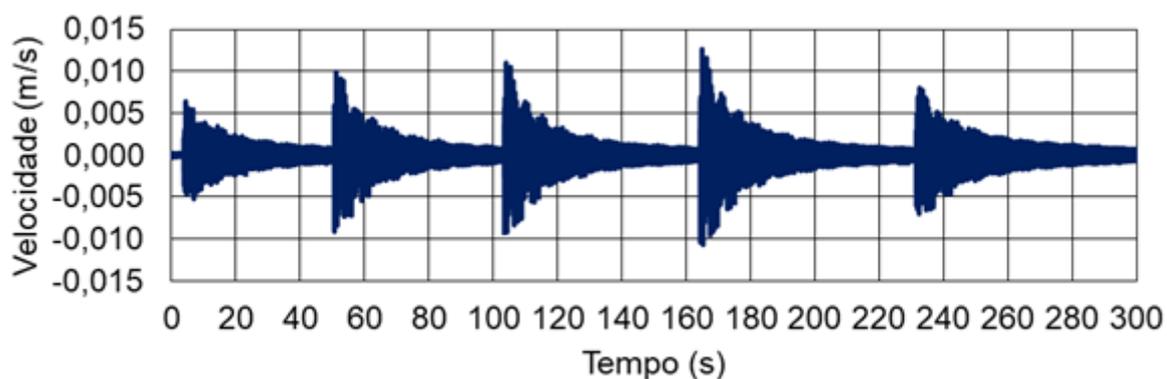


Figura 196 – Ensaio 1: velocidade no domínio do tempo [h = 120 cm. Eixo Z]

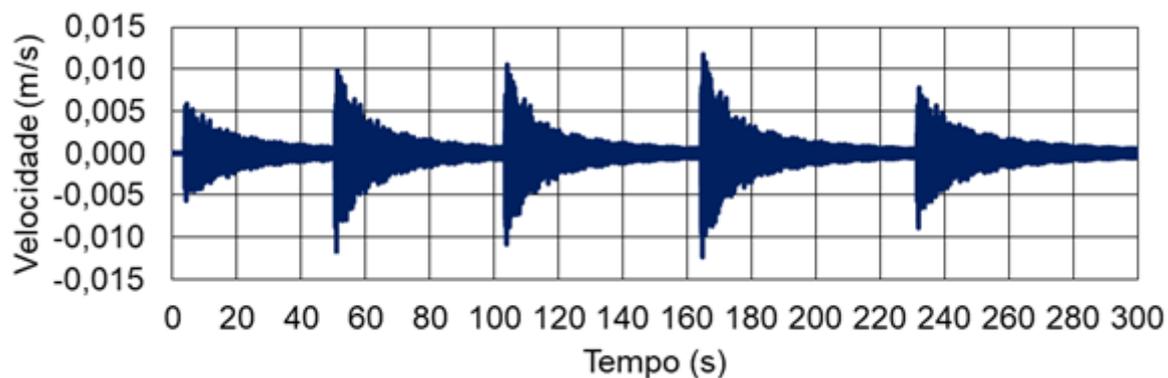


Figura 197 – Ensaio 1: velocidade no domínio do tempo [h = 90 cm. Eixo Z]

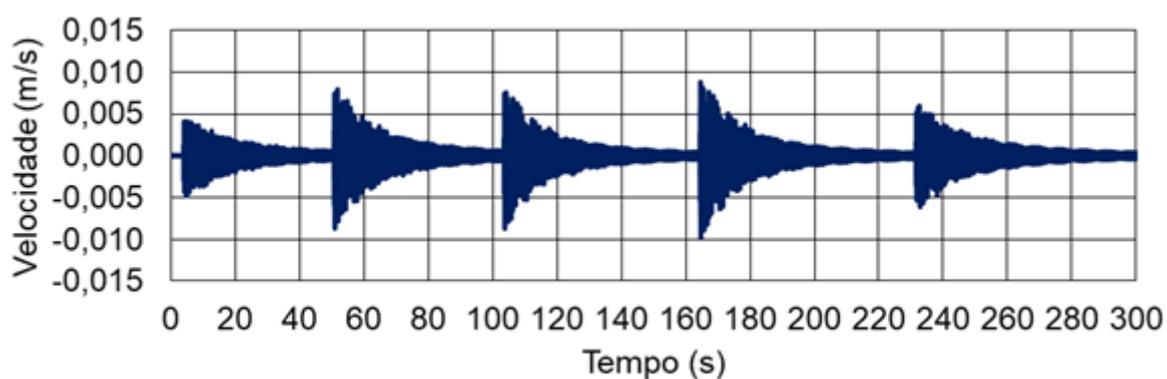


Figura 198 – Ensaio 1: velocidade no domínio do tempo [h = 60 cm. Eixo Z]

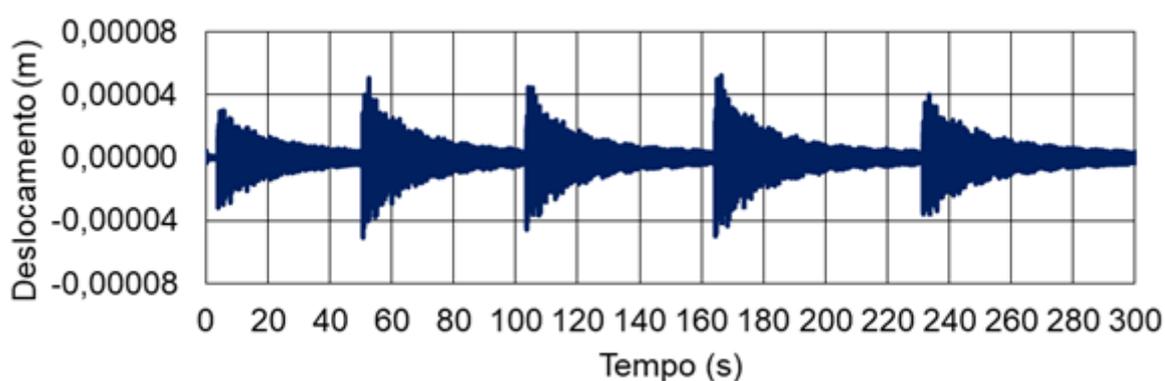


Figura 199 – Ensaio 1: deslocamento no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z]

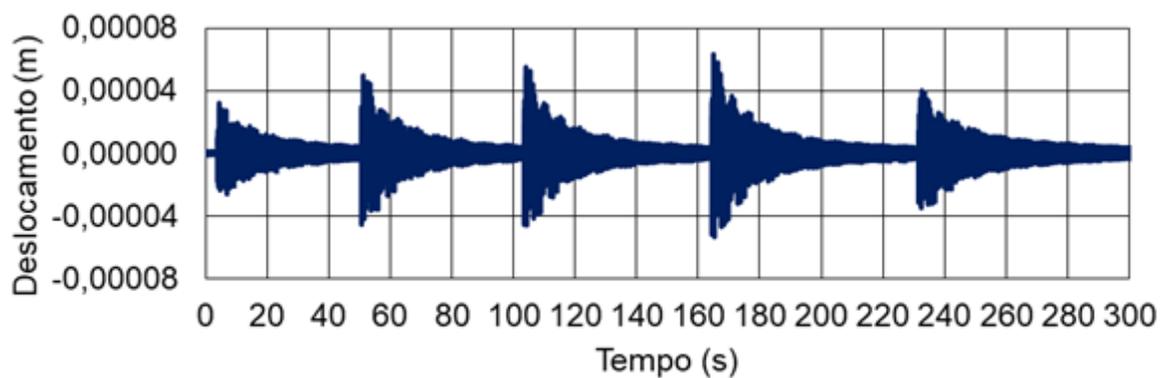


Figura 200 – Ensaio 1: deslocamento no domínio do tempo [h = 120 cm. Eixo Z]

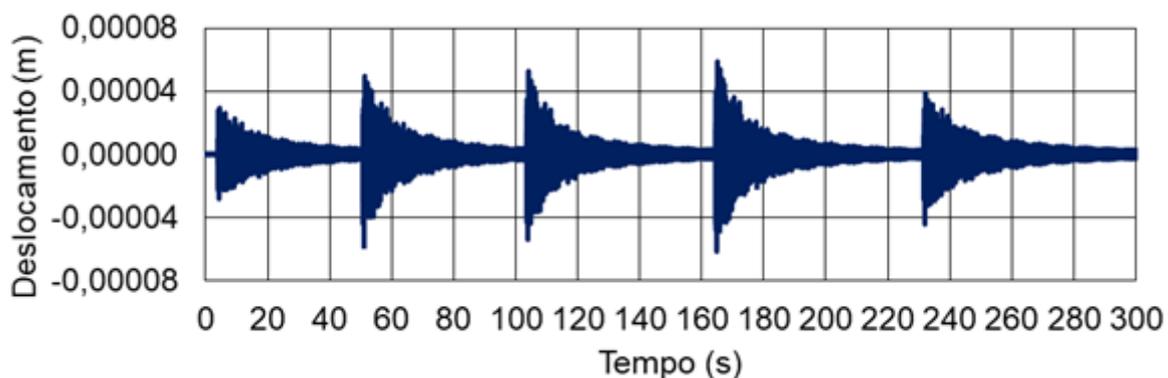


Figura 201 – Ensaio 1: Ensaio 1: deslocamento no domínio do tempo [h = 90 cm. Eixo Z]

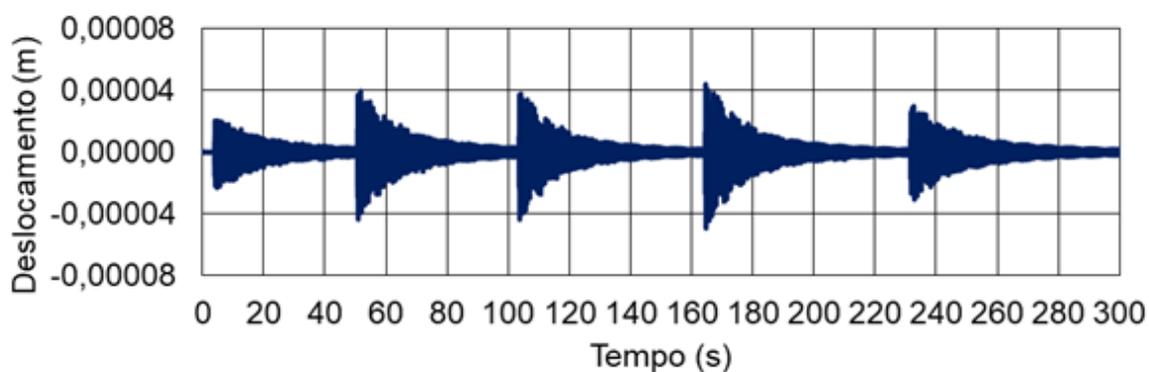


Figura 202 – Ensaio 1: Ensaio 1: deslocamento no domínio do tempo [h = 60 cm. Eixo Z]

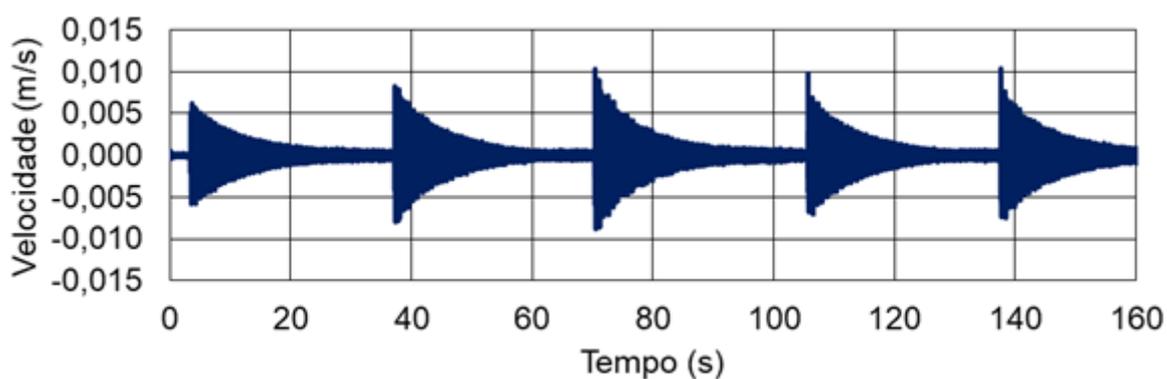


Figura 203 – Ensaio 1: velocidade no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X]

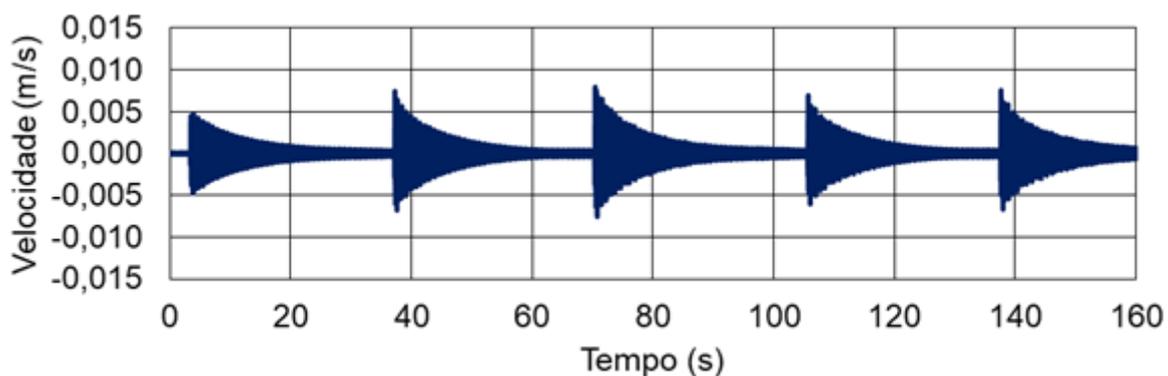


Figura 204 – Ensaio 1: velocidade no domínio do tempo [h = 120 cm. Eixo X]

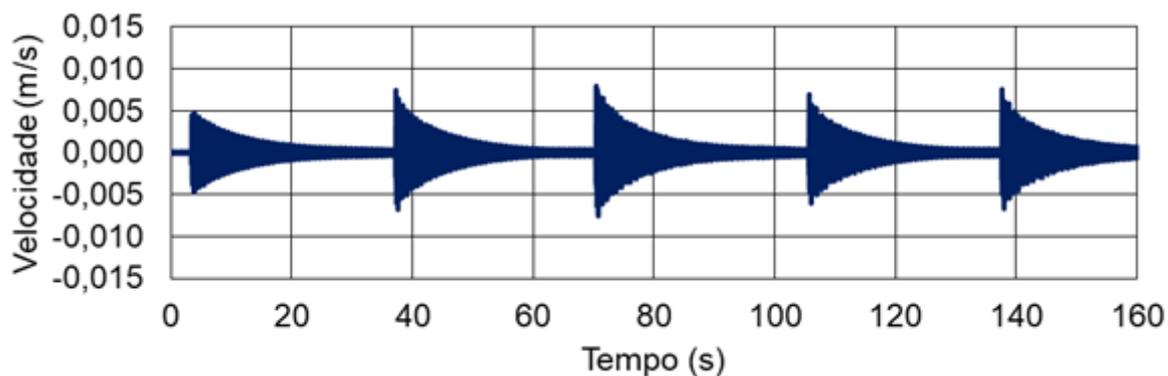


Figura 205 – Ensaio 1: velocidade no domínio do tempo [h = 90 cm. Eixo X]

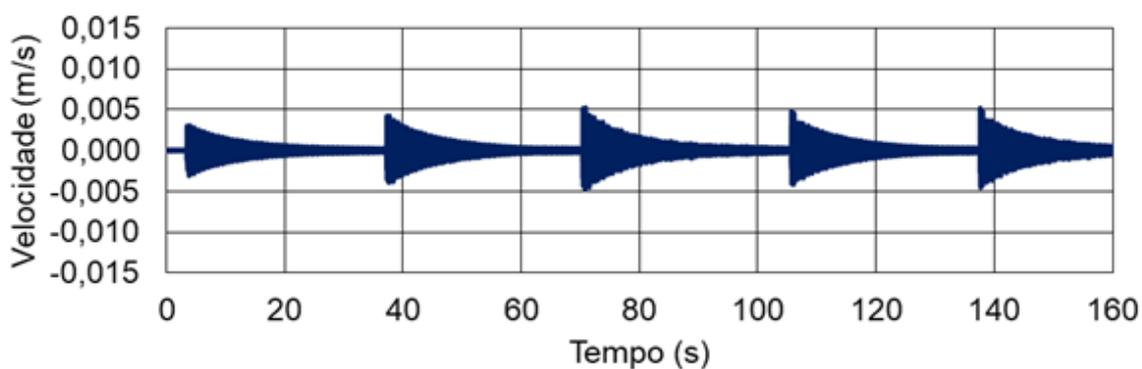


Figura 206 – Ensaio 1: velocidade no domínio do tempo [h = 60 cm. Eixo X]

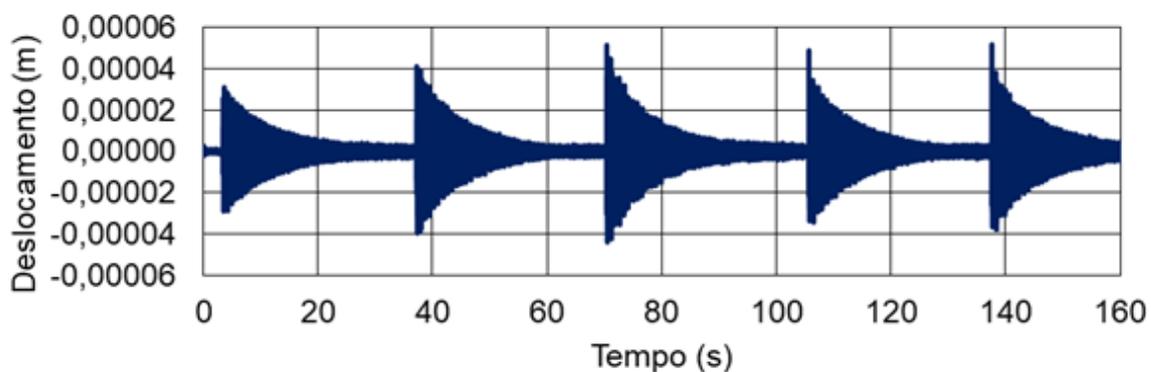


Figura 207 – Ensaio 1: deslocamento no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X]

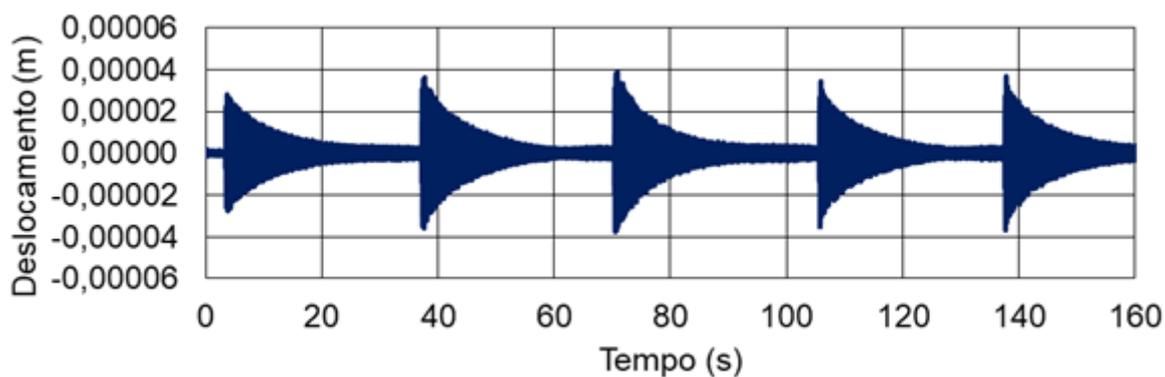


Figura 208 – Ensaio 1: deslocamento no domínio do tempo [h = 120 cm. Eixo X]

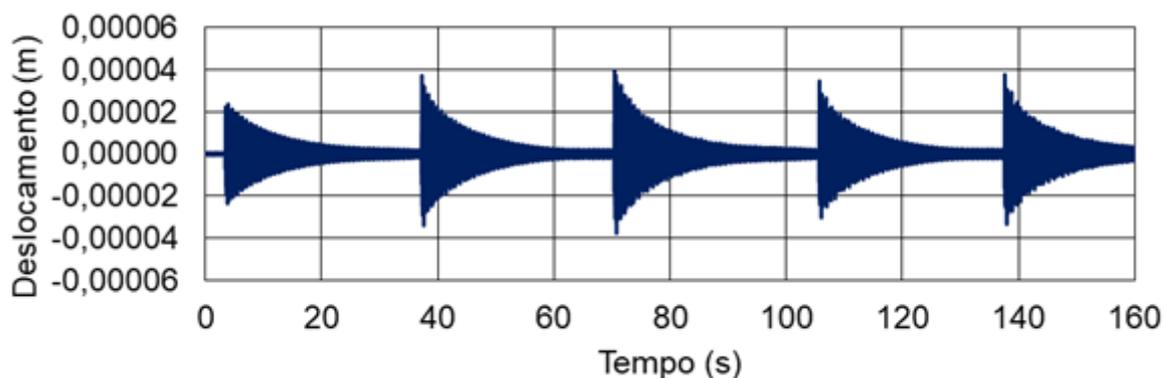


Figura 209 – Ensaio 1: deslocamento no domínio do tempo [h = 90 cm. Eixo X]

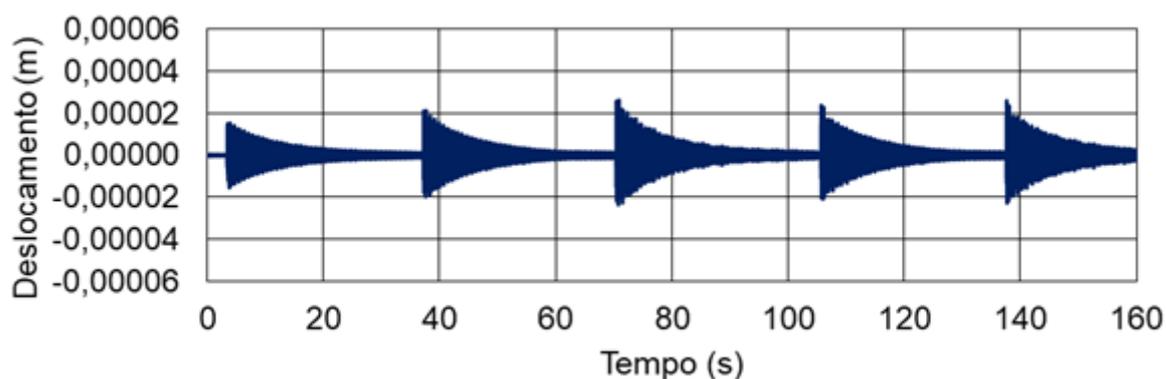


Figura 210 – Ensaio 1: deslocamento no domínio do tempo [h = 60 cm. Eixo X]

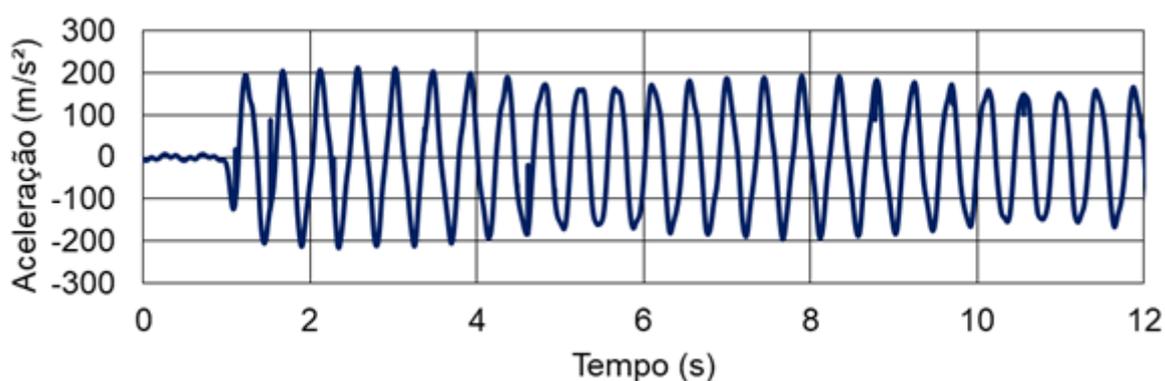


Figura 211 – Ensaio 2: aceleração no domínio do tempo [h = 147 cm. Eixo Z]

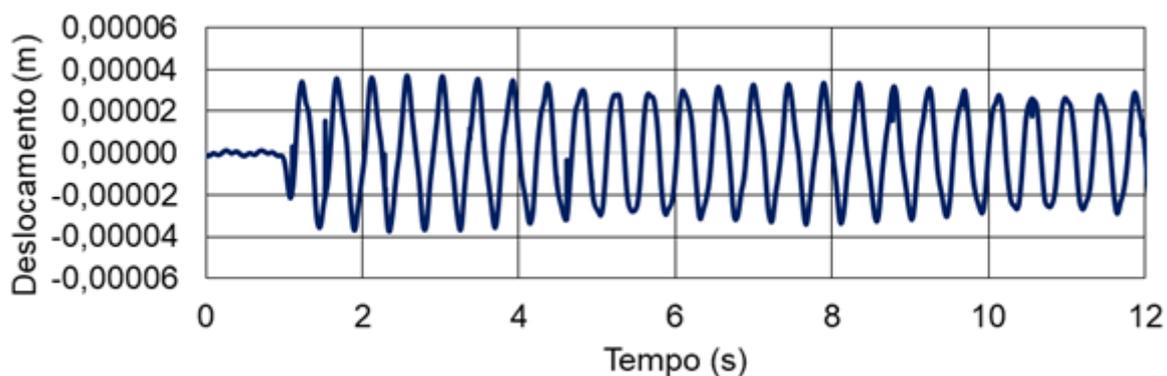


Figura 212 – Ensaio 2: deslocamento no domínio do tempo [h = 147 cm. Eixo Z]

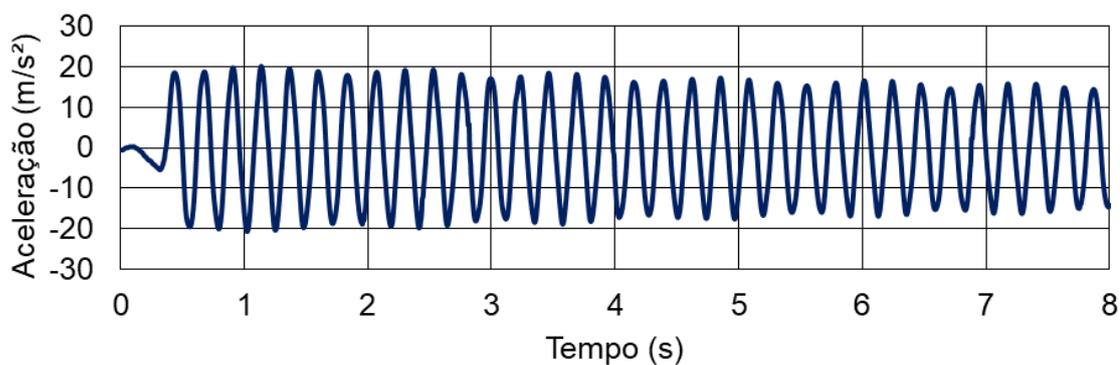


Figura 213 – Ensaio 2: aceleração no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X]

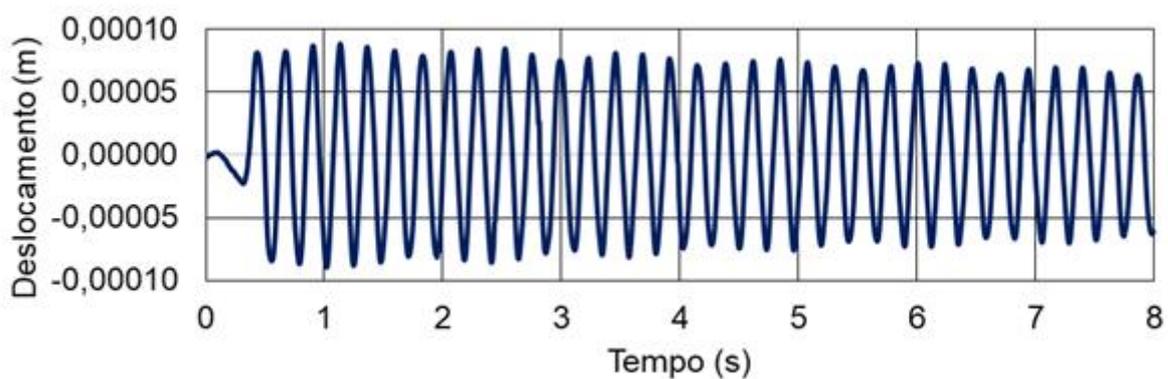


Figura 214 – Ensaio 2: deslocamento no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X]

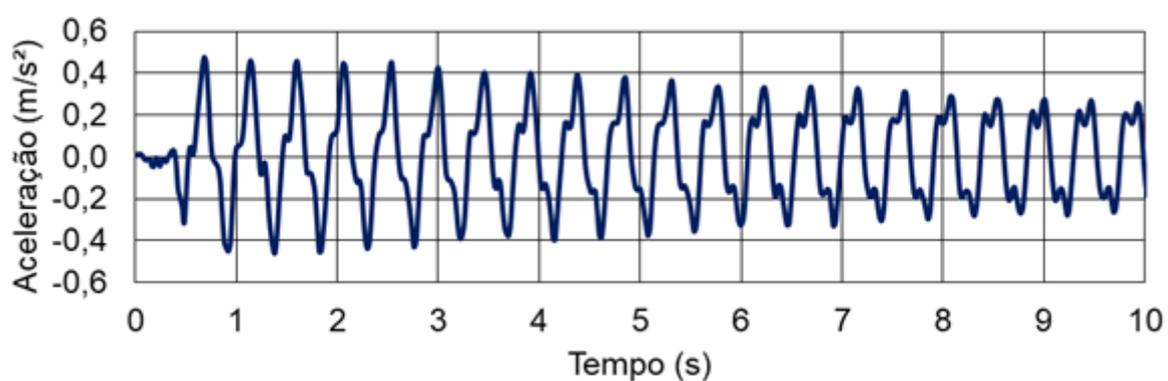


Figura 215 – Ensaio 3: aceleração no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z]

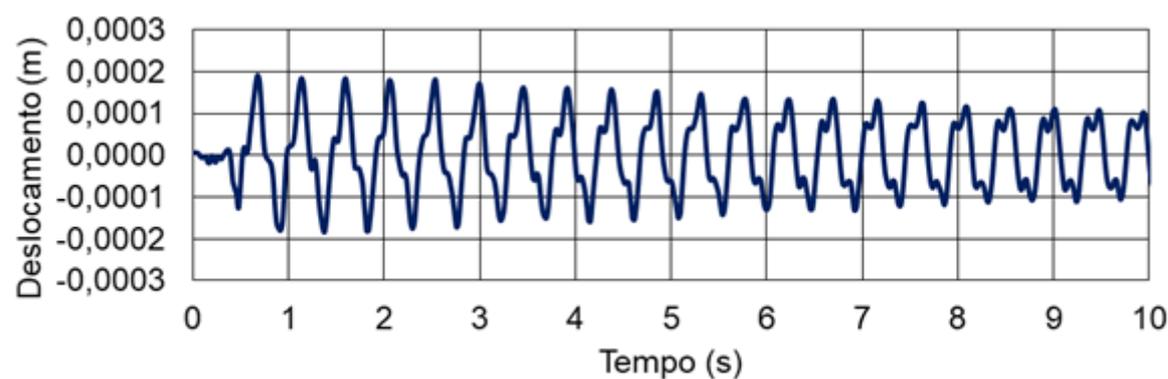


Figura 216 – Ensaio 3: deslocamento no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z]

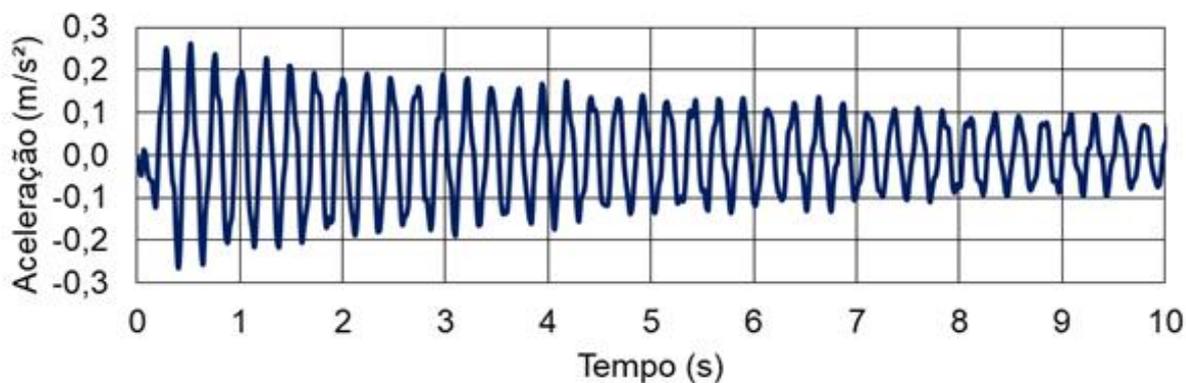


Figura 217 – Ensaio 3: aceleração no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X]

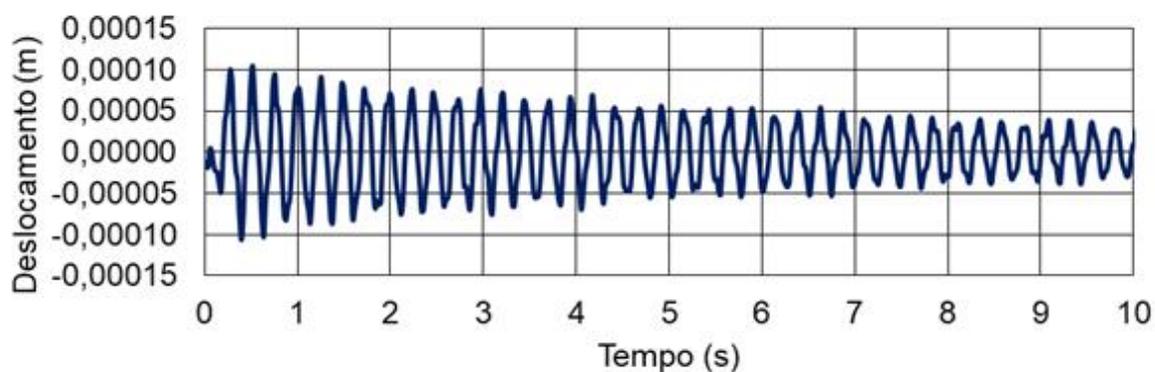


Figura 218 – Ensaio 3: deslocamento no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X]

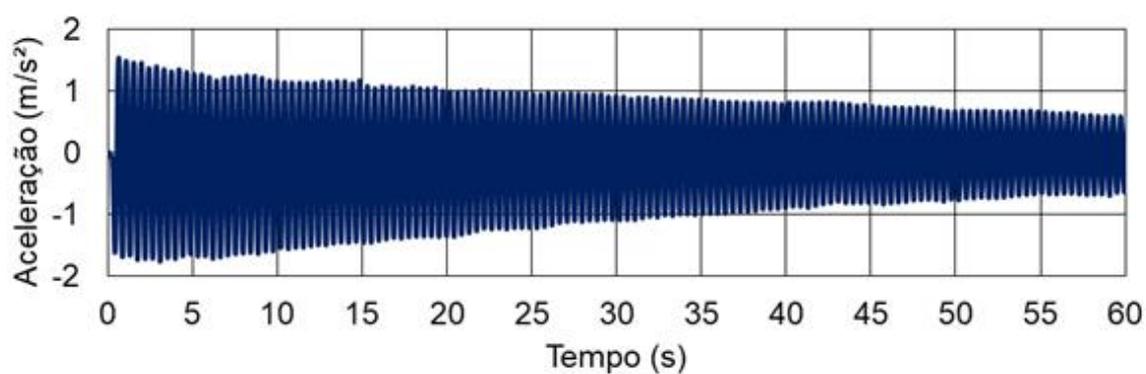


Figura 219 – Ensaio 4: aceleração no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z]

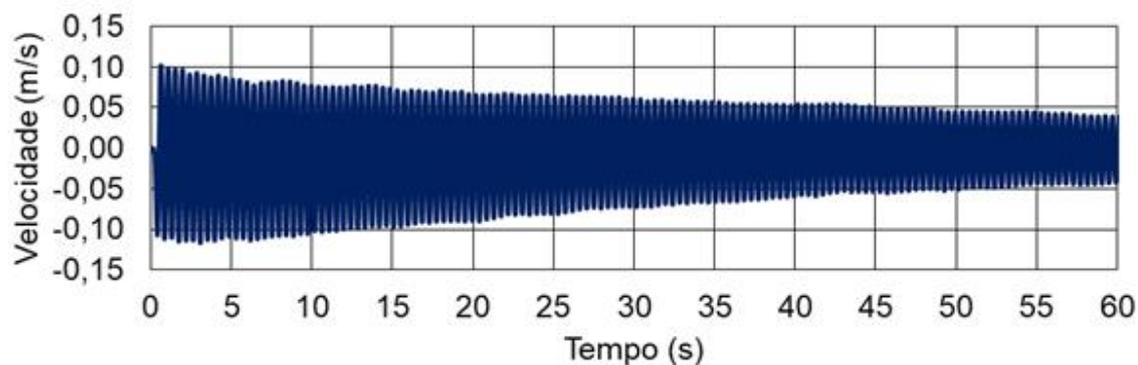


Figura 220 – Ensaio 4: velocidade no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z]

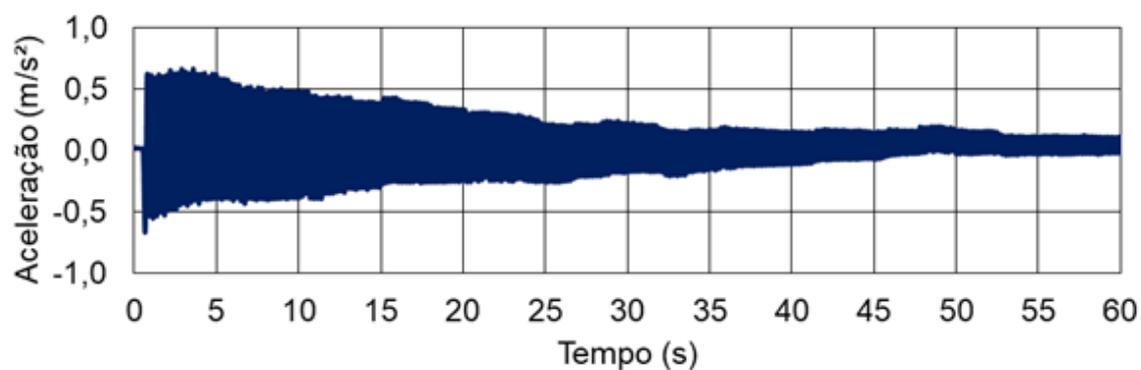


Figura 221 – Ensaio 4: aceleração no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X]

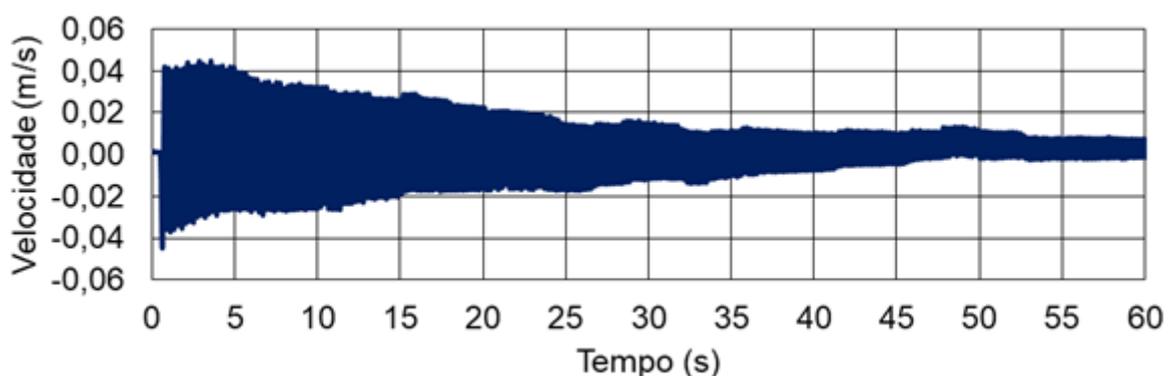


Figura 222 – Ensaio 4: velocidade no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X]

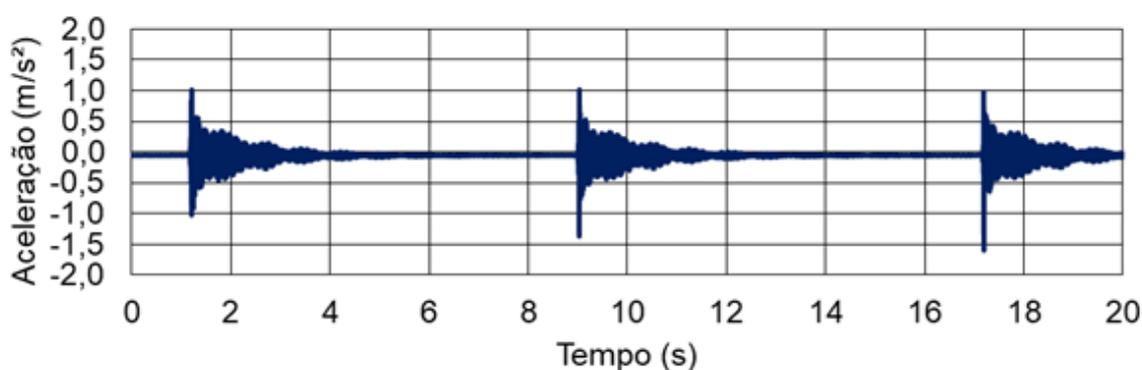


Figura 223. Ensaio 5: aceleração no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z]

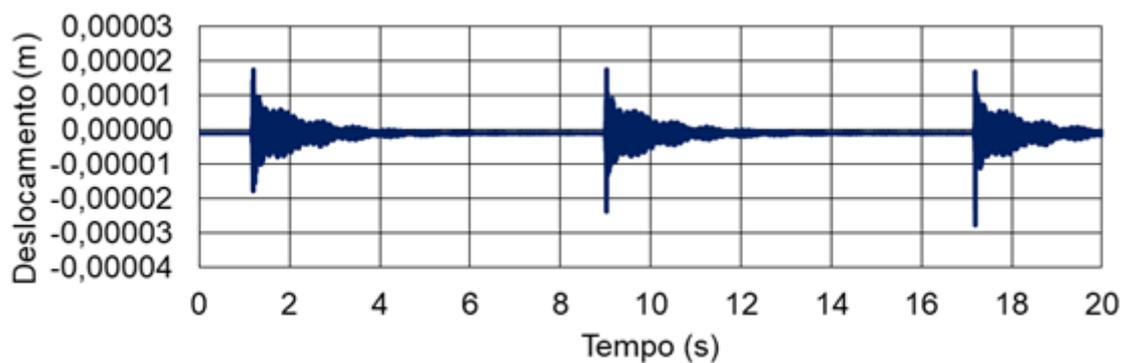


Figura 224 – Ensaio 5: deslocamento no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z]

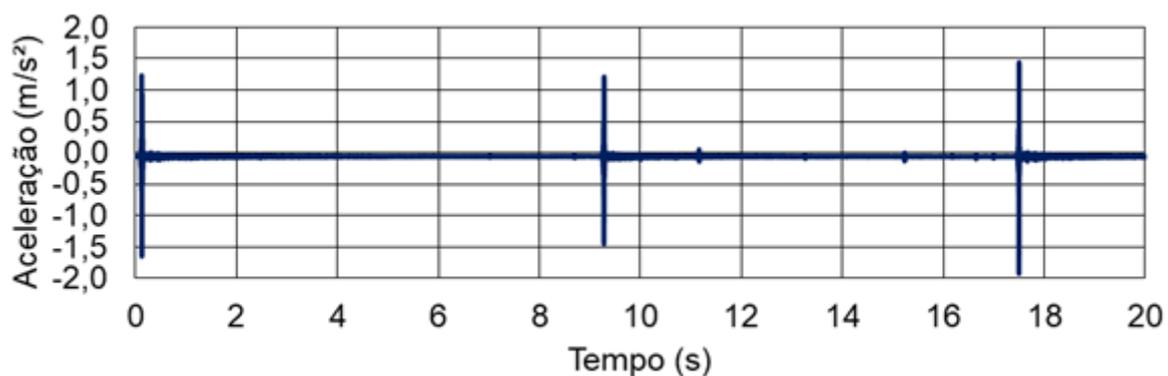


Figura 225. Ensaio 5: aceleração no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X]

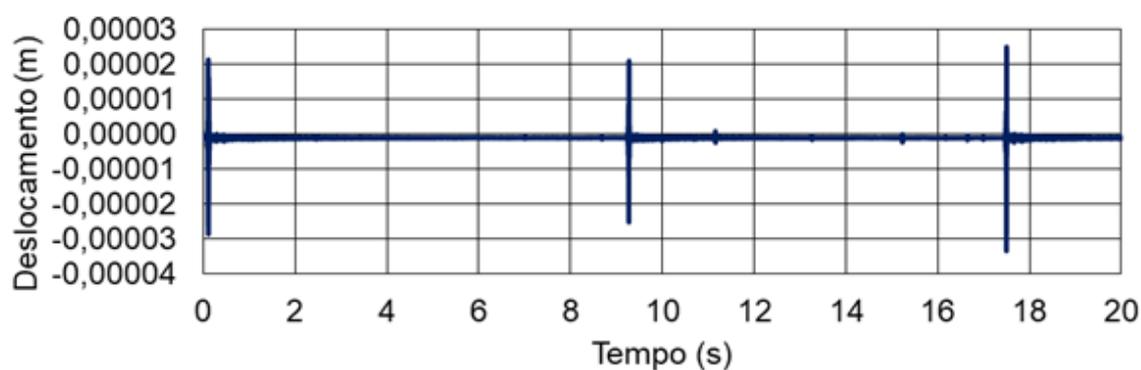


Figura 226 – Ensaio 5: deslocamento no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X]

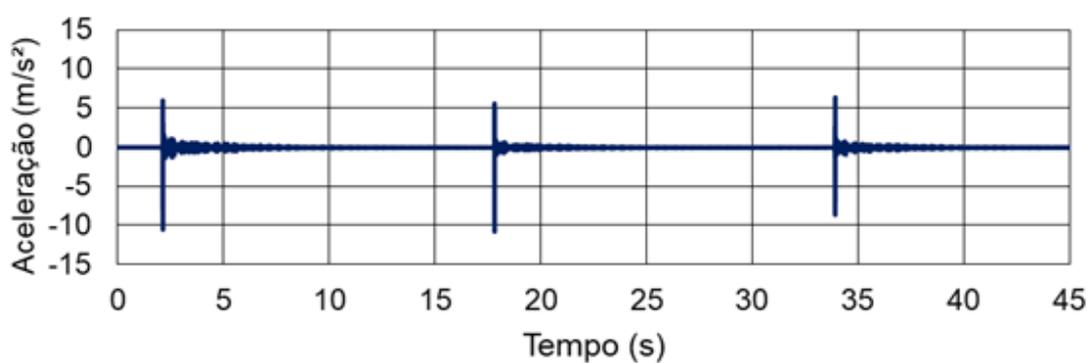


Figura 227. Ensaio 6: aceleração no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z]

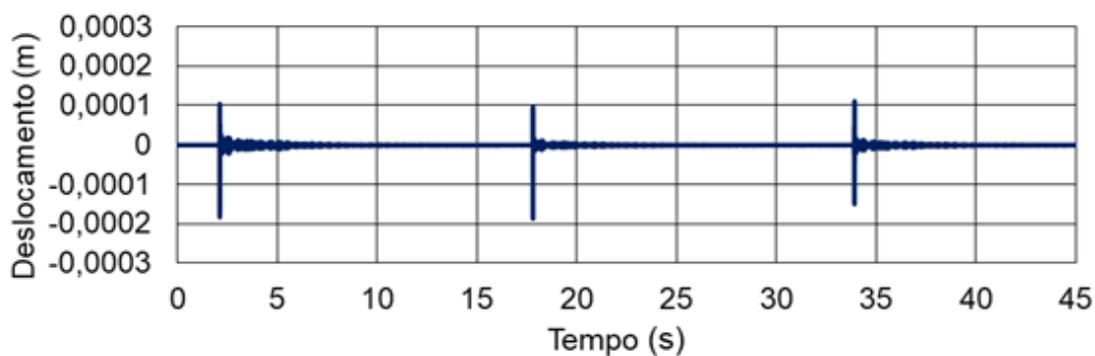


Figura 228 – Ensaio 6: deslocamento no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo Z]

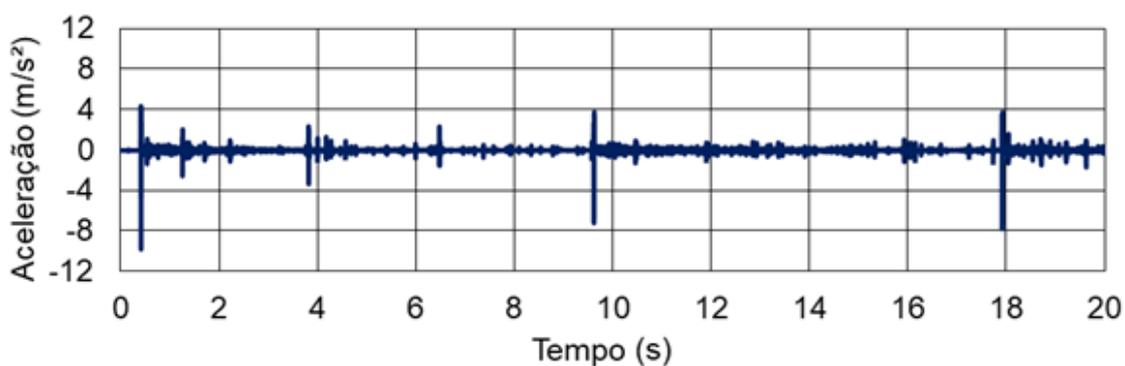


Figura 229. Ensaio 6: aceleração no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X]

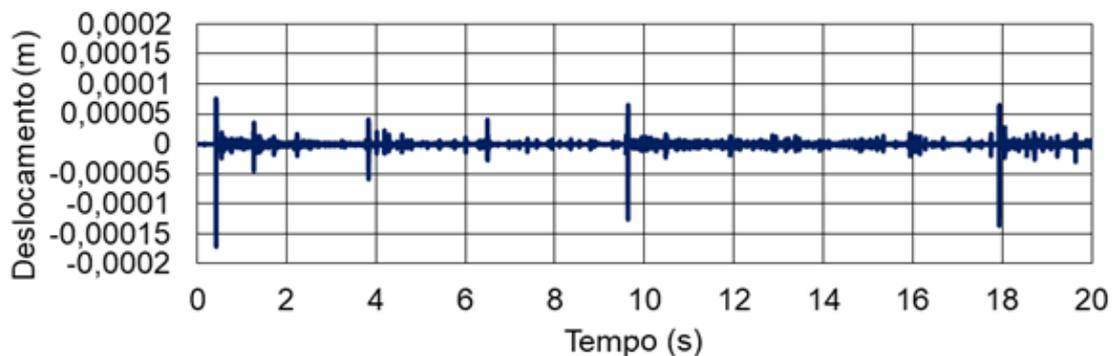


Figura 230 – Ensaio 6: deslocamento no domínio do tempo [h = 150 cm. Eixo X]

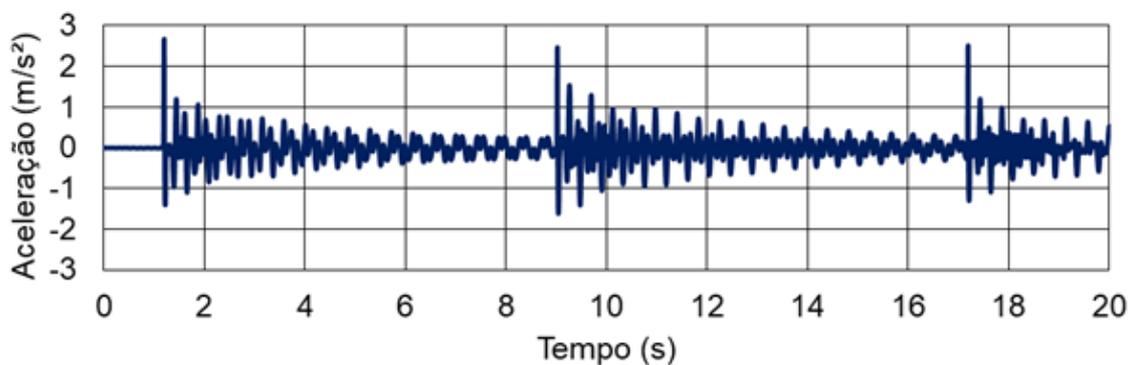


Figura 231. Aceleração no domínio do tempo (eixo Z)

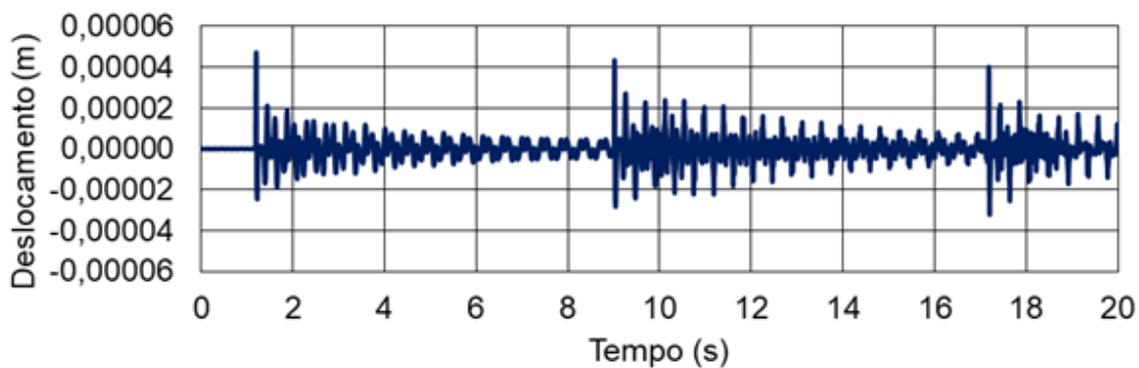


Figura 232. Deslocamento no domínio do tempo (eixo Z)

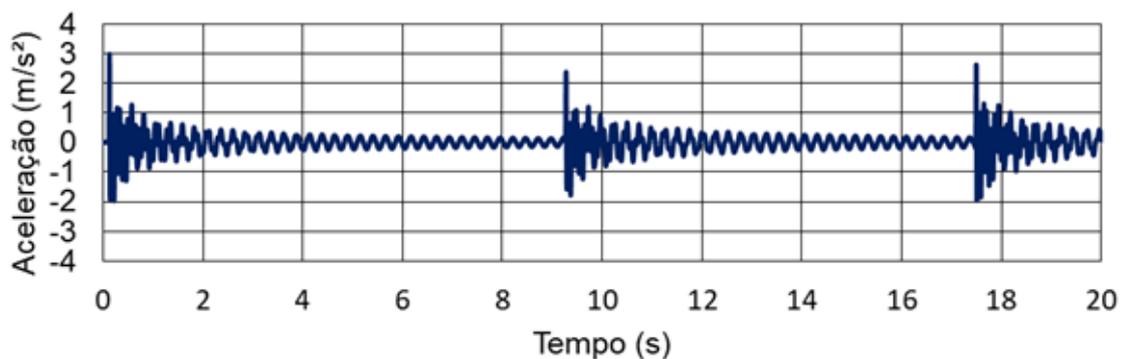


Figura 233. Aceleração no domínio do tempo (eixo X)

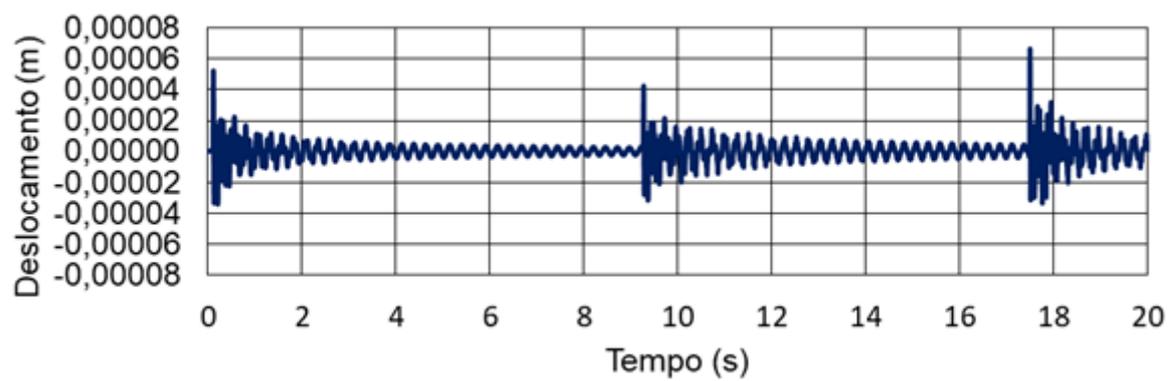


Figura 234. Deslocamento no domínio do tempo (eixo X)