

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

IAN BARRETO CAVALCANTE

**Desenvolvimento de sistema sem fio para monitorização de pontes
e viadutos**

Brasília, DF
2021

IAN BARRETO CAVALCANTE

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA SEM FIO
PARA MONITORIZAÇÃO DE PONTES E VIADUTOS**

Monografia de Projeto Final submetida ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Dr. Rodrigo de Melo Lameiras

Coorientador: Msc. Renan Rocha Ribeiro

Brasília, DF

2021

Autorizo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta monografia, por processos fotocopiadores e outros meios eletrônicos.

Cavalcante, Ian Barreto

Desenvolvimento de sistema sem fio para monitorização de pontes e viadutos / Ian Barreto Cavalcante, Brasília, 2021.

79 f.

Monografia de Projeto Final (Bacharel em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, 2021.

- | | |
|--|-----------------------|
| 1. Pontes | 2. Viadutos |
| 3. Avaliação da integridade estrutural | 4. Análise dinâmica |
| 5. Análise modal | 6. Baixo-Custo |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (Bacharel) |

IAN BARRETO CAVALCANTE

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA SEM FIO PARA MONITORIZAÇÃO
DE PONTES E VIADUTOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade de Brasília como
exigência para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

APROVADO POR:

Rodrigo de Melo Lameiras, Doutor (ENC - UNB)
(ORIENTADOR)

Renan Rocha Ribeiro, Mestre (ENC - UNB)
(COORIENTADOR)

Graciela Nora Doz de Carvalho, Doutor (ENC - UNB)
(EXAMINADORA INTERNA)

Luís Augusto Mendes Veloso, Doutor (ENM - UNB)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 21 de maio de 2021.

RESUMO

A monitorização de estruturas diz respeito a amostragem e a análise das características destas tanto no âmbito das análises visual, estática e dinâmica. Ainda que seja de suma importância para a avaliação da integridade estrutural, não se vê a aplicação e utilização ampla e rotineira da monitorização, sobretudo quando se trata do campo das vibrações e acelerações, que tem entre suas razões o elevado valor dos equipamentos e a falta de profissionais capacitados para operação e avaliação dos dados. Este exposto objetiva a construção e experimentação de aparatos de baixo custo e de código aberto para a avaliação de pontes e viadutos para a análise dinâmica, comparando os resultados destes com o de sistemas convencionais e de simulações numéricas, além de testá-los em uma estrutura flexível de parâmetros conhecidos a fim de validá-los. Assim, resultando sistemas de baixo custo e de vários nós que permitam a aferição das características dinâmicas de pontes e viadutos em diversos pontos das estruturas concomitantemente. O trabalho baseia-se nas seguintes etapas: (1) desenvolvimento de um sistema de nós isolados; (2) desenvolvimento de um sistema de nós cabeados; (3) desenvolvimento de um sistema comunicado por rádio frequência; (4) validação em uma laje flexível do sistema comunicado por rádio frequência; (5) monitorização preliminar de uma ponte metroviária com um sistema convencional; (6) monitorização final de uma ponte metroviária com o sistema de rádio frequência; (7) análise final dos dados do sistema convencional e do comunicado por rádio frequência pela comparação dos parâmetros estimados de modos de frequência natural de vibração obtidos pelos sistemas convencional e desenvolvido e pela modelagem através do tratamento das amostras.

Palavras-chave: Pontes; Viadutos; Avaliação da integridade estrutural; Análise dinâmica; Análise modal; Baixo-Custo

ABSTRACT

Development of a low-cost system for monitoring bridges and viaducts

The monitoring of structures concerns the sampling and the analysis of their characteristics in the scope of visual, static and dynamic analysis. Although it is really important for the assessment of structural integrity, the wide and routine application and use of monitoring is not observed, especially in the field of vibrations and accelerations, which may be explained by the high cost of equipment and the lack of trained professionals for data operation and evaluation. This work aims to build and test low-cost open-source devices for the evaluation of bridges and highways in dynamic analysis, comparing the results of these with that of conventional systems and numerical simulations, in addition to testing them in a flexible structure of parameters known to validate them. Thus, resulting in low-cost systems with several nodes that allow the measurement of the dynamic characteristics of bridges and viaducts at different points in the structures at the same time. The work is based on the following steps: (1) development of a system of isolated nodes; (2) development of a wired node system; (3) development of a radio frequency system; (4) validation by a flexible slab of a radio frequency system; (5) preliminary monitoring of a subway bridge with conventional system; (6) final monitoring of a subway bridge with radio frequency system; (7) final analysis of the data by comparing the estimated parameters of natural frequency modes of vibration obtained by the conventional and developed systems and by modeling through the treatment of the samples.

Keywords: Bridges, Highways; Structural health monitoring; Dynamic analysis; Modal analysis; Low-Cost

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Sistema shear-frame de três graus de liberdade.....	4
Figura 2.2 – Classificação de técnicas e objetivos de vigilância (FIB, 2003).....	8
Figura 2.3 - Metodologia para avaliação de pontes de concreto (Montoya et al., 2010).....	9
Figura 2.4 - Fluxograma de gerenciamento da OAE (NBR 9452:2019)	10
Figura 3.1 – Etapas de desenvolvimento e aprimoramento dos sistemas de monitorização proposto.....	12
Figura 3.2 - Esquematização dos sistemas	12
Figura 3.3 – Protótipo do sistema dos nós isolados	13
Figura 3.4 – Protótipo do sistema dos nós cabeados.....	15
Figura 3.5 – Protótipo do sistema de rádio frequência.....	16
Figura 3.6 – Detalhes da fixação dos acelerômetros	17
Figura 3.7 - Laje utilizada na validação do sistema (CARMONA et. al., 2017)	17
Figura 3.8 - Modos de vibração da laje (CARMONA et. al., 2017)	18
Figura 3.9 – Disposição e detalhes dos nós.....	19
Figura 3.10 – Problemática da dispersão de dados	20
Figura 3.11 – Ponte metroviária estudada.....	22
Figura 3.12 - Projeto da ponte metroviária (unidades em centímetros).....	23
Figura 3.13 – Alguns modos de vibração da ponte metroviária (RIBEIRO et. al., 2021; SOBRAL et al., 2020).....	24
Figura 3.14 – Arranjo dos acelerômetros no tabuleiro estudado (unidades em centímetros) ..	25
Figura 3.15 – Ensaio preliminar	25
Figura 3.16 – Ensaio final	26
Figura 3.17 – Estrutura do sinal amostrado pelo sistema convencional	26
Figura 4.1 - Histogramas do tempo entre registros de amostras consecutivas de aceleração ..	29
Figura 4.2 – Estrutura do sinal amostrado da laje à vibração ambiente pelo Sistema 3	31

Figura 4.3 – Resultado e modos identificados da laje à vibração ambiente pelo Sistema 3	32
Figura 4.4 – Estrutura do sinal amostrado da laje à vibração livre pelo Sistema 3, repetição #1	33
Figura 4.5 – Resultado e modos identificados da laje à vibração livre pelo Sistema 3, repetição #1	34
Figura 4.6 – Estrutura do sinal amostrado da laje à vibração livre pelo Sistema 3, repetição #2	36
Figura 4.7 – Resultados e modos identificados da laje à vibração livre pelo Sistema 3, repetição #2	36
Figura 4.8 – Estrutura do sinal amostrado à vibração ambiente pelo sistema convencional ...	37
Figura 4.9 – Resultados a análise SSI-UPC e os primeiros modos identificados à vibração ambiente pelo sistema convencional com os dados da passagem do metrô na outra plataforma	38
Figura 4.10 – Resultado e modos identificados à vibração ambiente pelo sistema convencional sem os dados da passagem do metrô na outra plataforma.....	39
Figura 4.11 – Estrutura do sinal amostrado à vibração livre pelo sistema convencional	40
Figura 4.12 – Resultados e os seis primeiros modos identificados à vibração livre pelo sistema convencional.....	41
Figura 4.13 – Estrutura do sinal amostrado à vibração ambiente pelo Sistema 3.....	43
Figura 4.14 – Resultados da análise SSI-UPC e modos identificados à vibração ambiente pelo Sistema 3 com os dados da passagem do metrô na outra plataforma	43
Figura 4.15 – Resultados da análise SSI - UPC e modos identificados à vibração ambiente pelo Sistema 3 sem os dados da passagem do metrô na outra plataforma.....	44
Figura 4.16 – Estrutura do sinal amostrado à vibração livre pelo Sistema 3, repetição #1	46
Figura 4.17 – Resultados e alguns modos identificados à vibração livre pelo Sistema 3, repetição #1	47
Figura 4.18 – Estrutura do sinal amostrado à vibração livre pelo Sistema 3, repetição #2	48
Figura 4.19 – Resultados e alguns modos identificados à vibração livre pelo Sistema 3, repetição #2.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Sumário da análise modal (adaptado de CHOPRA, 2012)	3
Tabela 2.2 – Variáveis monitoradas (OU E LI, 2010)	7
Tabela 2.3 – Catalogação de alguns estudos de caso sobre pontes	9
Tabela 2.4 – Requerimento dos sensores e especificações do sensor MPU6050	11
Tabela 3.1 – Descrição e especificação dos componentes utilizados na confecção dos sistemas	14
Tabela 3.2 – Os 32 primeiros modos de vibração, suas frequências e fatores de participação modal (FPM) de maior importância correspondentes (RIBEIRO et. al., 2021).....	24
Tabela 4.1 – Variação de frequências de amostragem para cada nó, por ensaio de vibração ambiente com o Sistema 3.....	28
Tabela 4.2 – Variação de frequências de amostragem para cada nó, por ensaio de vibração livre com o Sistema 3	28
Tabela 4.3 – Duração e frequência de amostragem dos ensaios realizados considerados	29
Tabela 4.4 – Todas as frequências dos modos de vibração à vibração ambiente obtidos pelo ensaio com o sistema convencional	39
Tabela 4.5 – Todas as frequências dos modos de vibração à vibração livre obtidos pelo ensaio com o sistema convencional.....	41
Tabela 4.6 – Todas as frequências dos modos de vibração à vibração ambiente obtidas pelo ensaio com o Sistema 3	44
Tabela 4.7 – Todas as frequências dos modos de vibração à vibração livre, repetição #1, obtidas pelo ensaio com o Sistema 3	47
Tabela 4.8 – Todas as frequências dos modos de vibração à vibração livre, repetição #1, obtidas pelo ensaio com o Sistema 3	50
Tabela 4.9 – Resultados gerais para os primeiros 32 modos de vibração	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>B&K</i>	Brüel & Kjær
<i>FIB</i>	Fédération Internationale du Béton
<i>FPM</i>	Fator de Participação Modal
<i>ISIS</i>	Intelligent Sensing for Innovative Structures
<i>LVDT</i>	Linear Variable Differential Transformer
<i>MDL</i>	Múltiplos Graus de Liberdade
<i>MEMS</i>	Micro-Electro-Mechanical Systems
<i>NBR</i>	Norma Brasileira Regulamentadora
<i>OAE</i>	Obra de Arte Especial
<i>PECC</i>	Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil
<i>RTC</i>	Real Time Clock
<i>RTD</i>	Resistance Temperature Detector
<i>RX</i>	Referência do fator de participação rotacional, eixo X
<i>RY</i>	Referência do fator de participação rotacional, eixo Y
<i>RZ</i>	Referência do fator de participação rotacional, eixo Z
<i>SAMCO</i>	Structural Assessment Monitoring and Control
<i>SD</i>	Security Disc
<i>SHM</i>	Structural Health Monitoring
<i>SSI</i>	Stochastic Subspace Identification
<i>TCXO</i>	Temperature-Compensated Crystal Oscillator
<i>UnB</i>	Universidade de Brasília
<i>UPC</i>	Unweighted Principal Component
<i>UX</i>	Referência do fator de participação translacional, eixo X

UY Referência do fator de participação translacional, eixo Y

UZ Referência do fator de participação translacional, eixo Z

LISTA DE SÍMBOLOS

bit	binary digit
bps	bytes per second
\mathbf{c}	matriz de amortecimento
c_i	amortecimento do elemento i
°C	graus Celsius
E	módulo de elasticidade
$\mathbf{f}_D(\mathbf{t})$	matriz de amortecimento
$f_{Di}(t)$	força devido ao amortecimento no elemento i
$\mathbf{f}_I(\mathbf{t})$	matriz de inércia
$f_{ii}(t)$	força devido à inércia no elemento i
$\mathbf{f}_{Si}(\mathbf{t})$	matriz de força elástica
$f_{Si}(t)$	força elástica no elemento i
g	força da gravidade
Hz	hertz
I	momento de inércia
kg	quilogramas
m	metro
\mathbf{m}	matriz de massa
m_i	massa do elemento i
N	newtons
n	número de graus de liberdade
\mathbf{k}	matriz de rigidez
k_i	rigidez do elemento i
$\mathbf{p}(\mathbf{t})$	matriz das forças externas

$p_i(t)$	força externa aplicada no elemento i
T_n	período natural de vibração
\mathbf{u}	matriz dos deslocamentos
u_i	deslocamento do elemento i
$\dot{\mathbf{u}}$	matriz das velocidades
\dot{u}_i	velocidade do elemento i
$\ddot{\mathbf{u}}$	matriz das acelerações
\ddot{u}_i	aceleração do elemento i
V	volts
θ	ângulo de fase
$\boldsymbol{\phi}$	matriz dos modos de vibração
ω	frequência angular natural
$\boldsymbol{\omega}$	vetor de frequências angulares naturais

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVO	1
1.1.1. Objetivo geral.....	1
1.1.2. Objetivos específicos	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1. DINÂMICA DAS ESTRUTURAS: ANÁLISE MODAL	3
2.1.1. Sistemas de múltiplos graus de liberdade (MDL).....	3
2.1.2. Frequência natural e modos de vibração.....	5
2.2. MONITORIZAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL.....	7
2.3. PLATAFORMAS DE PROTOTIPAGEM ELETRÔNICA DE CÓDIGO ABERTO DE BAIXO CUSTO.....	11
3. METODOLOGIA	12
3.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	12
3.2. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA 1: NÓS ISOLADOS	13
3.3. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA 2: NÓS CABEADOS	15
3.4. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA 3: RÁDIO FREQUÊNCIA.....	16
3.5. VALIDAÇÃO DO SISTEMA 3 EM UMA LAJE FLEXÍVEL.....	17
3.5.1. Apresentação da laje	17
3.5.2. Ensaios	18
3.5.3. Análise dos dados amostrados	19
3.5.3.1. Pré-tratamento dos dados	20
3.5.3.2. Processamento dos dados	21
3.6. ESTUDO DE CASO DA PONTE METROVIÁRIA.....	21
3.6.1. Apresentação da ponte metroviária.....	21
3.6.2. Ensaios	24
3.6.3. Tratamento dos dados	26
4. RESULTADOS.....	28
4.1. Análise geral da estabilidade de amostragem do sistema.....	28
4.2. LAJE FLEXÍVEL.....	30
4.2.1. Ensaio de vibração ambiente	30
4.2.2. Ensaios de vibração livre	32
4.2.2.1. Repetição #1	32
4.2.2.2. Repetição #2	35
4.3. ENSAIO PRELIMINAR	37
4.3.1. Ensaio de vibração ambiente	37

4.3.2. Ensaio de vibração livre	39
4.4. ENSAIO FINAL.....	41
4.4.1. Ensaio de vibração ambiente	41
4.4.2. Ensaio de vibração livre	44
4.4.2.1. Repetição #1	44
4.4.2.2. Repetição #2.....	47
4.4.3. Resultados gerais	50
5. CONCLUSÃO	52
6. REFERÊNCIAS.....	53
ANEXO A – CÓDIGO DO NÓ MESTRE	58
ANEXO B – CÓDIGO DO NÓ COM ACELERÔMETRO.....	60

1. INTRODUÇÃO

A Avaliação da Integridade Estrutural (*Structural Health Monitoring – SHM*) diz respeito a um conjunto de técnicas e de métodos que visa a aferição das características de uma estrutura tanto quanto ao caráter dinâmico como ao estático. Sensores de corrosão (OU E LI, 2010), aferição de deslocamento através de câmeras (FENG E FENG, 2017) e aparatos que aferem aceleração, deformação, temperatura e tensão (MONTROYA *et al.*, 2010), entre outros, cobrem uma vasta quantidade de parâmetros passíveis de averiguação em ensaios de *SHM*.

Essas técnicas são incrementadas quando, a partir de seus dados, é possível permear questões como localização e prevenção de patologias, principalmente pelo métodos baseados em redes neurais artificiais, conforme se observa em Nunes (2019). Os maiores patamares dessa tecnologia são os idealizados por Inman (MAIO, 2011, apud INMAN, 2001), que tratam da sinergia de estruturas inteligentes com a tecnologia de controles de vibrações em estruturas.

Normatizações, guias e trabalhos fomentam a área em questão, propondo especificações mínimas dos equipamentos para SHM (CUNHA *et al.*, (2012); MOREU *et al.* (2018)), práticas e breves rotinas (ISIS Canada (2001); AKTAN *et al.* (2002)) e a aplicação de normatizações em estruturas (YANG *et al.*, 2017).

O *SHM* ganha importância prática em análises de engenharia sísmica ou de colapso de estruturas de idade próxima ou superior à vida útil de projeto (OLIVEIRA *et al.* (2016); SPENCER JR. *et al.* (2018); (OU E LI, 2010)).

Testes dinâmicos em larga escala geram importantes informações sobre o comportamento e a performance de estruturas (SALAWU e WILLIAMS, 1993). A aplicação de testes contínuos é realidade ao se acoplar à estrutura sistemas energeticamente autossuficientes ou alimentados por rede elétrica, de modo a se configurar sinais de alerta para parâmetros que fogem às características de segurança (CUNHA *et al.*, 2018).

Atualmente, dada a grande quantidade de estruturas que carecem de monitorização e os custos relativamente altos de um sistema convencional, que por ventura dificultam e até mesmo inviabilizam a instalação desses aparelhos em larga escala, as plataformas de baixo custo e de código aberto ganham interesse, espaço e aplicação.

Assim, o desenvolvimento, validação e disseminação de um aparato de baixo custo e que possa alimentar um banco de dados de forma remota e contínua configura uma temática de grande interesse tanto comercial quanto tecnológico.

1.1. OBJETIVO

1.1.1. Objetivo geral

Desenvolver um sistema de baixo custo sem fio baseado em plataformas de baixo custo e de código aberto para a monitorização de pontes e viadutos sob o ponto de vista da análise dinâmica dos modos de vibração e das frequências naturais.

1.1.2. Objetivos específicos

- Desenvolver três sistemas para monitorização de estruturas com diferentes tipos de conexão entre os seus sensores: (i) nós isolados; (ii) nós conectados por cabo; e (iii) nós conectados por rádio frequência;

- Validar o sistema de rádio frequência desenvolvido em um modelo estrutural com parâmetros e características dinâmicas conhecidas;
- Monitorar uma ponte metroviária submetida às vibrações ambiente e livre após passagem de trens com o sistema de rádio frequência proposto, validando suas informações por comparação com respostas amostradas por um sistema convencional e por comparações com modelos numéricos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. DINÂMICA DAS ESTRUTURAS: ANÁLISE MODAL

A área da Dinâmica das Estruturas aborda os sistemas estruturais quando sujeitos a alguma particularidade que varia no tempo, sejam os carregamentos quanto à direção, à magnitude, ao sentido de aplicação e outros, sejam as respostas estruturais em termos de tensões, deflexões, deslocamentos, etc. (CLOUGH, 2003).

Nesse sentido, Beards (2003) traz a importância da abordagem dinâmica no campo das vibrações por tal tratar de respostas e características oscilatórias que, por além de poder originar movimentos e ruídos indesejáveis, por ventura gerem tensões dinâmicas que ocorram em fadiga ou na falha da estrutura.

Chopra (2012) apresenta uma rotina para a aplicação da análise modal de sistemas de múltiplos graus de liberdade (MDL), apresentada na Tabela 2.1 e que guiará este trabalho. Ressalta-se que, conforme dita Jimin e Zhi-Fang (2001), a análise modal é o processo a partir do qual se obtém as características dinâmicas de um sistema em termos de frequência natural, coeficientes de amortecimento e formas modais que alimentam modelos matemáticos.

Tabela 2.1 - Sumário da análise modal (adaptado de CHOPRA, 2012)

Etapa	Atividade
1	Definir as propriedades estruturais (Seção: 2.1.1)
a-	Determinar as matrizes de massa e de rigidez
b-	Estimar os coeficientes de amortecimento modal
2	Determinar as frequências naturais e os modos de vibração (Seção 2.1.2)
3	Computar as respostas para cada modo
a-	Resolver a coordenada modal
b-	Computar os deslocamentos nodais
c-	Computar os elementos de força associados aos deslocamentos nodais
4	Combinar as contribuições de todos os modos para determinar a resposta total

2.1.1. Sistemas de múltiplos graus de liberdade (MDL)

Para se entender o comportamento de um sistema de múltiplos graus de liberdade, é interessante se iniciar a partir de uma abordagem simples e se definir as equações de movimento de sistema genérico.

Adota-se, para tal, o sistema de três graus de liberdade da Figura 2.1 (a), do qual se representou os parâmetros de massa (m_i), de rigidez das colunas (k_i), de amortecimento (c_i) e de excitação por uma força externa ($p_i(t)$) para cada pavimento i que varia ao longo do tempo t . Vê-se os graus de liberdade de cada elemento horizontal (u_1, u_2 e u_3) e, na Figura 2.1 (b), seus deslocamentos. Já a Figura 2.1 (c) apresenta o equilíbrio de forças presente em cada pavimento onde, para a análise a seguir, as massas de cada viga foram consideradas concentradas em um único ponto, assim como esquematizado na Figura 2.1 (c).

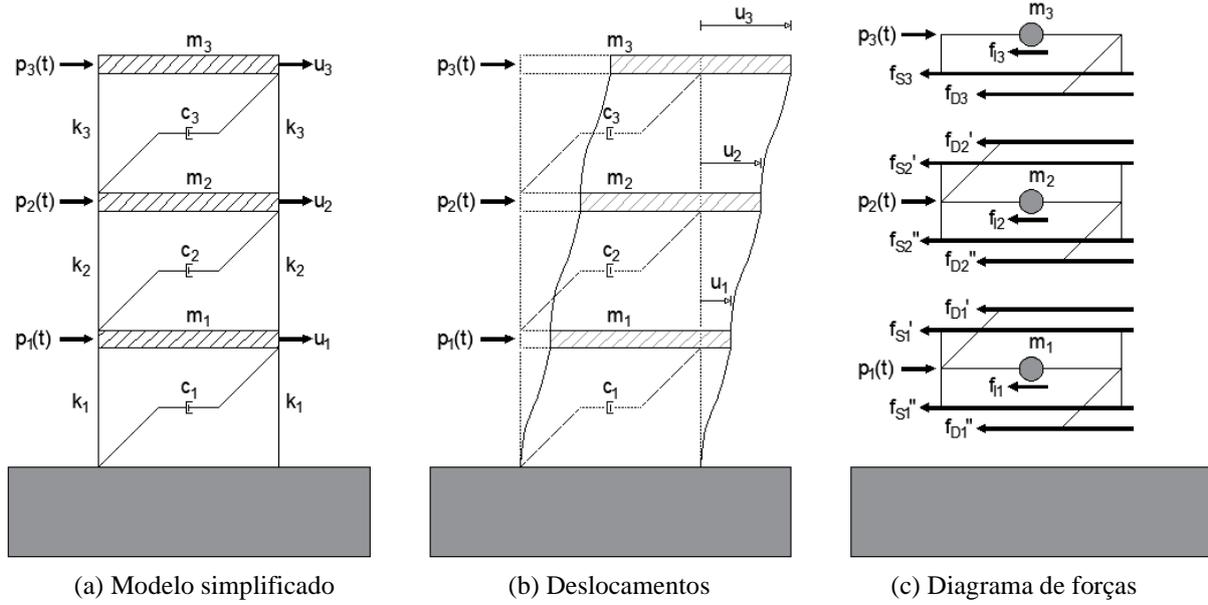


Figura 2.1 – Sistema shear-frame de três graus de liberdade

Pela Segunda Lei de Newton, é possível determinar a partir da Figura 2.1 (c) a equação de movimento geral trabalhada na área da dinâmica, Equação 1.

$$f_{ii}(t) + f_{Di}(t) + f_{Si}(t) = p_i(t) \quad (1)$$

Onde f_{ii} é a contribuição da inércia referente a cada massa discretizada do sistema, $f_{Di}(t)$ a referente ao amortecimento, $f_{Si}(t)$ a que diz respeito à força elástica.

Da Equação 2 tem-se a definição de f_{ii} , em que m_i é a massa e $\ddot{u}_i(t)$ a aceleração do elemento i . o termo $\ddot{u}_i(t)$ será representado apenas por \ddot{u}_i , deixando-se implícita sua variação ao longo do tempo.

$$f_{ii} = m_i \ddot{u}_i \quad (2)$$

Da Equação 3 tem-se a definição de f_{Di} , em que c_i é a constante de amortecimento e $\dot{u}_i(t)$ a velocidade do elemento i , o termo $\dot{u}_i(t)$ será representado apenas por \dot{u}_i , deixando-se implícita sua variação ao longo do tempo.

$$f_{Di}(t) = c_i \dot{u}_i \quad (3)$$

Da Equação 4 tem-se a definição de f_{Si} , em que k_i é a soma dos parâmetros de rigidez de todas as colunas e $u_i(t)$ o deslocamento do elemento i , o termo $u_i(t)$ será representado apenas por u_i , deixando-se implícita sua variação ao longo do tempo.

$$f_{Si}(t) = k_i u_i \quad (4)$$

Para o *shear frame* apresentado na Figura 2.1, tem-se a relação de equações de equilíbrio presente na Equação 5 e desenvolvidas na Equação 6 para cada pavimento.

$$\begin{cases} f_{I1}(t) + [f_{D1}'(t) + f_{D1}''(t)] + [f_{S1}'(t) + f_{S1}''(t)] = p_1(t) \\ f_{I2}(t) + [f_{D2}'(t) + f_{D2}''(t)] + [f_{S2}'(t) + f_{S2}''(t)] = p_2(t) \\ f_{I3}(t) + f_{D3}(t) + f_{S3}(t) = p_3(t) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} m_1\ddot{u}_1 + [c_2(\dot{u}_1 - \dot{u}_2) + c_1\dot{u}_1] + [k_1u_1 + k_2(u_1 - u_2)] = p_1(t) \\ m_2\ddot{u}_2 + [c_3(\dot{u}_2 - \dot{u}_3) + c_2(\dot{u}_2 - \dot{u}_1)] + [k_2(u_2 - u_1) + k_3(u_2 - u_3)] = p_2(t) \\ m_3\ddot{u}_3 + c_3(\dot{u}_3 - \dot{u}_2) + k_3(u_3 - u_2) = p_3(t) \end{cases} \quad (6)$$

Tratando-se a Equação 6 de forma matricial, tem-se, para cada uma das quatro naturezas de forças que atuam no sistema, as Equações 7 a 10. Nestas, os parâmetros $\mathbf{f}_I(\mathbf{t})$, $\mathbf{f}_D(\mathbf{t})$, $\mathbf{f}_S(\mathbf{t})$, \mathbf{m} , \mathbf{c} , \mathbf{k} , $\mathbf{p}(\mathbf{t})$, \mathbf{u} , $\dot{\mathbf{u}}$ e $\ddot{\mathbf{u}}$ dizem respeito às respectivas matrizes de inércia, de amortecimento, de força elástica, de massa, de coeficientes de amortecimento, de rigidez das colunas, das forças externas, dos deslocamentos, das velocidades e das acelerações do sistema.

$$\mathbf{f}_I(\mathbf{t}) = \begin{Bmatrix} f_{I1}(t) \\ f_{I2}(t) \\ f_{I3}(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ \ddot{u}_3 \end{Bmatrix} = \mathbf{m}\ddot{\mathbf{u}} \quad (7)$$

$$\mathbf{f}_D(\mathbf{t}) = \begin{Bmatrix} f_{D1}(t) \\ f_{D2}(t) \\ f_{D3}(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 \\ 0 & -c_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \\ \dot{u}_3 \end{Bmatrix} = \mathbf{c}\dot{\mathbf{u}} \quad (8)$$

$$\mathbf{f}_S(\mathbf{t}) = \begin{Bmatrix} f_{S1}(t) \\ f_{S2}(t) \\ f_{S3}(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \mathbf{k}\mathbf{u} \quad (9)$$

$$\begin{Bmatrix} p_1(t) \\ p_2(t) \\ p_3(t) \end{Bmatrix} = \mathbf{p}(t) \quad (10)$$

Substituindo-se as Equações 7 a 10 na Equação 1, tem-se a equação geral para análise de sistemas de múltiplos graus de liberdade, onde se tem, para um caso genérico de n graus de liberdade, n equações que podem ser tratadas como na Equação 6 ou de forma matricial conforme apresenta a Equação 11.

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{c}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{k}\mathbf{u} = \mathbf{p}(t) \quad (11)$$

Para se obter os valores específicos que preenchem as matrizes \mathbf{m} , \mathbf{c} e \mathbf{k} , dispõe-se de diversos métodos, alguns dos quais são, respectivamente para cada matriz citada: a consideração das massas concentradas; as séries de Caughey; e o método da rigidez direta.

2.1.2. Frequência natural e modos de vibração

Partindo-se da análise também trabalhada por Clough (2003) de um sistema não amortecido sujeito à vibração livre, tem-se a seguinte adaptação da Equação 11 para a situação em questão:

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{k}\mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (12)$$

Assim, tal problemática se resume a aferir as condições em que a Equação 12 é verdadeira. Adotando-se um padrão harmônico de movimentação conforme a Equação 13, onde $\boldsymbol{\phi}$ é uma matriz que contém os modos de vibração que se alteram somente quanto à amplitude ao longo do tempo, θ é o ângulo de fase, ω a frequência natural dada em radianos por segundo,

segue a análise para a obtenção das frequências naturais. A Equação 14 apresenta a segunda derivada da Equação 13, ou seja, a aceleração.

$$\mathbf{u} = \boldsymbol{\phi} \text{sen}(\omega t + \theta) \quad (13)$$

$$\ddot{\mathbf{u}} = -\omega^2 \boldsymbol{\phi} \text{sen}(\omega t + \theta) = -\omega^2 \mathbf{u} \quad (14)$$

Assim, substituindo-se as Equações 13 e 14 na Equação 12, tem-se o seguinte problema de autovalores:

$$-\mathbf{m}\omega^2 \boldsymbol{\phi} \text{sen}(\omega t + \theta) + \mathbf{k}\boldsymbol{\phi} \text{sen}(\omega t + \theta) = \mathbf{0} \quad (15)$$

A Equação 15 pode ser escrita conforme a Equação 16, que somente possui a solução não trivial ($\boldsymbol{\phi} \neq \mathbf{0}$) se satisfeita a lei de Cramer, o que leva à Equação 17.

$$[\mathbf{k} - \mathbf{m}\omega^2] \boldsymbol{\phi} = \mathbf{0} \quad (16)$$

$$\det(\mathbf{k} - \mathbf{m}\omega^2) = 0 \quad (17)$$

Para um sistema de n graus de liberdade, ao se expandir o determinante até o n -ésimo termo, será possível se obter n valores de frequência referentes aos n modos de vibração da estrutura. Organizando-se tais valores do de menor magnitude ao de maior encontrada, é obtida o vetor de frequências $\boldsymbol{\omega}$, apresentado na Equação 18.

$$\boldsymbol{\omega} = \begin{Bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \vdots \\ \omega_N \end{Bmatrix} \quad (18)$$

O período natural de vibração (T_n) se relaciona com a frequência natural (ω) pela Equação 19 e diz respeito ao tempo necessário para um ciclo do movimento harmônico realizado pela estrutura

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega} \quad (19)$$

2.2. MONITORIZAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL

Wayne (2007) apresenta como monitoração de estruturas o ato de se medir, avaliar e de se registrar uma ou mais variáveis que ditam o comportamento estrutural. Sobre a integridade estrutural, Rabelo (2014) dita que esta constitui um dos fatores principais para a segurança da estrutura. Nesse sentido, a avaliação da integridade estrutural (*Structural Health Monitoring - SHM*) se faz importante para ao menos detectar a presença de algum dano na estrutura que possa comprometer sua capacidade portante e seu comportamento face às solicitações, auxiliando interdições e outras análises que se façam pertinentes.

Essa abordagem pode ser aplicada em diversos sistemas estruturais como: barragens e represas, instalações marítimas, construções e torres, instalações nucleares, túneis e escavações, e pontes – elemento de interesse deste exposto- conforme apresenta Brownjohn (2006). Não obstante, observa-se tal temática em instâncias automobilísticas, veículos aéreos (H. SPECKMANN E R.HENRICH) e até linhas de torres de transmissão (TAHA E LUCERO, 2005).

As variáveis requeridas em ensaios de monitoração em estruturas são apresentadas na Tabela 2.1 (OU E LI, 2010).

Tabela 2.2 – Variáveis monitoradas (OU E LI, 2010)

Tipo	Variáveis
Carregamento	Movimento do solo por terremoto, velocidade e pressão do vento, veículos, carregamento de impacto, carregamento de explosão e outros carregamentos acidentais
Fatores ambientais	Temperatura, umidade, acidez, solução salina, álcalis, dióxido de carbono, etc.
Efeitos do carregamento	Respostas globais: aceleração, velocidade, deformação estática, deslocamento dinâmico, altitude, etc.
Performance face a deterioração	Dano por fadiga, corrosão, efeito da idade no material, carbonatação, gelo e degelo, radiação ultravioleta, etc.

A fim de se obter os parâmetros necessários para uma análise estrutural, a FIB (2003) (*Fédération Internationale du Béton – Federação Internacional do Concreto*) apresenta um diagrama que contém as classificações de técnicas e objetivos de vigilância (Figura 2.2).

Visando classificar os métodos de identificação de dano, Rytter (1993) elenca os quatro primeiros níveis de identificação de danos (Níveis 1, 2, 3 e 4) apresentados abaixo, que, conforme Doebling (1998), trata-se de estratégias baseadas em modelos estruturais lineares. Já Maio (2011, apud Inman, 2001) trata dos Níveis 5, 6 e 7.

- Nível 1: Detecção da presença do dano estrutural;
- Nível 2: Nível 1 somado à provável localização do dano;
- Nível 3: Nível 2 somado à severidade do dano;
- Nível 4: Nível 3 somado às informações de segurança atuais da estrutura.
- Nível 5: Nível 4 somado a estruturas inteligentes para autodiagnosticar falhas estruturais;
- Nível 6: Nível 4 somado a estruturas inteligentes e controle para formar um sistema de autorreparo estrutural;
- Nível 7: Nível 1 somado a estruturas inteligentes e controle ativo para se obter de forma simultânea o controle e a monitorização.

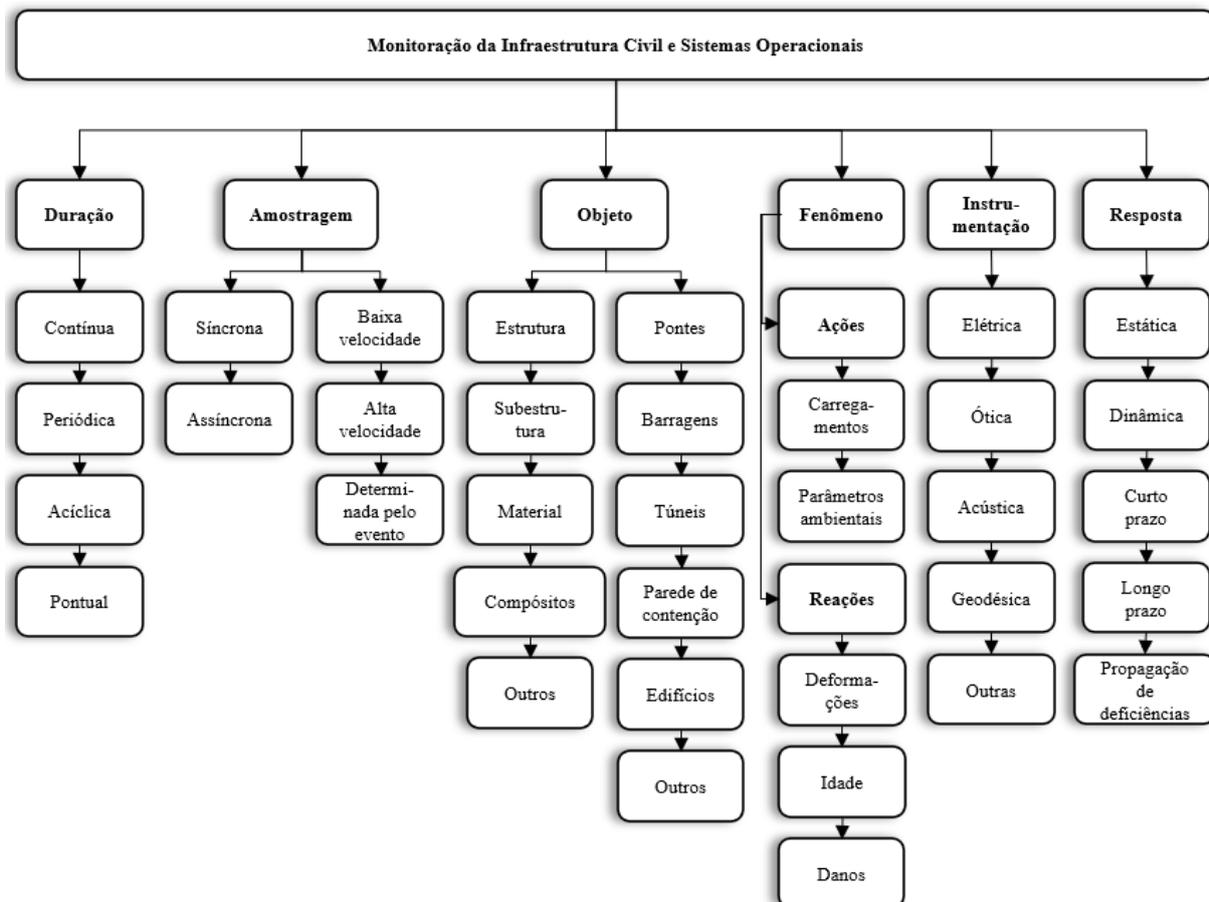


Figura 2.2 – Classificação de técnicas e objetivos de vigilância (FIB, 2003)

Sobre testes dinâmicos, Salawu e Williams (1993) ditam que podem fornecer importantes informações sobretudo no comportamento em serviço e na performance de estruturas quando executados em larga escala. Doebling (1996) apresenta, no campo da vibração, os métodos apresentados a seguir para a identificação de danos estruturais. São eles:

- Análise de mudança nas frequências de vibração;
- Análise de mudança nos modos de vibração;
- Análise de mudança na curvatura/tensão do modo de vibração;
- Métodos baseados na análise dinâmica da matriz de flexibilidade;
- Métodos baseados na análise das matrizes de massa, rigidez e de amortecimento;
- Métodos não lineares;
- Métodos baseados em redes neurais;
- Outros.

Alguns trabalhos que envolvem o SHM aplicados em estudos de casos de pontes são elencados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Catalogação de alguns estudos de caso sobre pontes

Estrutura	Autor (ano)
Ponte sobre o rio Klodnica em Gliwice (Polônia)	Klikowicz <i>et al.</i> (2016)
Ponte sobre o rio Sororó na ferrovia Carajás (Brasil)	Matos <i>et al.</i> (2015)
Pontes de concreto armado na ferrovia Carajás (Brasil)	Montoya <i>et al.</i> (2010)
Ponte de concreto protendido na ferrovia Carajás (Brasil)	Sampaio <i>et al.</i> (2010)
Pontes treliçadas nas ferrovias da Vale (Brasil)	Montoya <i>et al.</i> (2010)
Ponte de cabo estaiado Jindo (Coreia do sul)	Jang <i>et al.</i> (2010)
AASHO Road Test Bridges (Estados Unidos da América)	Fenves <i>et al.</i> (----)
Ponte Z24 (Suíça)	Peeters <i>et al.</i> (2000)
Ponte Øresund (Dinamarca – Suécia)	Peeters <i>et al.</i> (2009)

Dessa forma, tem-se a prática da comparação entre as características analisadas no passado com as observadas no presente - sendo um parâmetro abordado na NBR 9452:2019, norma brasileira de inspeções em obras de arte especiais (OAE's). O SHM exige, para uma melhor análise dos dados, a aplicação das metodologias e de ensaios de maneira rotineira e até mesmo contínua (CUNHA *et al.* 2018). Contudo, normativas claras e específicas que sugerem uma rotina de aplicação de tais métodos ou mesmo a obrigatoriedade de ensaios mais aprofundados estão em desenvolvimento e em processo de amadurecimento.

Montoya *et al.* (2010) traz como metodologia para a avaliação de pontes de concreto os procedimentos apresentados na Figura 2.3, que corresponde às seguintes descrições: **1** – são estudados os dados do projeto, as revisões e o histórico de antigas inspeções; **2** – dá-se a inspeção visual, a realização de ensaios não destrutivos e a extração de testemunhos de concreto; **3** – desenvolvem-se os modelos numéricos tendo como base dados de projeto; **4** – nesta etapa, são monitorados, por meio de sensores grandezas como deformações, temperaturas, deslocamentos e acelerações por meio de sensores como: *electrical bonded strain gage* (extensômetros), *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT), *Resistance Temperature Detector* (RTD) e acelerômetros piezoelétricos; **5** – alimenta-se os modelos numéricos com dados reais, ajustando tais simulações para servir de ferramenta de gestão; **6** – por fim, tem-se a avaliação do projeto estrutural e, se necessário com base em parâmetros normativos, a sugestão de reforços estruturais, manutenções e outros.

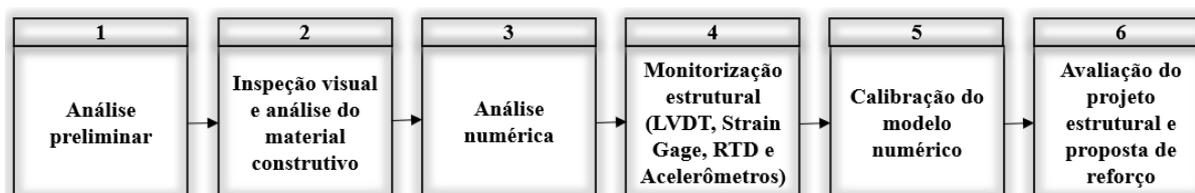


Figura 2.3 - Metodologia para avaliação de pontes de concreto (Montoya *et al.*, 2010)

Quanto às normativas internacionais, Moreu *et al.* (2018) apresenta a literatura *Guidelines for SHM* (ISIS Canada, 2001) como a pioneira em citar um guia sobre SHM, sendo seguida por regiões como os Estados Unidos da América (AKTAN *et al.*, 2002), a União Europeia (SAMCO, 2006) e outros, tendo a China como o país que se destaca na qualidade e na quantidade de bibliografia do assunto.

No Brasil, vê-se na NBR 9452:2019 uma normatização recente sobre inspeções das OAE's que trata de assertivas gerais e baseadas em critérios visuais e diferentes tipos de inspeções (Figura 2.4). Nela não é diretamente abordada a monitorização de estruturas quando em foco procedimentos mais específicos, como a análise dinâmica.

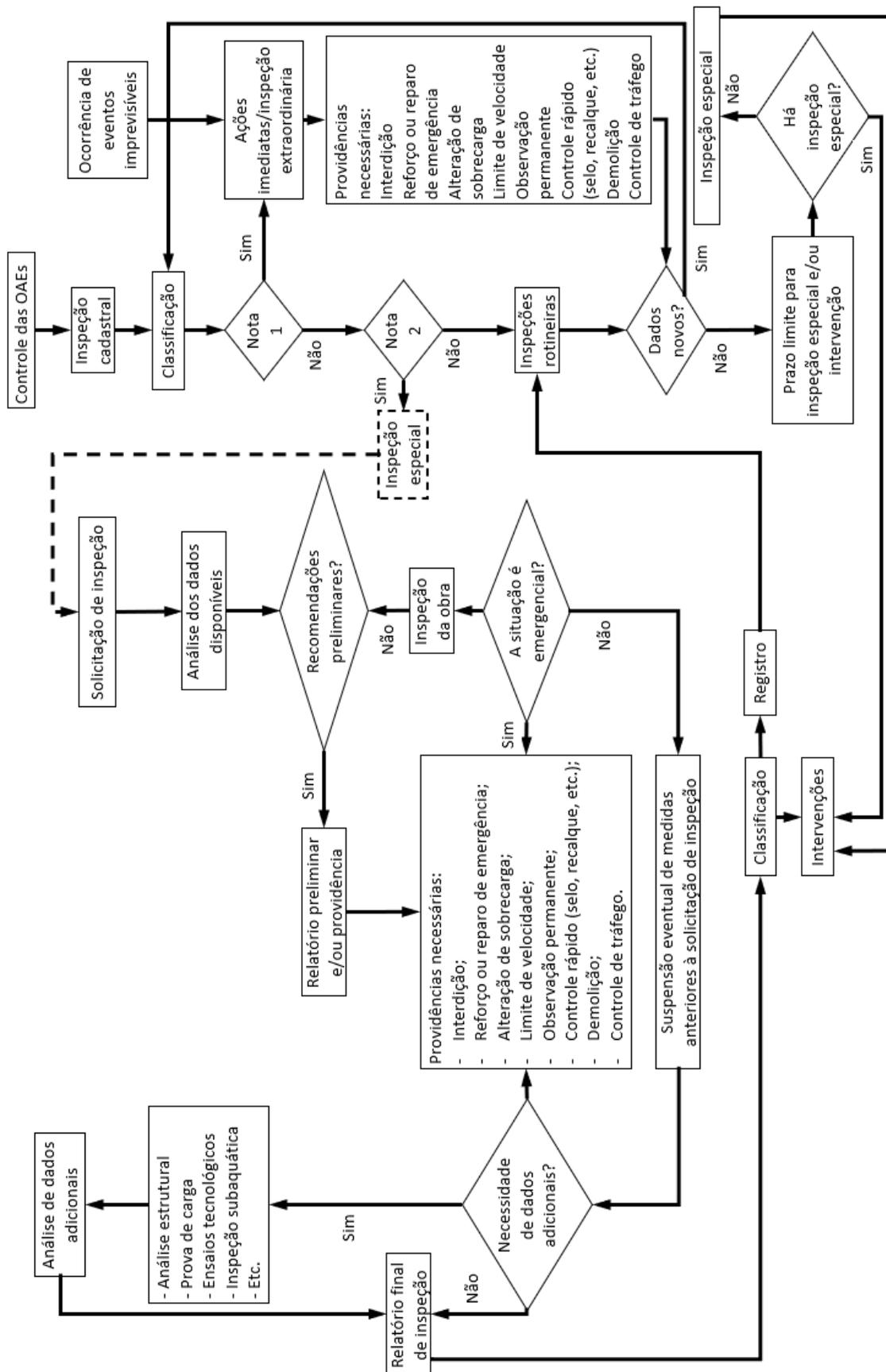


Figura 2.4 - Fluxograma de gerenciamento da OAE (NBR 9452:2019)

2.3. PLATAFORMAS DE PROTOTIPAGEM ELETRÔNICA DE CÓDIGO ABERTO DE BAIXO CUSTO

Plataformas de prototipagem eletrônica de código aberto são caracterizadas por possuir código aberto, ou seja, o usuário consegue modificá-lo e adaptá-lo aos seus interesses. Essas plataformas permitem uso integrado entre diversos dispositivos, denominados ‘módulos’, que desempenham inúmeras funções, como o acompanhamento da hora, o registro e armazenamento dos dados, a transmissão destes por rádio frequência ou mesmo por conversores de sinais, a aquisição de dados de aceleração, e outros. Entre as plataformas de prototipagem eletrônica atualmente disponíveis, também há aquelas de baixo custo, que tornam o desenvolvimento de sistemas de controle e automação acessíveis a um grande público.

A fim de se fomentar a prática da monitoração, a proposição de um sistema de baixo custo que permita alimentar um sistema de dados de maneira contínua se faz interessante e pode possuir solução nessa tecnologia. Enquanto um sistema convencional de análise dinâmica pode custar alguns milhares de reais, sistemas de código aberto de baixo custo podem facilmente ser construídos por poucas centenas de real. Assim, sistemas de monitoramento estrutural de baixo-custo podem ser utilizados como ferramentas para a disseminação dessa atividade no meio técnico ou até mesmo como sistemas efetivamente utilizados para monitorização de algumas estruturas reais cujas características sejam compatíveis com o nível de performance destes sistemas.

Consoante com a abordagem proposta nesse trabalho, vê-se nos acelerômetros o principal sensor a ser utilizado na monitoração dinâmica de estruturas. Acelerômetros são sensores capazes de adquirir dados de aceleração do ponto a que está conectado em uma estrutura. A Tabela 2.4 apresenta requerimentos para acelerômetros para fins de monitoramento estrutural sugeridos por Moreu *et al.* (2018), por Cunha *et al.* (2012) e as características de um acelerômetro usado em plataformas de código aberto de baixo custo.

Tabela 2.4 – Requerimento dos sensores e especificações do sensor MPU6050

Acelerômetro	Requerimentos (longas pontes com baixa frequência) Moreu <i>et al.</i> (2018)	Requerimentos Cunha <i>et al.</i> (2012)	MEMS - MPU6050 Ribeiro e Lameiras (2019)
Largura de banda de frequência	0 a 100 Hz	0 a 50 Hz	0 a 500 Hz
Amplitude	± 2g	±2g ou menor, selecionável	± 2g
Sensibilidade	-	≥ 1 V/g	16384 LSB*/g
Sensibilidade transversal	< 1%	-	± 2%
Resolução	-	≥ 16-bit	16-bit
Ruído	-	< 2μg	400μg/√Hz

* LSB diz respeito à um valor digital, dado que o módulo MPU6050 possui tanto um sensor analógico quanto um conversor analógico-digital.

Alguns autores já trabalharam com acelerômetros de baixo custo, a citar: Iacono *et al.* (2017) – viaduto Hímera -, Basto *et al.* (2016) – construções históricas em Barcelona -, Cury (2016) e Júnior *et al.* (2020) - sistemas sem fio para análise dinâmica de estruturas - e Bedon *et al.*- ponte estaiada de Pietratagliata- , contudo, o tema ainda é pouco aprofundado, principalmente em se tratando de aplicações práticas em estruturas, da utilização de nós remotos sem comunicação física (sistema sem fio) instalados em múltiplos graus de liberdade.

3. METODOLOGIA

3.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Um panorama global do trabalho a ser realizado, pautado na confecção e na validação de sistemas com seis nós de aquisição de amostras conectados e que permitem monitorar acelerações em diferentes pontos de estruturas é apresentado na Figura 3.1.

Foram produzidos três sistemas diferentes para amostragem, de modo que cada um supere as deficiências do anterior e, conseqüentemente, apresente níveis de complexidade quanto à confecção também crescentes. Estas versões do sistema são esquematizadas na Figura 3.2. Desenvolvido o Sistema 3, este foi validado em uma laje flexível de características conhecidas.

Adquiridos os dados com o sistema desenvolvido neste trabalho e o sistema de monitoração convencional da monitorização de uma ponte metroviária, esses foram trabalhados no *software* ARTeMIS, a partir dos quais obteve-se, por um tratamento de sinais, as frequências naturais e os modos de vibração da estrutura. Os parâmetros estimados a partir dos dados de cada sistema foram comparados e análises foram realizadas quanto a questões de precisão, influência dos ruídos na interferência dos dados, viabilidade do sistema proposto, possibilidade e confiabilidade da aquisição de sinais em estruturas robustas (de alta rigidez, como pontes metroviárias).

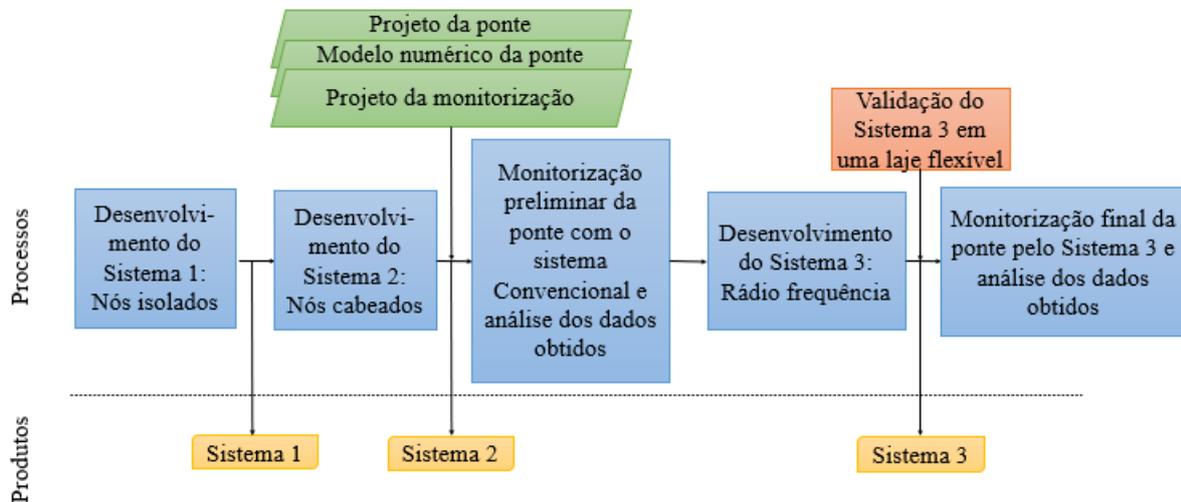


Figura 3.1 – Etapas de desenvolvimento e aprimoramento dos sistemas de monitorização proposto

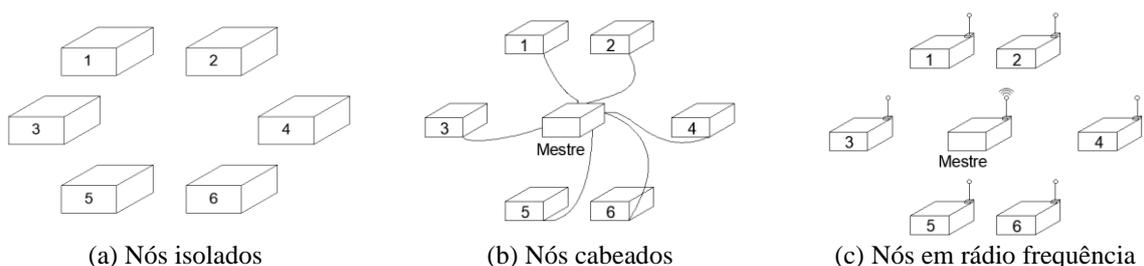


Figura 3.2 - Esquematização dos sistemas

3.2. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA 1: NÓS ISOLADOS

O Sistema 1 parte do zero e tem como objetivo desenvolver um *software* e um *hardware* capaz de amostrar e de registrar em um cartão microSD, em seis nós isolados, dados de hora e de aceleração nas três direções do acelerômetro (eixos x, y e z).

Compostos pelo *Arduíno* Nano e pelos módulos MPU6050, DS3231 e HW203, descritos e apresentados na Tabela 3.1, foram montados seis nós como o da Figura 3.3.

A alimentação do sistema se deu por *powerbanks*. Uma problemática quanto à alimentação se dá à medida que os *powerbanks* possuem desligamento automático quando não transmite uma quantidade mínima de corrente elétrica. Como os sistemas não consomem muita energia, sempre havia interrupção da alimentação, que não permanecia continuamente ligada.

Houve adaptação dos sistemas por resistores para aumentar o consumo de energia do sistema, e, conseqüentemente, o fornecimento de energia dos *powerbanks* a um nível acima do limite do desligamento automático, ocorrendo em um fornecimento contínuo de energia. Tal mudança desenvolveu-se de forma totalmente empírica, respeitando os limites de corrente elétrica que não danificassem os componentes de baixo custo.

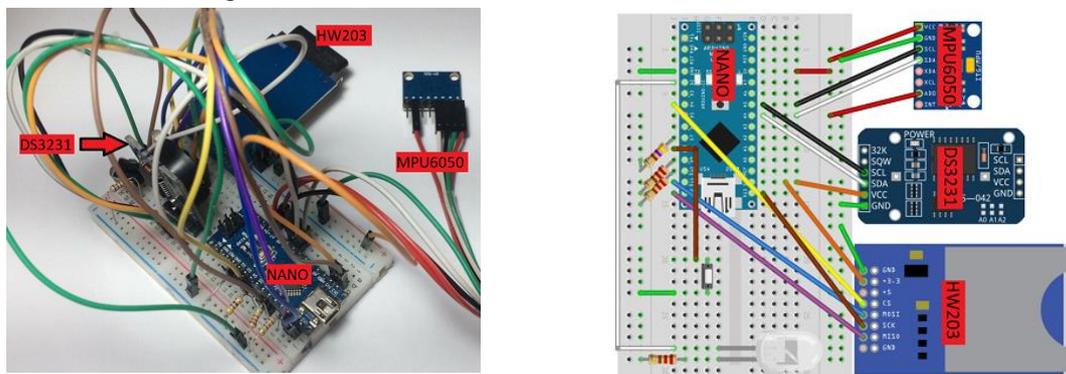
O acionamento desse sistema se dá de maneira assíncrona pelo pressionamento de um botão presente em cada ponto de coleta de amostras, que são ligados individualmente e manualmente. Os dados adquiridos durante os ensaios são sincronizados posteriormente, na fase de pós-processamento de dados, pela compatibilização das séries obtidas ao longo do tempo, medido tanto pelo módulo DS3231 quanto pelo relógio interno do próprio *Arduíno*.

Assim, configura-se como maiores problemas o acionamento não sincronizado dos nós e a compatibilização das séries de amostras que dependem de uma precisão de segundos do DS3231 - expressiva em relação à análise dinâmica - e de microssegundos do *Arduíno*.

Ensaaios apontaram que o relógio interno do *Arduíno*, apesar de ter uma precisão de microssegundos, apresenta variações de registro de tempo entre seus nós e uma dificuldade em definir o período em que ele é de fato acionado, carecendo de um sistema aprimorado que supra essas problemática de sincronização. A variação entre as placas se dá pela execução do programa dentro do próprio *Arduíno*, onde cada placa, apesar de ter a mesma configuração que as demais, não atua de modo idêntico a outra placa. Esse problema pode ser mitigado quando incorporado ao sistema um mecanismo de acionamento concomitante dos nós.

O código-fonte do sistema foi idealizado para a obtenção de pelo menos 100 amostras por segundo em cada eixo do acelerômetro, configurado para uma amplitude de acelerações de $\pm 2g$, de modo que nenhum dado é tratado no nó, sendo apenas armazenado no microSD com o respectivo registro do tempo.

Para as configurações de *software* e *hardware* desenvolvidas nesta seção, obteve-se frequência de amostragem média de 300Hz em cada eixo.

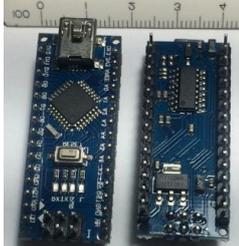
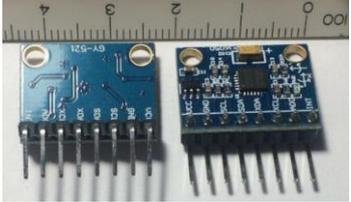
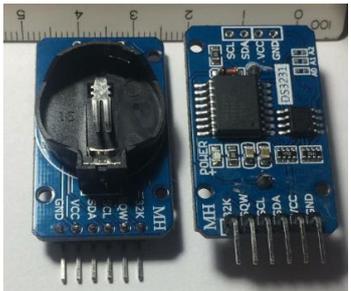
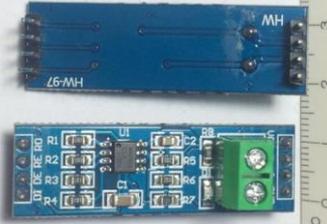
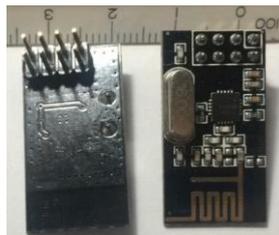


(a) Sistema real

(b) Esquema

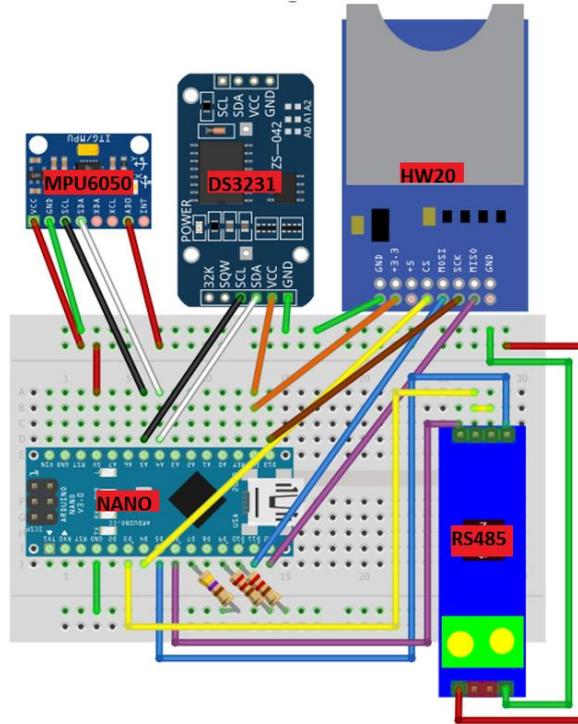
Figura 3.3 – Protótipo do sistema dos nós isolados

Tabela 3.1 – Descrição e especificação dos componentes utilizados na confecção dos sistemas

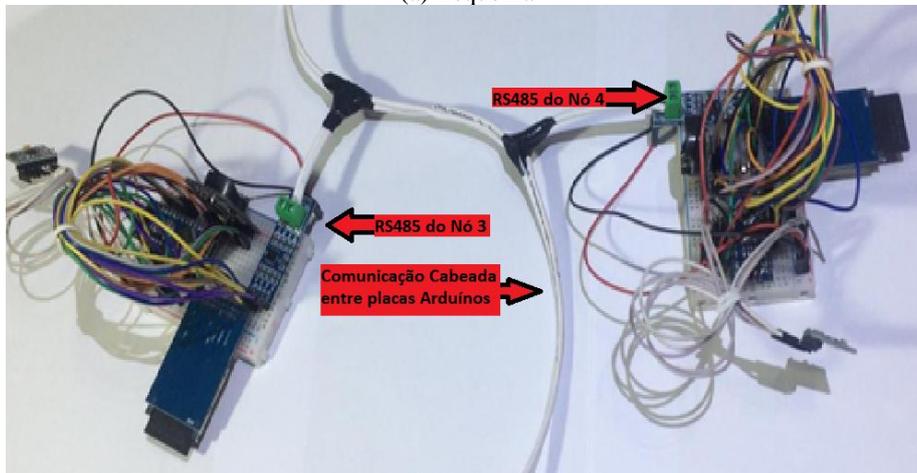
	Módulo	Descrição	Especificações	
		Placa que possui microcontrolador do tipo ATmega328, além de relógio, termômetro e outros elementos integrados	<ul style="list-style-type: none"> -Microcontrolados de 16MHz de frequência -Voltagem de operação: 5v -Memória flash: 32KB -Pinos digitais: 22 -Pinos analógicos: 8 -Alimentação: 7 – 12V 	<p>Arduino® (2020)</p>
		IMU (Inertial Measurement Unit) que possui, integrados a um conversor analógico-digital de 16bit, um giroscópio e um acelerômetro de 3 eixos cada.-	<ul style="list-style-type: none"> -Alcance programável do acelerômetro: $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ e $\pm 16g$, onde 'g' é a força da gravidade -Temperatura de uso: -40°C a 85°C -Faixa de frequência de aquisição de dados: 4Hz - 1000Hz -Alimentação: 3.3V 	<p>Ivense (2013)</p>
		Relógio em tempo real (RTC) com oscilador de cristal com compensador de temperatura (TCXO). Aceita bateria CR2032 como alimentação em caso de falta de alimentação.	<ul style="list-style-type: none"> -Interface I²C rápida: 400kHz -Temperatura de uso: -40°C a 85°C -Alimentação entre 3.3V ou 5V 	<p>Maxim Integrated (2015)</p>
		Registrador de dados em cartões microSD	<ul style="list-style-type: none"> -Alimentação: 3.3V ou 5V 	-
		Transceptor para comunicação à longa distância por meio de cabos	<ul style="list-style-type: none"> -Número de unidades de carga em uma mesma rede: 32 -Distância: $\leq 1200\text{m}$ -Delay de propagação de dados: 30ns -Transferência de dados: $\leq 2.5\text{Mbps}$ -Alimentação: 5V 	<p>Maxim Integrated (2003)</p>
		Transceptor de rádio frequência para comunicação sem fio	<ul style="list-style-type: none"> Número de unidades de carga em uma mesma rede: 125 -Distância: $\leq 100\text{m}$ -Transferência de dados: $\leq 2000\text{kbps}$ -Temperatura de uso: -40°C a 85°C -Alimentação: 1.3V – 3.6V 	<p>Nordic Semiconductor (2006)</p>

3.3. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA 2: NÓS CABEADOS

O sistema por nós cabeados seguiu a configuração de *software* e de *hardware* semelhantes ao apresentado na Seção 3.1, diferenciando-se deste pela adaptação no código desenvolvido dada a inserção do módulo RS485 (ver Figura 3.4 e Tabela 3.1).



(a) Esquema



(b) Sistema real

Figura 3.4 – Protótipo do sistema dos nós cabeados

Este módulo permite a comunicação dos nós por meio de cabos, suprimindo a problemática da sincronização no tempo, uma vez que é possível acionar todos os nós ao mesmo tempo.

Ensaíos demonstraram uma certa inconstância no acionamento conjuntos de todos os nós, de modo que alguns não eram sempre acionados e, outros, acionavam-se com alguns segundos de delay. Esse fato pode ser justificado pelo cabo utilizado (cabos de cobre de 1.5mm não entrelaçados) e pelo próprio *software* não refinado.

Para as configurações de *software* e *hardware* desenvolvidas nesta seção, obteve-se frequência máxima de amostragem média de 300Hz em cada eixo.

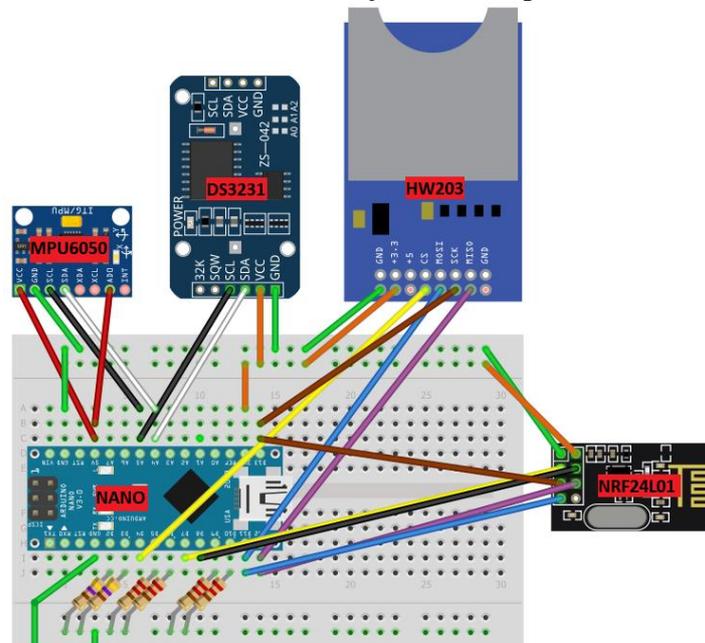
Juntando-se esse fato com a necessidade de dezenas de metros de cabos para a monitoração de grandes estruturas, desenvolveu-se o Sistema 3, visando um maior sincronismo dos dados e, além, a facilidade de se executar ensaios e monitorações com nós comunicados por rádio frequência, dispensando o uso de longos cabamentos e otimizando a implantação do sistema em estruturas.

3.4. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA 3: RÁDIO FREQUÊNCIA

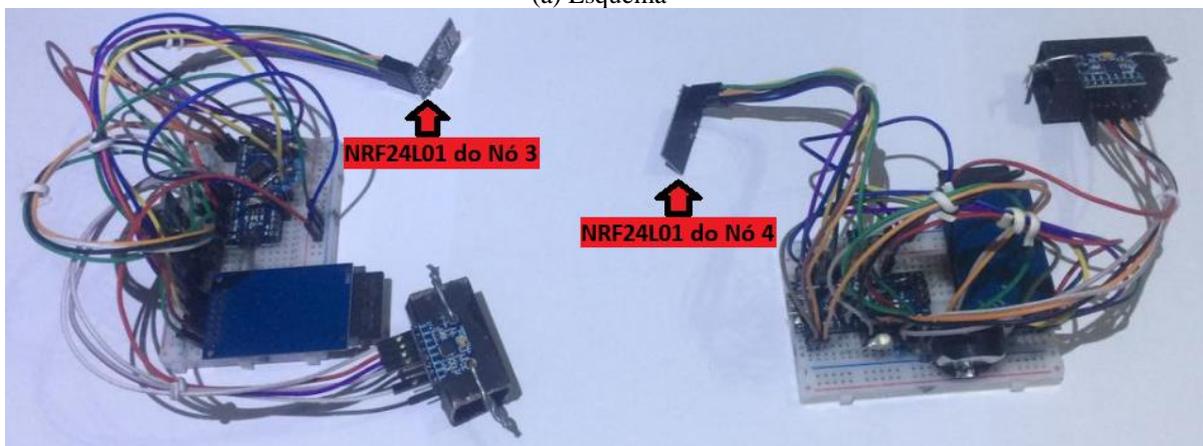
Este último sistema, Figura 3.5, supriu as problemáticas dos sistemas antecessores quanto ao acionamento conjunto dos acelerômetros, facilidade de execução de ensaios e o não uso de cabos. Apresenta-se como elemento final para a validação e a monitorização.

Incorporado o módulo RF24L01 (Tabela 3.1), ressalva-se que uma boa prática para sua utilização do módulo o posicionamento deste direcionado para cima, de forma que alguns ensaios constataram a falha de comunicação quando em outra posição. Quando virado para cima, o módulo apresentou uma diferença de tempo de acionamento das placas imperceptível ao olho nu e um acionamento conjunto de todos os nós.

Esse sistema foi o utilizado na monitoração final da ponte metroviária.



(a) Esquema



(b) Sistema real

Figura 3.5 – Protótipo do sistema de rádio frequência

Para a monitorização final, além do Sistema 3, construiu-se um suporte para a fixação para os acelerômetros, presente na Figura 3.6, para ser colado na estrutura com cola a base de resina epóxi. Tem-se o acelerômetro totalmente fixado por meio de arames em um perfil de alumínio de seção 2.0x2.0cm com espessura de chapa de 1mm. Este suporte foi utilizado para se reduzir ao máximo quaisquer vibrações relativas entre o sensor e a estrutura que pudessem introduzir componentes espúrias no sinal, advindas de outras fontes que não a vibração da própria estrutura.

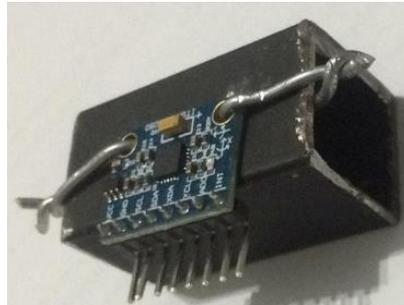


Figura 3.6 – Detalhes da fixação dos acelerômetros

Para as configurações de *software* e *hardware* desenvolvidas nesta seção, obteve-se uma frequência de amostragem média de 530Hz em cada eixo.

O ANEXO A apresenta o código desenvolvido para o nó mestre, composto apenas da placa Arduino Nano, dois botões e o módulo NRF24L01, responsável pelo acionamento dos nós escravos, que contém os acelerômetros. Já o ANEXO B apresenta o código desenvolvido para os nós escravos (Figura 3.5), que amostram os dados de aceleração.

3.5. VALIDAÇÃO DO SISTEMA 3 EM UMA LAJE FLEXÍVEL

3.5.1. Apresentação da laje

A laje utilizada para a validação do Sistema 3, de rádio frequência, é apresentada na Figura 3.7. Em concreto armado de resistência 25MPa e módulo de elasticidade 29GPa, possui dimensões de 6.1x4.9x0.10m (largura x comprimento x espessura) e foi idealizada e construída por Carmona (2011).

A laje possui os vãos maiores livres e os menores em apoiados e ligados à laje por conectores de cisalhamento tipo U.

Os modos de vibração dessa estrutura flexível são apresentados na Figura 3.8, já considerando a condição em que ela está atualmente: com fissuras seladas e representadas por linhas pretas na Figura 3.8. Os três primeiros modos de vibração possuem frequências de, respectivamente, 3.36Hz, 15.67Hz e 23.64Hz.



Figura 3.7 - Laje utilizada na validação do sistema (CARMONA *et. al.*, 2017)

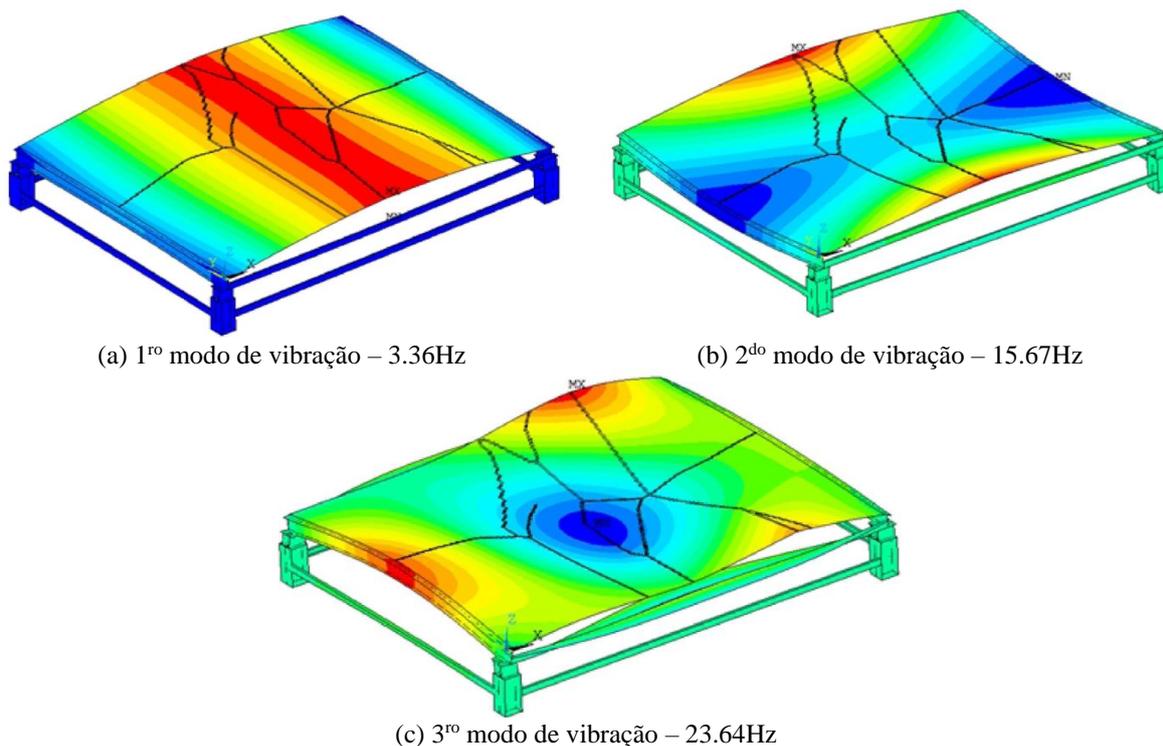


Figura 3.8 - Modos de vibração da laje (CARMONA *et. al.*, 2017)

3.5.2. Ensaios

A validação busca, por meio de um ensaio da laje em questão, aferir se o sistema desenvolvido é capaz de obter os resultados de frequências e modos de vibração semelhantes aos obtidos por Carmona *et. al.* (2017).

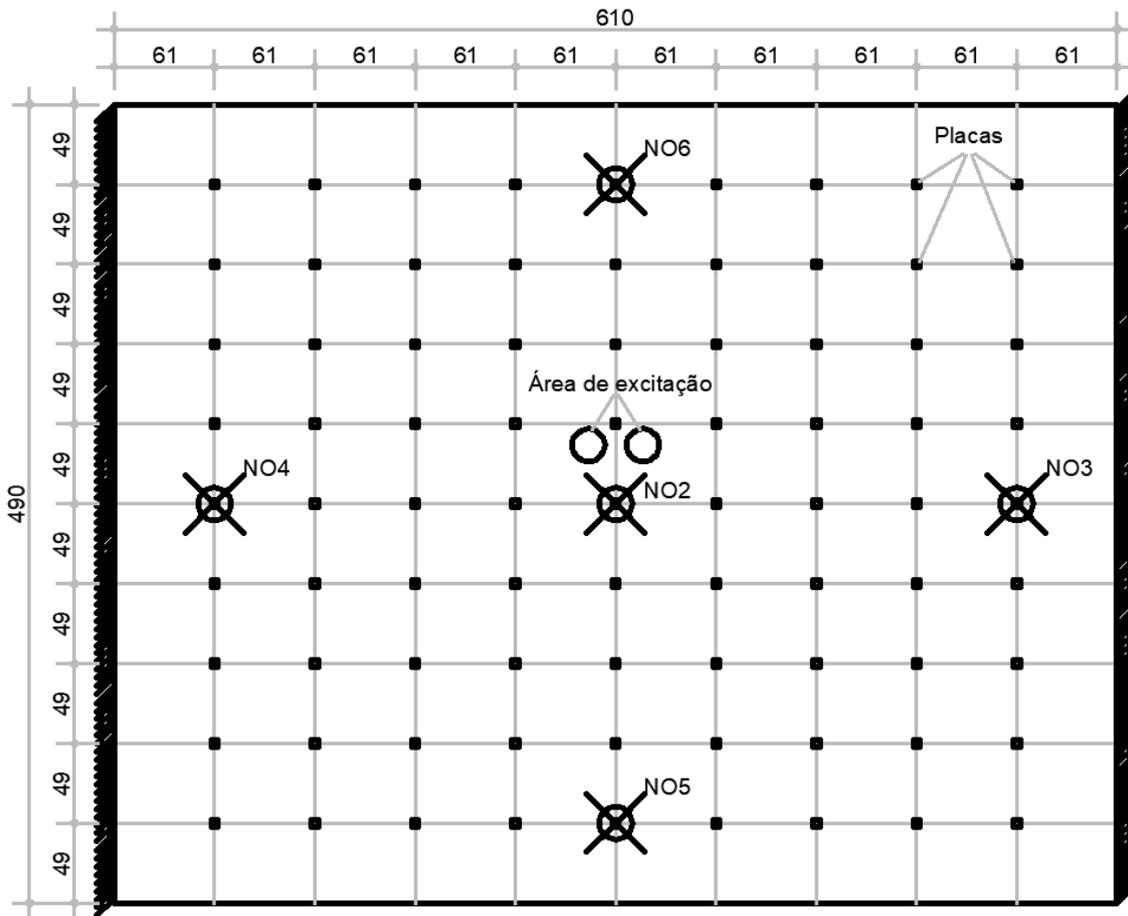
A laje possui 81 placas que auxiliam na fixação dos acelerômetros. Estas são equidistantes entre si em ambas as direções do plano da laje e estão destacadas na Figura 3.9.

O preparo das placas para a fixação dos acelerômetros com cola à base de resina epóxi se deu pelo lixamento e limpeza da região para garantir uma região plana e uma boa fixação, removendo resquícios de cola e quaisquer outras impurezas.

Considerando-se a disposição de cinco acelerômetros apresentada na Figura 3.9, realizaram-se dois tipos de ensaios: de vibração ambiente com sessões de duração de 5 minutos e de vibração livre com sessão única de duração de 20 segundos. Uma amostragem completa para ensaio de vibração ambiente se dá compondo os resultados de seis ensaios de 5 minutos.

No ensaio ambiente, amostrou-se apenas os dados dos acelerômetros quando a laje não possui qualquer excitação que não à do próprio ambiente e sem haver qualquer elemento sobre a laje além dos cinco nós que, juntos, somam 1230g.

Já o ensaio à vibração livre foi obtido após a excitação na região central da laje, próxima ao nó 2 (Figura 3.9), após o pulo de uma pessoa de 75kg, que esperou o tempo total de amostragem para se mexer novamente, não causando qualquer perturbação na laje que a já introduzida.



(a) Mapeamento dos acelerômetros



(b) Ensaio



(c) Detalhes do nó 5

Figura 3.9 – Disposição e detalhes dos nós

3.5.3. Análise dos dados amostrados

Os dados obtidos foram tratados no *software* ARTeMIS, carecendo, antes da inserção dos dados no *software*, seus pré-tratamentos. Além disso, ressalta-se que, apesar de o Sistema 3, de rádio frequência, registrar dados nos três eixos, foram analisados apenas os dados referentes ao eixo vertical, paralelo à força da gravidade.

3.5.3.1. Pré-tratamento dos dados

Pelo Sistema 3 desenvolvido, cada nó utilizado na amostragem originou um arquivo de texto que contém o registro das acelerações e do tempo correspondente nas três direções, eixos x, y e z do módulo MPU6050 (Tabela 3.1). No caso de ensaios à vibração livre, esses dados são obtidos durante 20 segundos e, à vibração ambiente, 5 minutos.

Contudo, o Arduíno, devido à capacidade de execução de tarefas que varia de placa para placa, gera diferenciações na quantidade de amostras presentes em cada ensaio, onde, por exemplo, o nó 5 pode ter 15913 amostras enquanto o nó 4 possui 15785, para uma sessão de mesma duração.

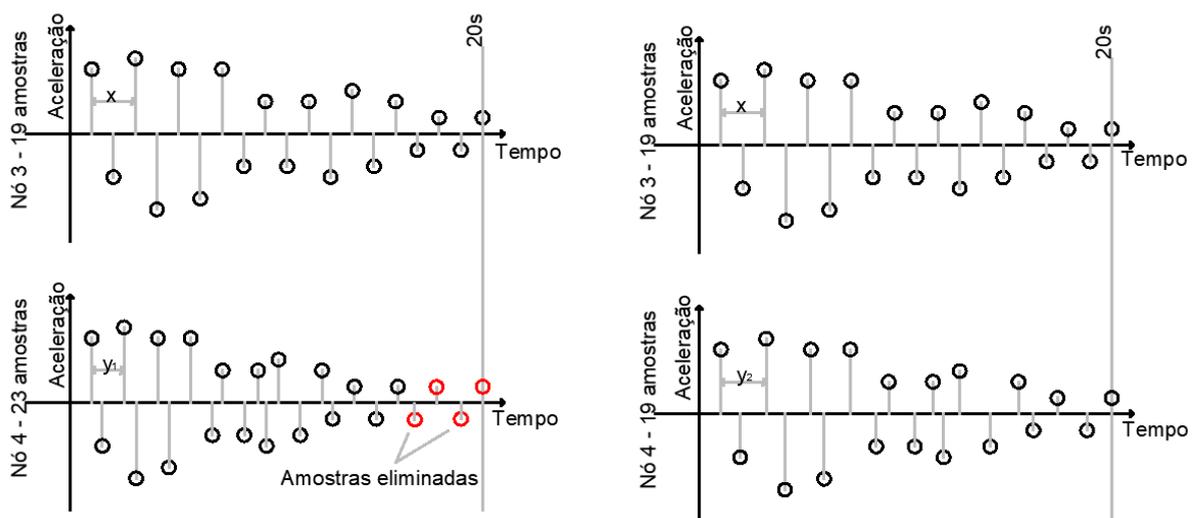
O *software* ARTeMIS não permite a utilização de séries temporais com diferentes quantidades de amostras. O *software* trabalha com a pressuposição que todos os sensores trabalharam na mesma frequência de amostragem, de forma síncrona, e durante a mesma duração. Assim, o *software* considera que, para cada sensor, as séries de resultados possuem mesma quantidade de amostras espaçadas pelo mesmo intervalo de tempo.

Neste trabalho, a questão foi solucionada eliminando as amostras finais de cada nó que excedem as amostras do nó com menos dados. Essa ação acarreta um problema que não é evitável: o de dispersão e de dessincronização dos dados, conforme apresentado na Figura 3.10, onde os nós com mais amostras terão dados mais dispersos em relação à antes do pré-tratamento. Esse fato gera, potencialmente, um pequeno ruído nos resultados finais.

Para os dados de vibração ambiente, compostos da junção de pelo menos cinco ensaios de 5 minutos, há a realização desse pré-tratamento após o acoplamento das amostras de pelo menos cinco ensaios, totalizando aproximadamente 25 minutos. Ou seja, agrupam-se os dados de todos os ensaios para cada nó e, após uma comparação entre suas quantidades de amostras, realiza-se o pré-tratamento, eliminando os dados excedentes considerando o número de amostras do nó com menos dados totais.

Dessa forma, foi considerada como a frequência de amostragem final a frequência obtida pelo nó com menos amostras totais tanto para a vibração livre quanto para a ambiente.

As amostras analisadas foram as correspondente ao eixo paralelo à força da gravidade.



(a) Exemplo de amostragens antes do pré-tratamento (b) Exemplo de amostragens após o pré-tratamento

Figura 3.10 – Problemática da dispersão de dados, onde $y_2 > y_1$

3.5.3.2. Processamento dos dados

Com os dados pré-tratados, utilizou-se todos os valores de amostras na análise da vibração ambiente. Já na vibração livre, de um intervalo de 30 segundos de amostragem que contempla dados desde antes da excitação até o fim do amortecimento, separou-se 20 segundos de dados a depender do critério adotado para consideração do início da vibração livre após o impacto aplicado.

No caso da laje, considerou-se em vibração livre os dados após o maior pico de acelerações no nó 2 (Figura 3.9 (a)).

Os dados processados no ARTeMIS seguiram as seguintes configurações principais:

- *Detrending* habilitado, ou seja, os dados terão sua média subtraída para que se comportem ao redor de 0 no gráfico, introduzindo um forte componente de 0 Hz no sinal, uma vez que o acelerômetro MPU6050, por ser capacitivo, registra a aceleração estática, ou seja, ainda que sem qualquer excitação, amostrará aceleração igual à da gravidade no eixo paralelo à força da gravidade;
- *Decimation* habilitado, esta configuração permite uma maior precisão ao se reduzir a taxa de amostragem a uma frequência a ser determinada em cada ensaio. Ganha-se precisão ao passo que não será possível detectar frequências de vibração maiores que a estipulada;
- *Filtering* do tipo passa-baixo *Butterworth* de ordem 8, em concordância com o trabalhado por De Magalhães (2010) e por Rodrigues (2004). Esse filtro permite a apenas a obtenção de dados inferiores a frequência de 30Hz (corte superior de vibrações estipulado nesse ensaio), o que é vantajoso dado que as estruturas ensaiadas possuem, quanto à modelagem, seus principais modos de vibração entre 0 e 25Hz;
- *Projection estimation* habilitado com seleção de canais automática, evitando redundâncias de sinais;
- *Spectral Density Estimation* de 1024 com sobreposição de 50%, em concordância com o trabalhado por De Magalhães (2010), que trata do entendimento algébrico de uma onda quanto à força que ela carrega;
- *Stochastic Subspace Identification* habilitado para os métodos SSI - *UPC* (*Stochastic Subspace Identification - Unweighted Principal Component*).

3.6. ESTUDO DE CASO DA PONTE METROVIÁRIA

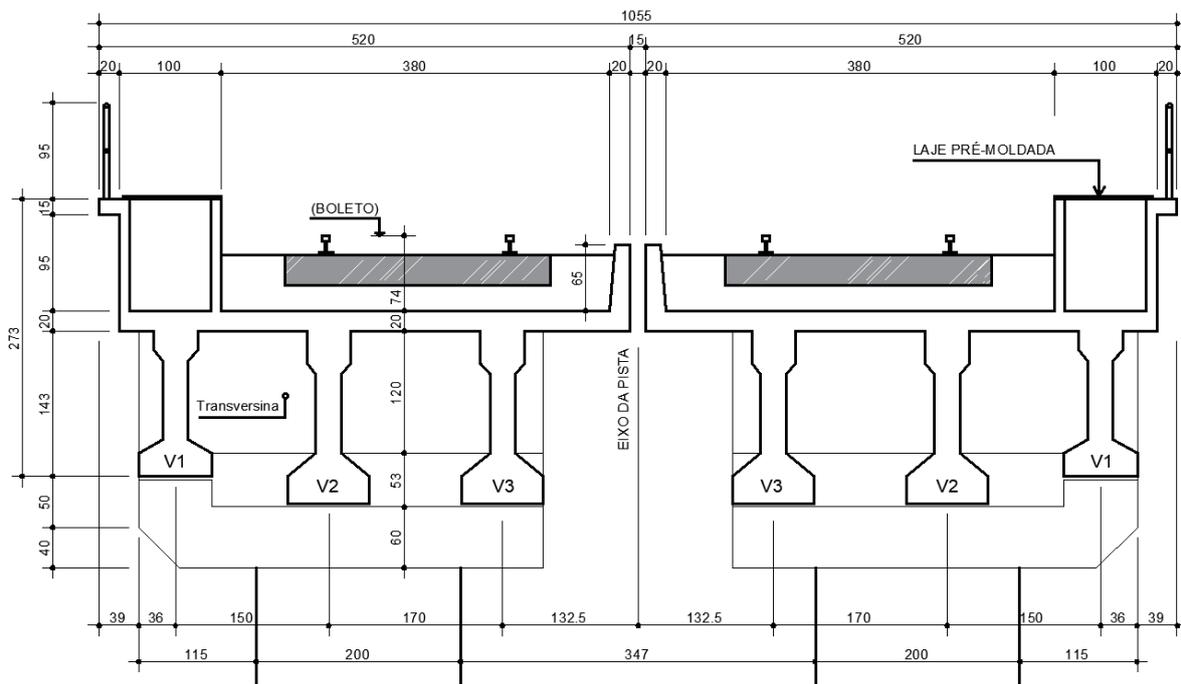
3.6.1. Apresentação da ponte metroviária

A ponte metroviária a ser monitorizada (Figura 3.11) se situa na cidade de Guará – DF e se constitui de três vãos onde os dispostos nas extremidades medem 29.025m e o central 30.000m, conforme apresenta a Figura 3.12 (b), totalizando 95.950m de comprimento. Possui, ainda, dois encontros de 3.950m de comprimento que dão acesso a estrutura.

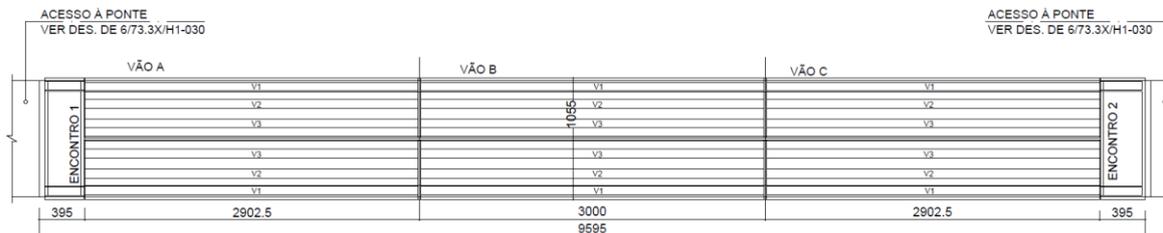
Composta de dois tabuleiros simétricos de 5.200m de largura, cada um é sustentado por três vigas bi apoiadas, pré-moldadas e protendidas sobre almofadas de Neoprene, além de transversinas apresentadas na Figura 3.12 (a).



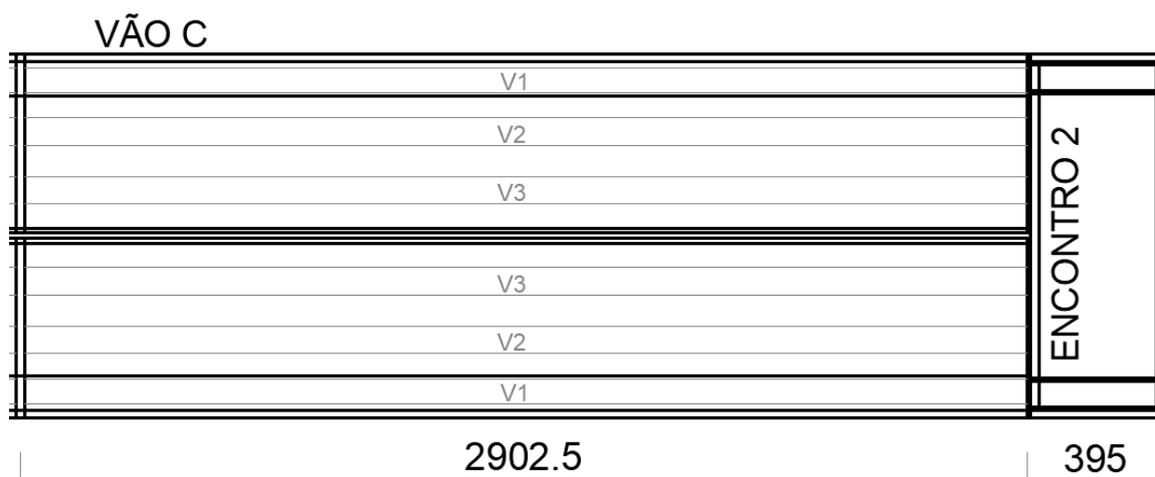
Figura 3.11 – Ponte metroviária estudada



(a) Seção transversal



(b) Vista superior



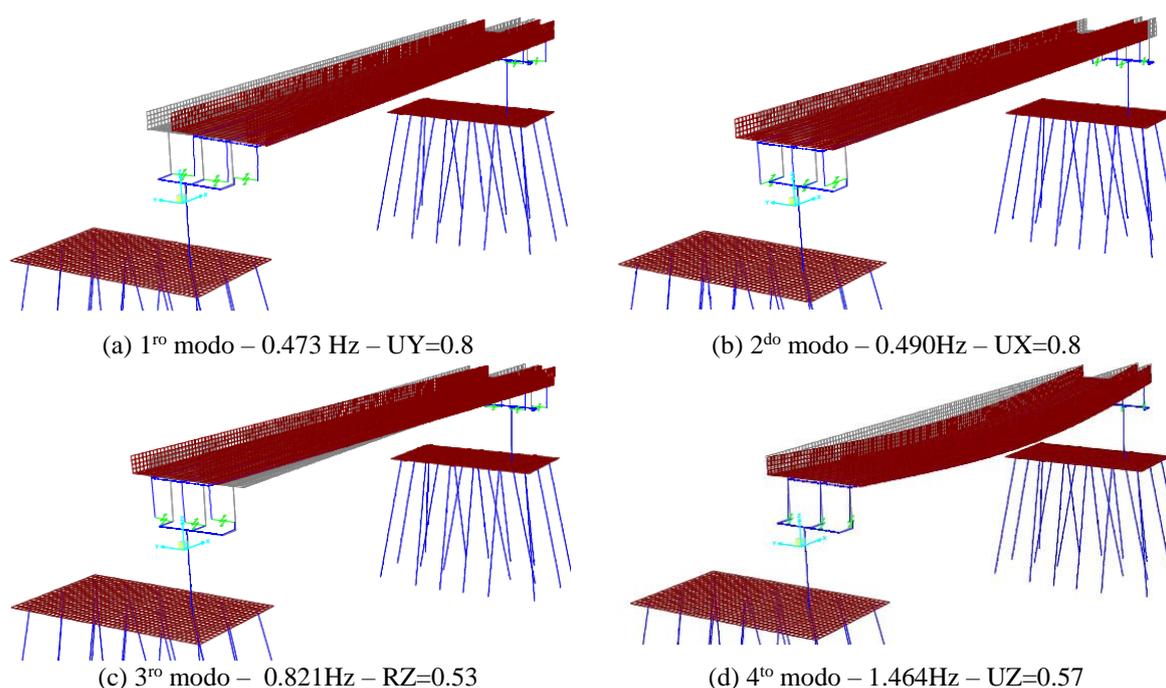
(c) Detalhe do projeto no vão C

Figura 3.12 - Projeto da ponte metroviária (unidades em centímetros)

Ressalta-se que o presente trabalho é colaborativo com discentes do PECC-UnB (Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília), os quais auxiliaram na obtenção de dados experimentais a partir de um sistema convencional de monitoração estrutural, bem como a modelagem numérica da ponte em estudo, que servirá de guia para a locação dos acelerômetros na estrutura.

Os resultados de alguns dos modos de vibração do vão da ponte metroviária estudada podem ser observados na Figura 3.13 (RIBEIRO *et al.*, 2021; SOBRAL *et al.*, 2020) onde os parâmetros UZ, UY e UX dizem respeito ao fator de participação modal (FPM) translacional nos eixos z, y e x, respectivamente, enquanto que o RZ, RY e RX dizem respeito ao FPM rotacional nos eixos z, y e x, respectivamente. A Tabela 3.2 traz informações sobre os 32 primeiros modos de vibração da estruturada modelada. Os FPM associados a cada modo, na Figura 3.13 e na Tabela 3.2, são referentes aos graus de liberdade de maior importância em cada modo.

O FPM diz respeito à contribuição da massa para a vibração da estrutura de cada modo, consistindo em um valor compreendido entre 0 e 1.



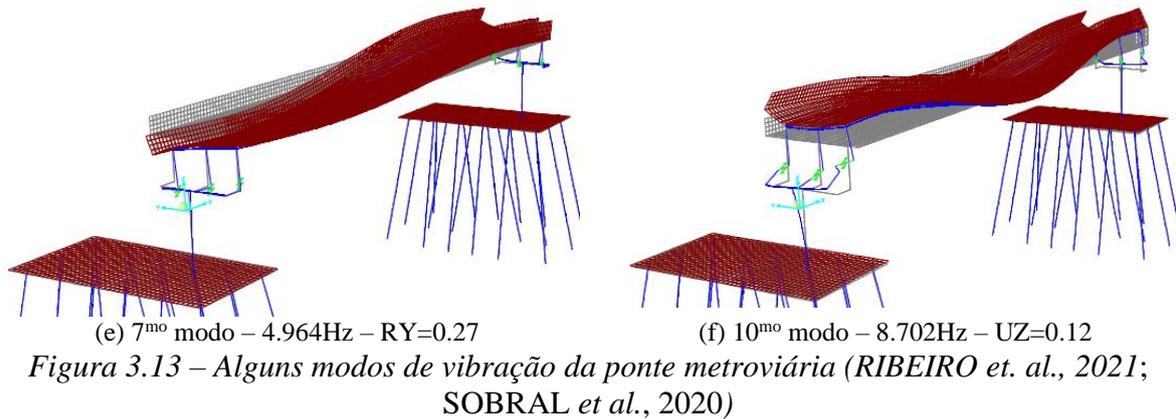


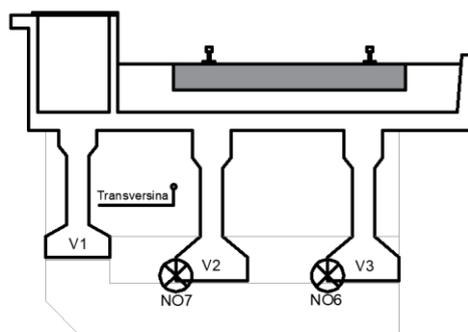
Tabela 3.2 – Os 32 primeiros modos de vibração, suas frequências e fatores de participação modal (FPM) de maior importância correspondentes (RIBEIRO et al., 2021)

Modo	1	2	3	4	5	6	7	8
Frequência (Hz)	0.473	0.490	0.821	1.464	2.022	4.835	4.964	5.865
FPM	UY=0.8	UX=0.8	RZ=0.53	UZ=0.57	RX=0.09	RY=0.04	RY=0.27	RX=0.0006
Modo	9	10	11	12	13	14	15	16
Frequência (Hz)	8.030	8.702	10.341	10.856	11.622	12.411	12.740	16.616
FPM	UZ=0.002	UZ=0.12	RY=0.001	UZ=0.005	RY=0.003	RY=0.07	RY=0.03	UZ=0.01
Modo	17	18	19	20	21	22	23	24
Frequência (Hz)	17.443	17.727	17.895	17.945	18.079	18.089	18.461	18.724
FPM	UZ=0.01	UY=0.001	RZ=0.31	RX=0.15	UX=0.13	RX=0.004	UZ=0.002	RY=0.001
Modo	25	26	27	28	29	30	31	32
Frequência (Hz)	19.431	19.866	19.907	20.018	20.028	21.519	24.229	25.106
FPM	UZ=0.002	UZ=0.003	RZ=0.009	UZ=0.001	UZ=0.013	RY=0.0001	RY=0.03	UZ=0.02

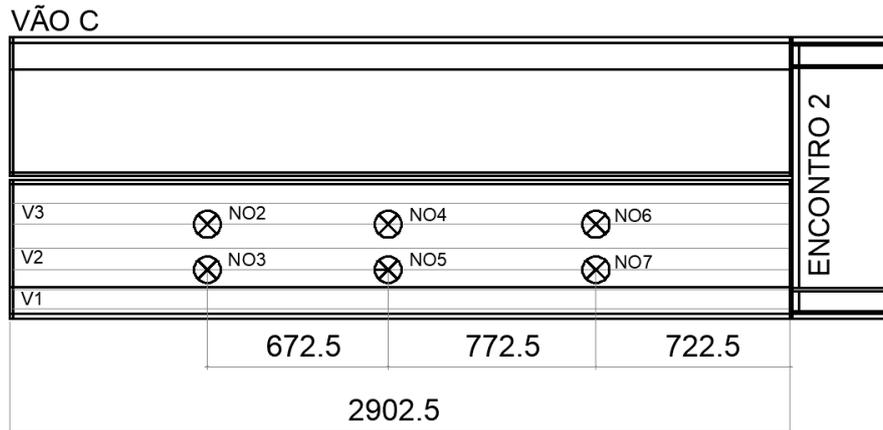
3.6.2. Ensaio

Pela movimentação dos modos e pelo fator de participação modal, é observado que a maior porcentagem de massa se concentra nos primeiros modos de vibração tanto para rotação quanto para translação. Pontuando regiões de maiores deslocamento, os acelerômetros terão mais sucesso de captar movimentação se posicionados da forma apresentada na Figura 3.14.

Os nós 4 e 5 estão posicionados a 50cm do centro das vigas dada a presença de uma transversina na região central.



(a) Seção transversal



(b) Vista superior

Figura 3.14 – Arranjo dos acelerômetros no tabuleiro estudado (unidades em centímetros)

A preparação da base para a fixação dos acelerômetros se deu raspando a área, lixando-a e limpando-a. Após isso, por ser uma região plana, colou-se os acelerômetros diretamente à estrutura com cola epóxi. Caso fossem regiões irregulares, deveria ser realizada uma cama de cola epóxi, nivelando a região, e, após a secagem desta, a colagem dos acelerômetros.

A amostragem se dará em dois momentos: durante a vibração ambiente, ou seja, sem qualquer estímulo ou excitação que não a do próprio ambiente; e durante a vibração livre após a passagem do metrô.

A determinação do momento em que o metrô não está mais na ponte foi definida na Seção 3.6.3 deste exposto.

Os ensaios preliminares e finais diferenciam-se quanto ao sistema utilizado. No ensaio preliminar foi utilizado o sistema convencional de alto desempenho ADS1800 (*Structural Vibration Solutions*) com dois acelerômetros piezoelétricos de uso geral, um de sensibilidade 500mV/g e outro 100mV/g. Um dos acelerômetros era da marca B&K e o outro era um equivalente e compatível. O sistema convencional amostrou dados apenas na região dos nós 4 e 5, na direção paralela à ação da força gravitacional. No ensaio final utilizou-se o Sistema 3, de nós comunicados por rádio frequência.

Na Figura 3.15 é possível observar a realização do ensaio preliminar e, na Figura 3.16, o final.



(a) Ensaio preliminar



(b) Acelerômetro convencional B&K

Figura 3.15 – Ensaios preliminar



(a) Ensaio preliminar



(b) Acelerômetro MPU6050

Figura 3.16 – Ensaio final

3.6.3. Tratamento dos dados

O tratamento dos dados seguiu o mesmo apresentado na Seção 3.5.3 tanto para os sistemas desenvolvidos quanto para o sistema convencional. Ressalta-se que o sistema convencional não carece de pré-tratamento pois mantém uma frequência de amostragem constante de 200Hz.

Em relação ao trecho da amostragem considerado como vibração livre, tem-se que uma solução para delimitar o tempo em que a estrutura vibra de tal maneira seria monitorar o deslocamento, através de um extensômetro, na região final do vão, o mais próximo do Encontro 2 (Figura 3.12), de modo que a identificação do último sinal de deslocamento positivo no extensômetro daria início à condição de vibração livre. No entanto, não foi possível utilizar tal critério. Assim, considerou-se, a partir ponto em que o sinal amostrado se aproxima muito do ruído, o espaço de tempo que vai dos 2.5s anteriores aos 17.5s posteriores, totalizando 20s. Abaixo é apresentado o embasamento para tal critério.

Primeiramente, observou-se, pelos dados do ensaio com o sistema convencional, que todo o sinal está contido em um intervalo de tempo de 8.0 segundos, tempo em que o metrô atravessa completamente o vão estudado e em que o sinal é amortecido (Figura 3.17).

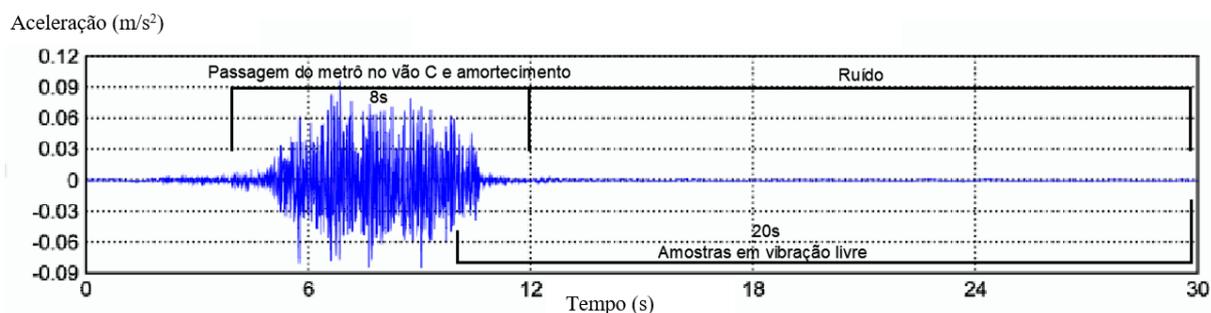


Figura 3.17 – Estrutura do sinal amostrado pelo sistema convencional

Tem-se, também, as características de velocidade operacional do metrô, 80km/h, e de seu comprimento total, 87.2m (CENTRO-OESTRE BRASIL). Com elas, é possível obter o tempo em que o metrô leva para ingressar e para sair do vão C:

$$t_m = \frac{l_m + l_c}{v} = \frac{87.2 + 29.0}{\frac{80}{3.6}} = 5.2s \quad (20)$$

Onde:

- t_m – Tempo em que o metrô atravessa por completo o vão C;
- l_m - Comprimento total do conjunto de vagões do metrô;
- l_c - Comprimento do vão C;
- v - Velocidade operacional do metrô.

Dessa maneira, para se obter dados de vibração livre na ponte com um intervalo de segurança, considerou-se o período após 5.5s do início das amostragem correspondente à passagem de metrô no vão C e amortecimento (Figura 3.17). Ou, em outras palavras, o intervalo contado a partir de 2.5s antes do início do ruído.

4. RESULTADOS

4.1. Análise geral da estabilidade de amostragem do sistema

No total foram trabalhados com dados suficientes para duas vibrações livres e uma ambiente de no mínimo 25 minutos para cada sistema utilizado. A Tabela 4.1 apresenta a variação das frequências de amostragem para cada nó para o ensaio ambiente e a Tabela 4.2 a correspondente ao ensaio de vibração livre, ambas com o Sistema 3, explicitando uma limitação do Arduino quanto à sincronização dos dados. A Tabela 4.3 apresenta um mapeamento dos ensaios com os dados e seus tempos de amostragem e frequência de aquisição correspondentes e utilizadas no processamento dos dados no ARTeMIS.

Tabela 4.1 – Variação de frequências de amostragem para cada nó, por ensaio de vibração ambiente com o Sistema 3

Ensaio		Frequência do ensaio ambiente (Hz)							
		1	2	3	4	5	6	Média	Variância
Sistema 3	Nó 2	543.7	541.8	543.1	539.2	543.9	543.1	542	3
	Nó 3	533.9	532.7	529.7	532.6	531.0	535.1	533	4
	Nó 4	542.0	535.9	540.0	541.0	545.5	546.5	542	15
	Nó 5	541.3	535.7	534.9	541.9	539.3	537.0	538	8
	Nó 6	538.5	540.9	536.7	537.3	538.8	539.0	539	2
	Média das médias ensaio vibração ambiente							539	-
Sistema 3	Nó 2	522.3	522.1	523.6	518.7	523.0	-	522	4
	Nó 3	545.3	545.1	542.0	541.6	544.5	-	544	3
	Nó 4	525.0	531.0	529.8	528.5	527.0	-	528	7
	Nó 5	524.8	528.1	522.3	528.3	525.6	-	526	6
	Nó 6	532.8	530.5	532.8	532.2	531.2	-	532	1
	Nó 7	533.6	529.6	531.8	528.4	539.6	-	533	19
Média das médias ensaio vibração ambiente							531	-	

Tabela 4.2 – Variação de frequências de amostragem para cada nó, por ensaio de vibração livre com o Sistema 3

Ensaio		Frequência do ensaio livre (Hz)			
		1	2	Média	Variância
Sistema 3	Nó 2	553.1	553.6	553	0
	Nó 3	540.1	541.0	541	0
	Nó 4	553.7	553.9	554	0
	Nó 5	548.8	549.9	549	1
	Nó 6	549.3	548.6	549	0
	Média dos nós - ensaio vibração livre 1			549	-
Média dos nós - ensaio vibração livre 2			549	-	
Sistema 3	Nó 2	523.9	524.2	524	0
	Nó 3	540.8	541.1	541	0
	Nó 4	530.2	529.6	530	0
	Nó 5	526.0	526.0	526	0
	Nó 6	533.3	532.6	533	0
	Nó 7	530.8	529.8	530	1
Média dos nós - ensaio vibração livre 1			531	-	
Média dos nós - ensaio vibração livre 2			531	-	

Tabela 4.3 – Duração e frequência de amostragem dos ensaios realizados considerados

Sistema \ Ensaio	Ambiente		Livre 1		Livre 2	
	Tempo	Frequência	Tempo	Frequência	Tempo	Frequência
Laje Sistema 3	30'	522Hz	20''	540Hz	20''	541Hz
Ponte Sistema 3	25'	533Hz	20''	524Hz	20''	524Hz
Ponte Sistema convencional	25'	200Hz	20''	200Hz	20''	200Hz

Observa-se que a sincronização tende a ser mais precisa em relação a ensaios curtos, de 30s, referentes aos ensaios de vibração livre. Estes ensaios corresponderam à menor variação de taxas de aquisição nos próprios nós.

Já a Figura 4.1 elucida uma comparação entre as diferenças dos tempos de registro de amostras consecutivas de aceleração para dois nós escolhidos aleatoriamente, neste caso nós 2 e 6. A figura foi construída da seguinte forma: a partir de toda a gama de amostras obtidas, selecionou-se 99 dados consecutivos, compondo as Figura 4.1 (a) e (c). A partir desses 99 dados, realizou-se outros dois histogramas removendo-se os dados que compunham intervalos superiores a 4000 microssegundos Figura 4.1 (b) e (d).

Nota-se que os tempos entre dados consecutivos varia, primeiramente, de nó para nó, onde o nó 2 está com a maioria dos dados contidos no intervalo de 1752 e 1769 microssegundos e o nó 6 tem a maioria dos dados espaçados entre 1684 e 1749 microssegundos (Figura 4.1 (b) e (d)). Tal fato, por si só, causa uma dessincronização dos dados. Ademais, é notável a presença de intervalos de dados superiores a 4000 microssegundos em ambos os nós (Figura 4.1 (a) e (c)), que pode ter causa no código utilizado (ANEXO B) uma vez que, em ambos os nós, um intervalo dessa magnitude é apresentado a cada 17 amostras.

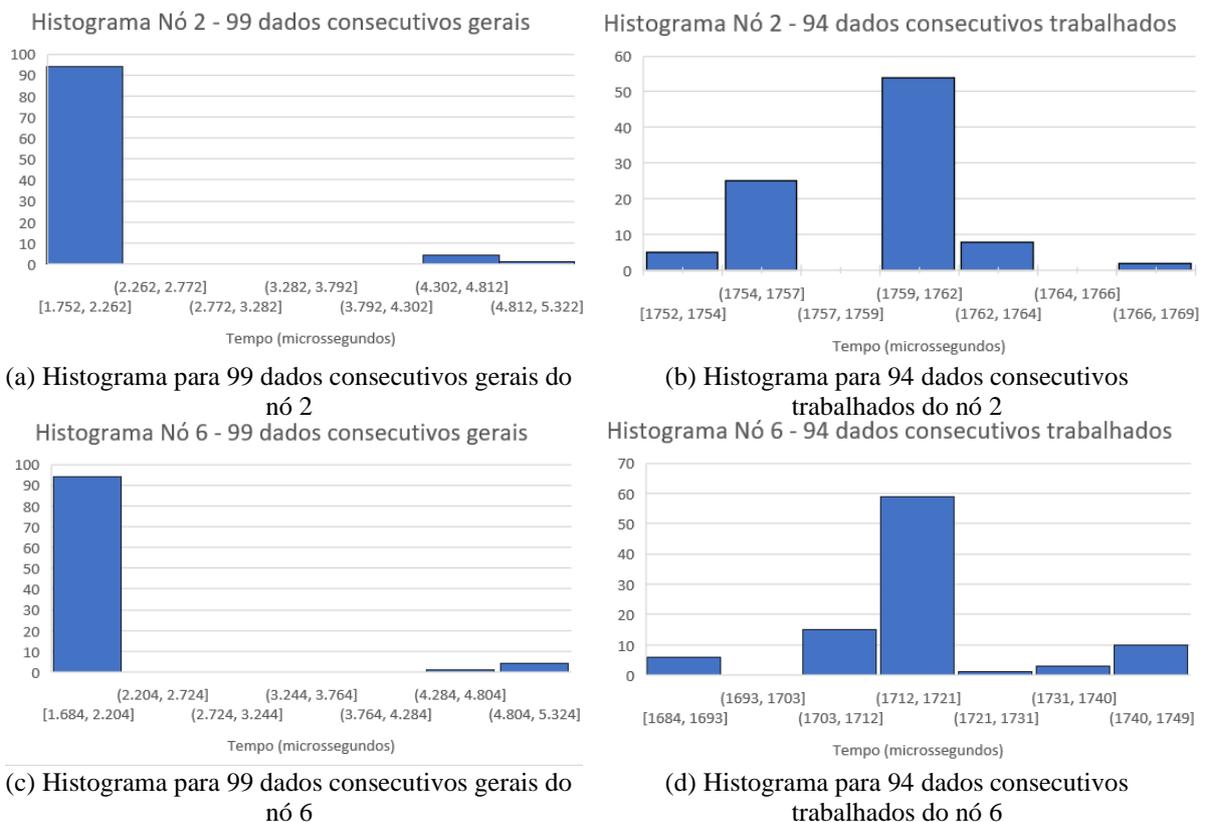


Figura 4.1 - Histogramas do tempo entre registros de amostras consecutivas de aceleração

4.2. LAJE FLEXÍVEL

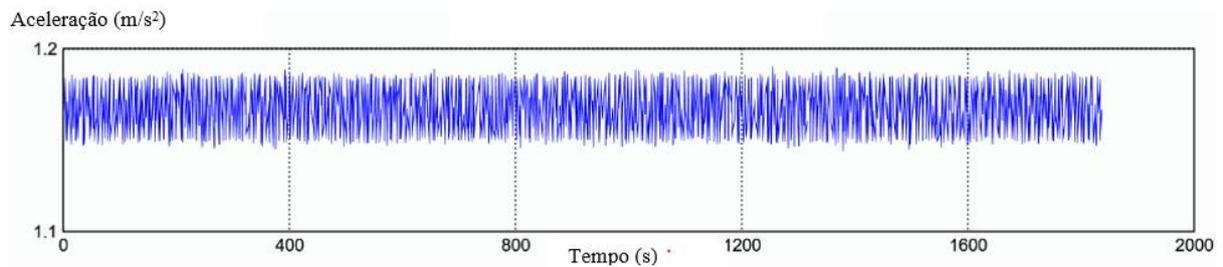
4.2.1. Ensaio de vibração ambiente

A Figura 4.2 apresenta as amostras processadas no *software* ARTeMIS, que foram obtidas pelo acelerômetro nos cinco nós usados no ensaio (Figura 3.9) e pré-tratadas.

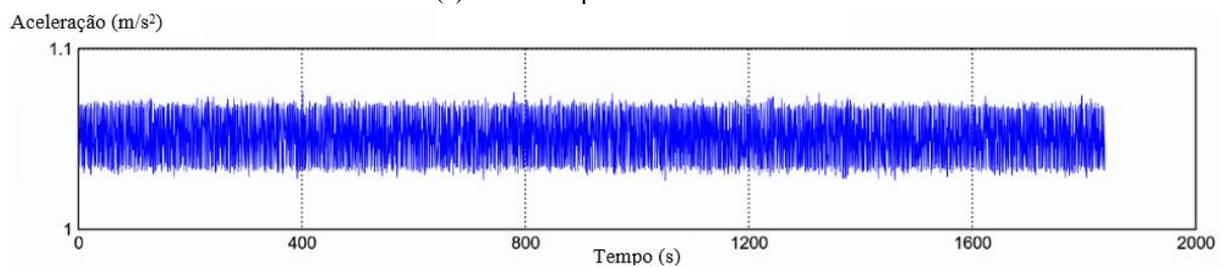
Observa-se que as amostras não giram em torno de um mesmo valor referente à aceleração da gravidade, que neste caso é 1, fato que deveria ocorrer. Há uma diferenciação quanto à sensibilidade dos acelerômetros que pode ter origem: na alocação do acelerômetro na estrutura de modo que não ficara totalmente paralela à força da gravidade; e/ou na calibração do acelerômetro. O nó que mais se aproximou de tal valor unitário foi o nó 6 (Figura 3.9 (e)).

Contudo, essa característica dos acelerômetros tende expressar um sinal com amplitudes maiores que as que de fato ocorrem, não alterando os valores de frequência obtidos.

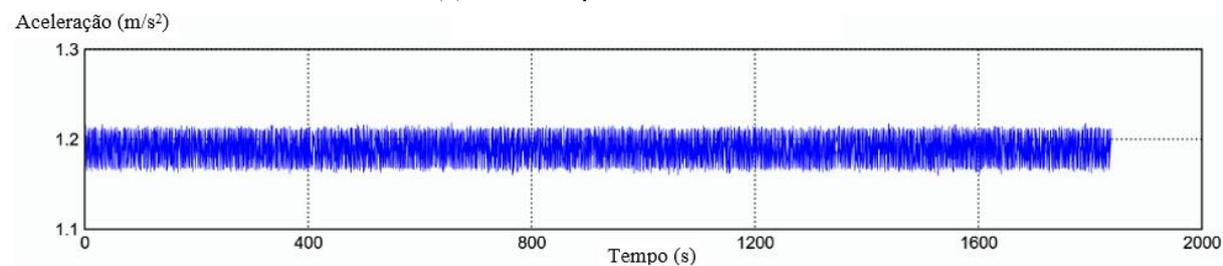
A Figura 4.3 apresenta os resultados da análise, as os modos de vibração e as frequências correspondentes para o parâmetro *decimation* estipulado de 0 – 52.2Hz



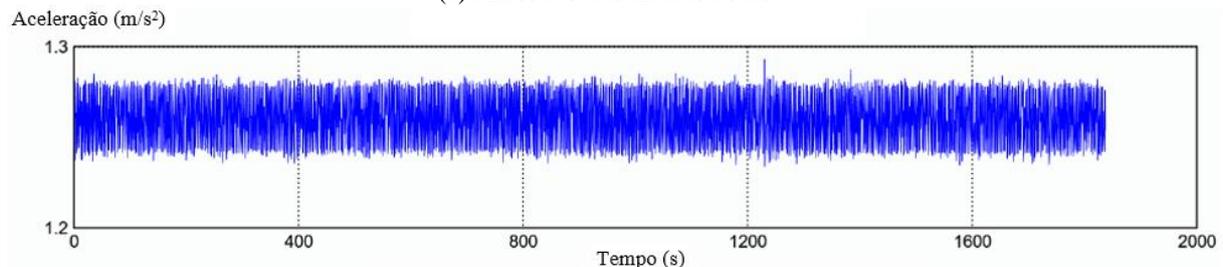
(a) Amostras processadas do nó 2



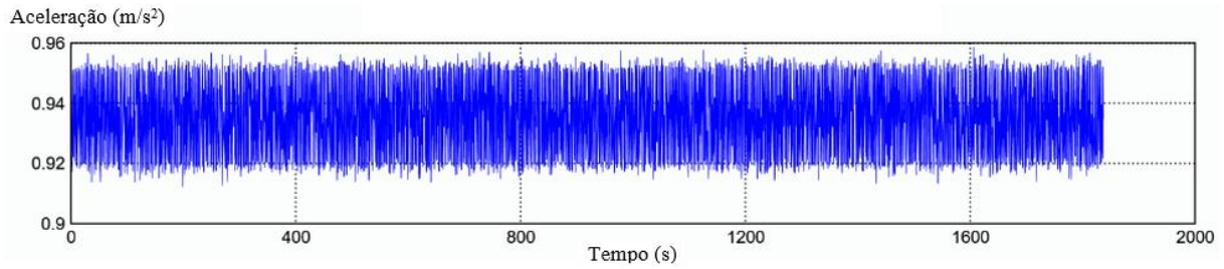
(b) Amostras processadas do nó 3



(c) Amostras trabalhadas do nó 4

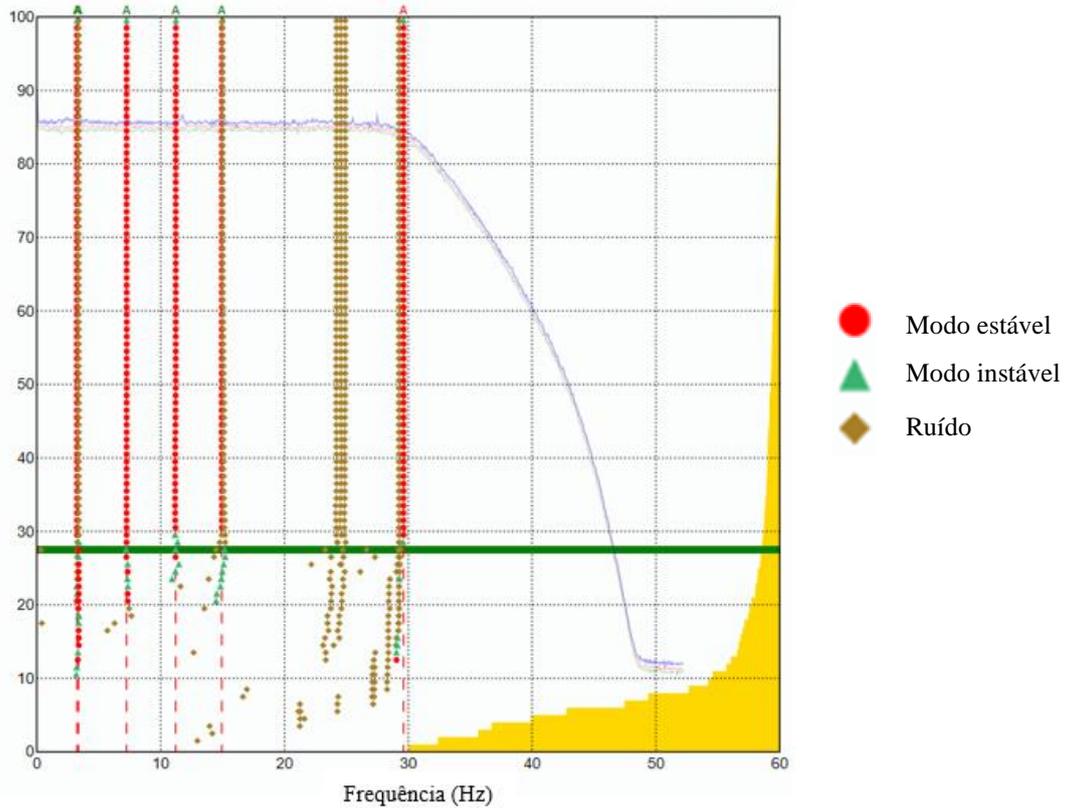


(d) Amostras trabalhadas do nó 5

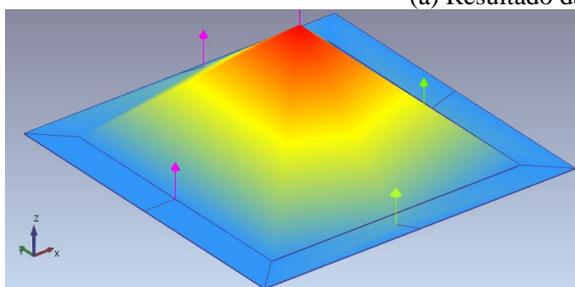


(e) Amostras trabalhadas do nó 6

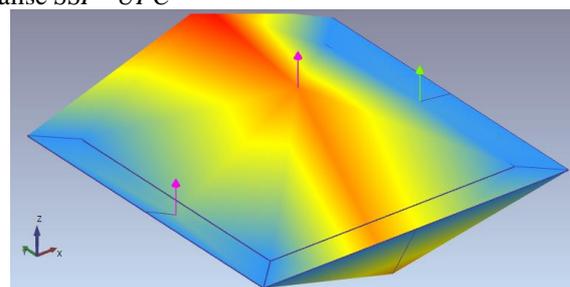
Figura 4.2 – Estrutura do sinal amostrado da laje à vibração ambiente pelo Sistema 3



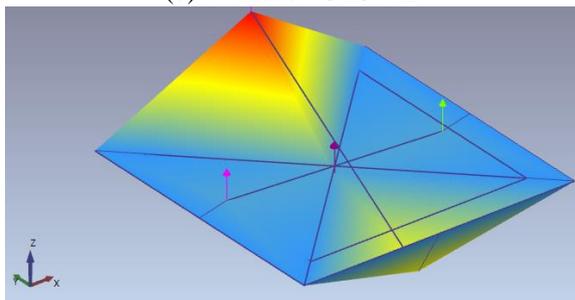
(a) Resultado da análise SSI – UPC



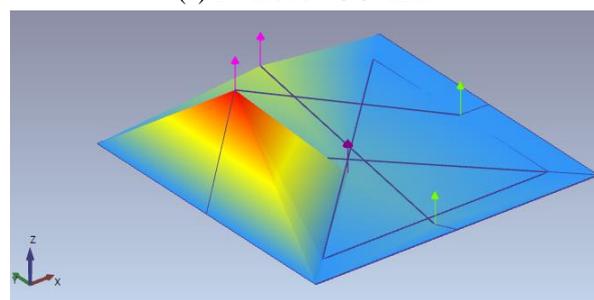
(b) 1^o modo – 3.234Hz



(c) 2^o modo – 3.372Hz



(d) 3^o modo – 7.250Hz



(e) 4^o modo – 14.277Hz

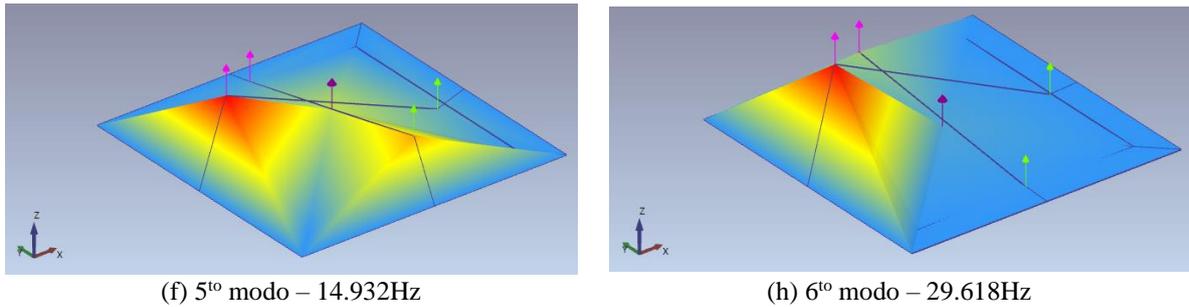


Figura 4.3 – Resultado e modos identificados da laje à vibração ambiente pelo Sistema 3

Comparando-se os modos obtidos na Figura 3.8 e na Figura 4.3, vê-se que os dados do ensaio geraram seis modos de vibração contra os três oriundos da modelagem. A quantidade de modos excedentes das amostras ensaiadas pode ter origem no problemática apresentada na Figura 3.10, sobre a dispersão dos dados, onde os dados amostrados apresentam uma dessincronização.

Pode-se concluir que, para a vibração livre, o Sistema 3 foi capaz de identificar o 1^{ro} modo de vibração da modelagem, que encontra equivalência no primeiro ou segundo modo de vibração do ensaio. Analisando as deformadas modais, nota-se que o segundo modo identificado pelo Sistema 3 se assemelha fortemente ao primeiro modo numérico, o que contribui para a consideração de que, de fato, este modo se refere ao modo natural da estrutura. Já o primeiro modo identificado pelo Sistema 3 apresenta uma deformada modal com componentes que não encontram equivalência nos modos numéricos. Embora tal resultado pode ser advindo de ruídos típicos de ensaios de vibração ambiente, uma possível razão para tal deformada modal atípica é a dessincronização introduzida no pré-processamento dos sinais, como já explicado. A identificação de deformadas modais é fortemente afetada pela presença de defasagens nos sinais dos graus de liberdade monitorados. O pré-processamento utilizado nesse trabalho inclui, conforme mostrado na Figura 3.10, uma defasagem inexistente no sinal real, o que pode afetar consideravelmente a capacidade de se identificar deformadas modais equivalentes às deformadas reais da estrutura.

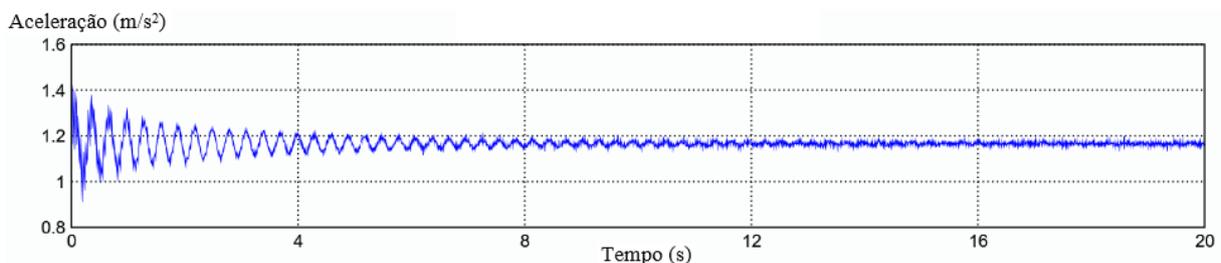
O quinto modo identificado nos resultados experimentais se aproxima numericamente do valor da frequência do segundo modo de vibração obtido na análise numérica. No entanto, a deformada modal identificada experimental guarda pouca semelhança à deformada numérica, embora a identificação da deformada modal possa ter sido prejudicada pelos motivos já expostos.

4.2.2. Ensaio de vibração livre

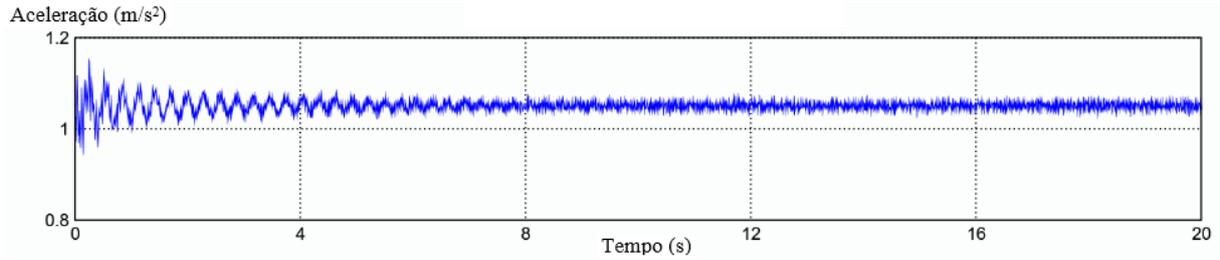
4.2.2.1. Repetição #1

A Figura 4.4 apresenta as amostras processadas no *software* ARTEMIS, que foram obtidas pelo acelerômetro nos cinco nós usados no ensaio (Figura 3.9) e pré-tratadas.

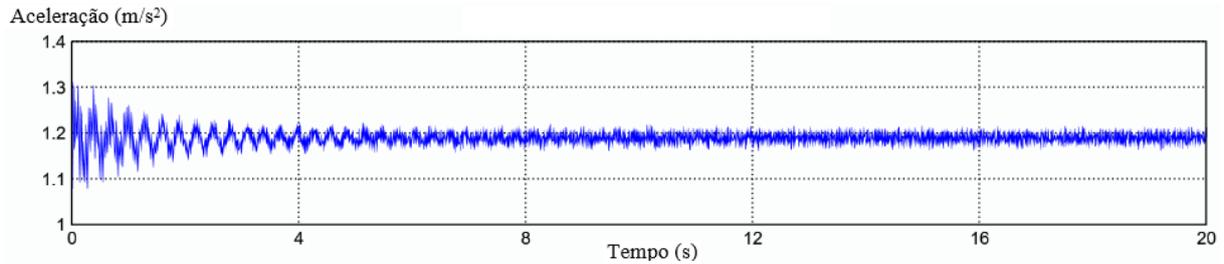
A Figura 4.5 apresenta os resultados da análise, as os modos de vibração e as frequências correspondentes para o parâmetro *decimation* estipulado de 0 – 54Hz.



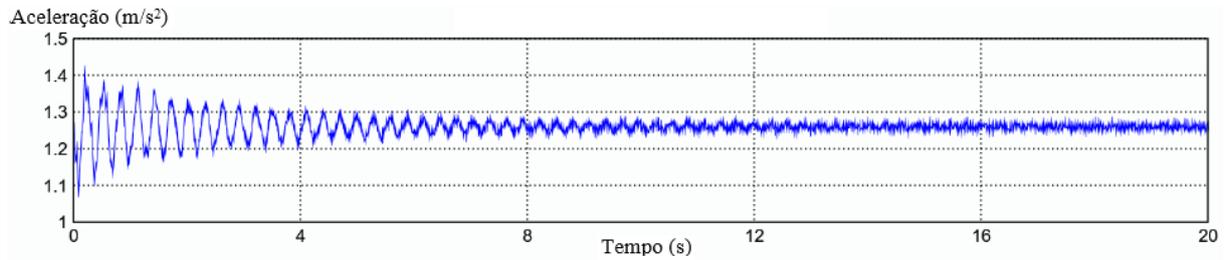
(a) Amostras trabalhadas do nó 2



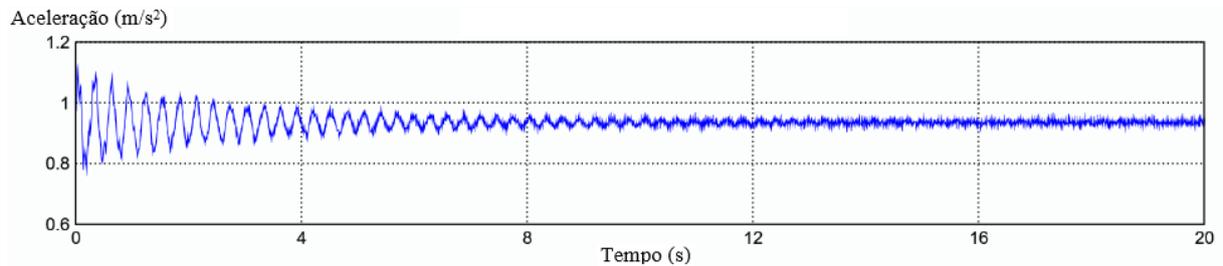
(b) Amostras trabalhadas do nó 3



(c) Amostras trabalhadas do nó 4

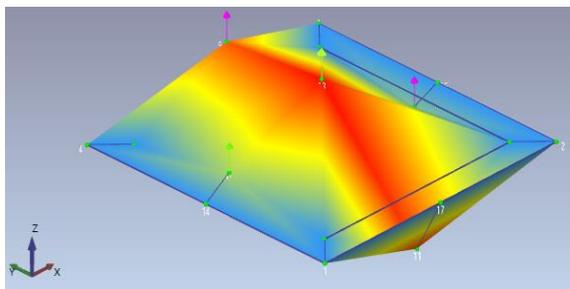


(d) Amostras trabalhadas do nó 5

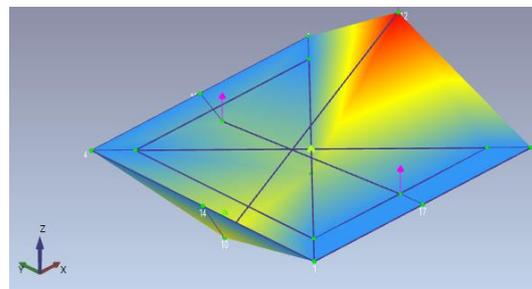


(e) Amostras trabalhadas do nó 6

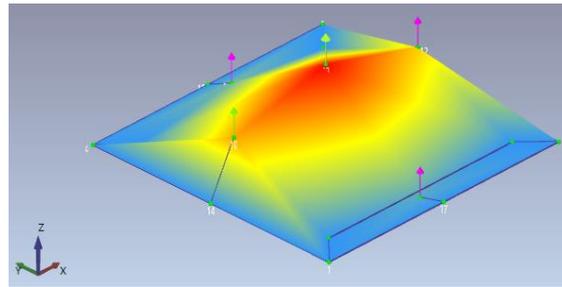
Figura 4.4 – Estrutura do sinal amostrado da laje à vibração livre pelo Sistema 3, repetição #1



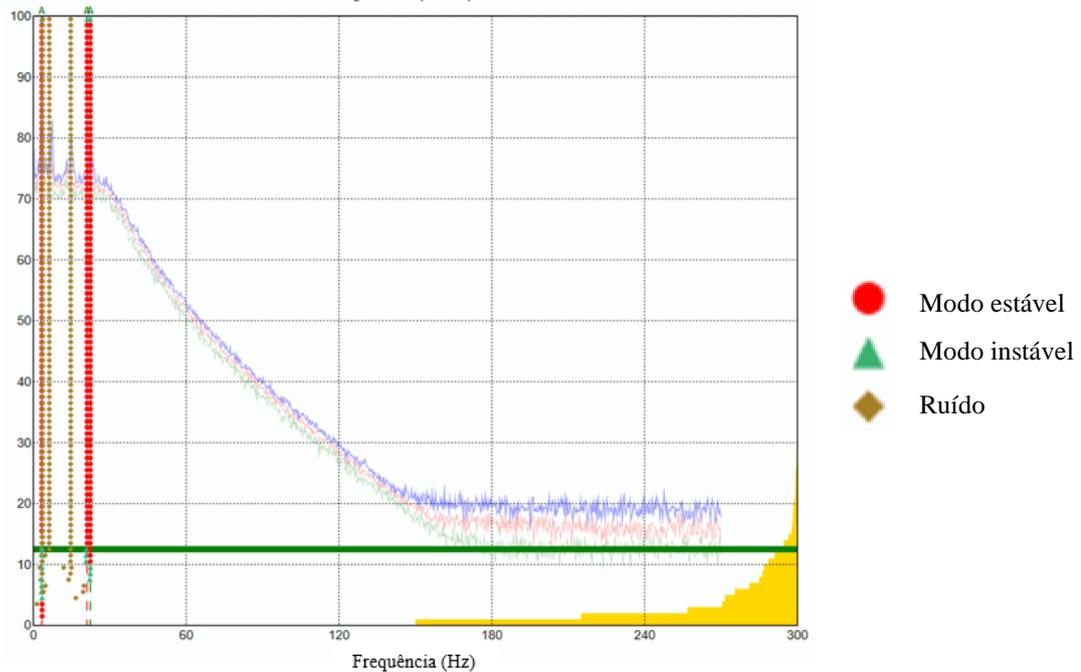
(a) 1^{ro} modo – 3.329Hz



(b) 2^{do} modo – 21.167Hz



(c) 3^{ro} modo – 22.476Hz



(d) Resultado da análise SSI – UPC

Figura 4.5 – Resultado e modos identificados da laje à vibração livre pelo Sistema 3, repetição #1

Pelos três modos de vibração obtidos, vê-se que, novamente, o modo de 3.3Hz foi identificado, possuindo equivalência direta entre o primeiro modo experimental e o primeiro modo numérico. Tal fato é suportado não só pelo valor numérico da frequência, mas pela semelhança visual dos modos de vibração, com elevados valores de deslocamento em todo o comprimento central da laje. No entanto, nota-se que um dos graus de liberdade da deformada modal numérica associada ao primeiro modo identificado apresentou uma defasagem inesperada em relação aos demais graus de liberdade. Novamente, tal fato pode ser devido aos efeitos anteriormente comentados em relação à introdução de ruídos artificiais indesejados durante a fase de pré-processamento.

Já o 3^{ro} modo numérico apresenta equivalências com o segundo e terceiro modos identificados em termos de valor numérico da frequência. A deformada modal numérica apresenta semelhanças maiores ao terceiro modo numérico, com os maiores deslocamentos se concentrando no ponto central da laje, e valores consideravelmente menores em todas as demais partes da laje. Assim, é razoável considerar que o terceiro modo experimental equivale ao terceiro modo numérico.

É relevante comentar que a não identificação experimental do segundo modo de vibração numérico pode estar relacionada à posição em que a excitação, ou impulso, foi aplicada nestes ensaios. O segundo modo de vibração numérico apresenta uma deformada

modal com deslocamentos muito pequenos nessa região central, que pode ser considerada aproximadamente como uma região nodal, isto é, de deslocamentos nulos neste modo. Como o impulso foi aplicado por meio de um salto de uma pessoa localizada no centro da laje, pode-se argumentar que a excitação utilizada possuía baixa capacidade, ou energia, para excitar este modo.

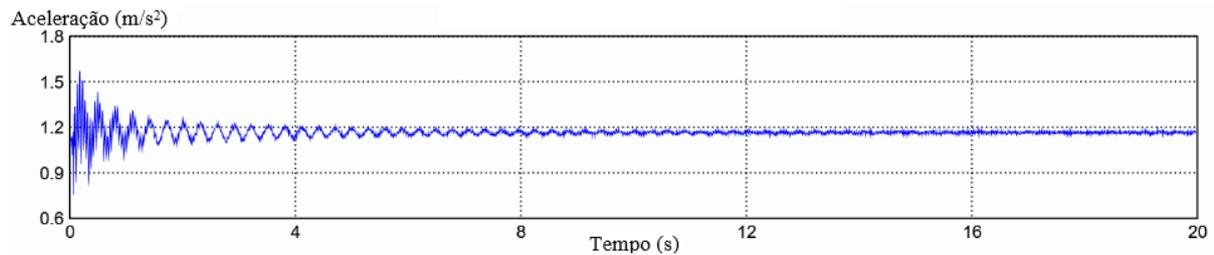
Salienta-se que a não determinação de todos modos de vibração numéricos é esperada e englobada por duas questões principais: a maneira de excitação e seu posicionamento influenciam quais modos de vibração serão mais ativados e passíveis de identificação; a modelagem não configura situação igual ao ensaio experimental quando analisados os graus de liberdade aplicados (no caso da laje, o ensaio experimental analisou apenas cinco), limitando os modos obtidos por este e causando uma inconsistência já esperada entre os resultados.

4.2.2.2. Repetição #2

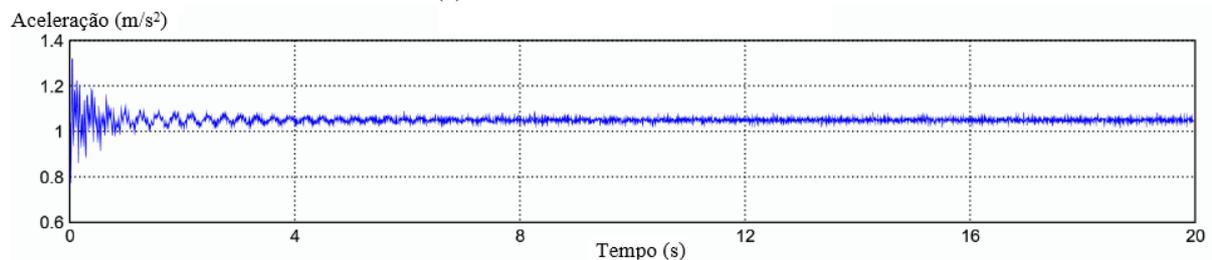
Essa repetição foi realizada a critério de consistência dos dados obtidos.

A Figura 4.6 apresenta as amostras processadas no *software* ARTeMIS, que foram obtidas pelo acelerômetro nos cinco nós usados no ensaio (Figura 3.9) e pré-tratadas.

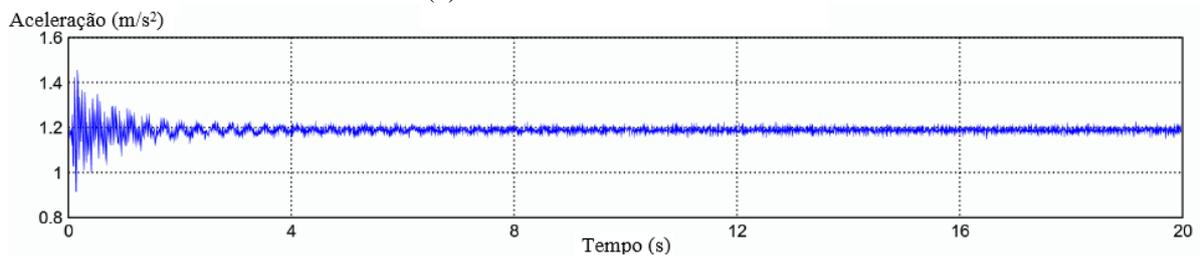
A Figura 4.7 apresenta os resultados da análise, as os modos de vibração e as frequências correspondentes para o parâmetro *decimation* estipulado de 0 – 54.1Hz.



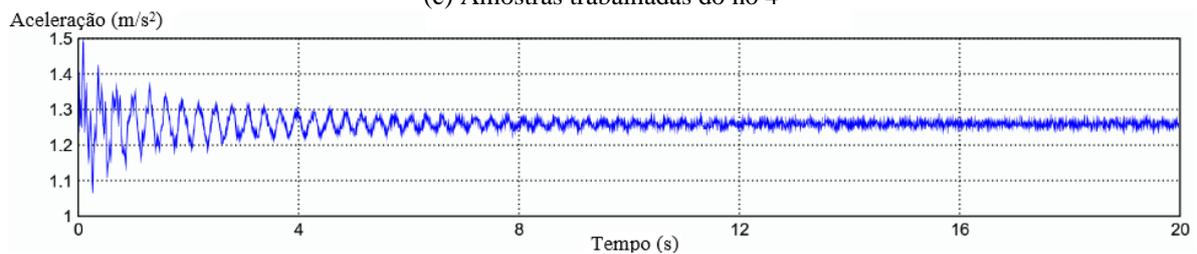
(a) Amostras trabalhadas do nó 2



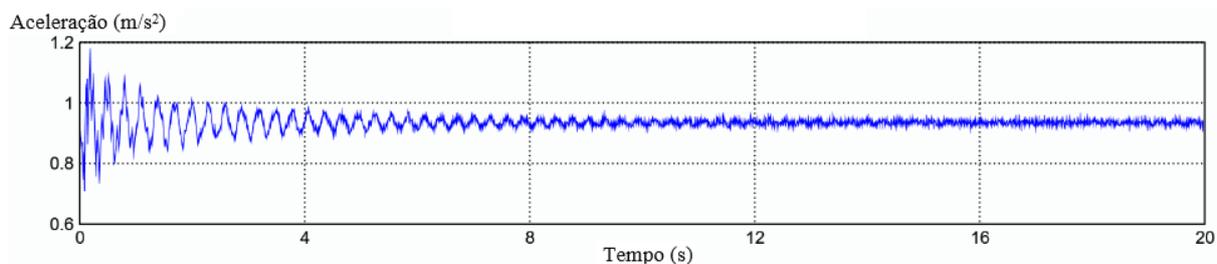
(b) Amostras trabalhadas do nó 3



(c) Amostras trabalhadas do nó 4

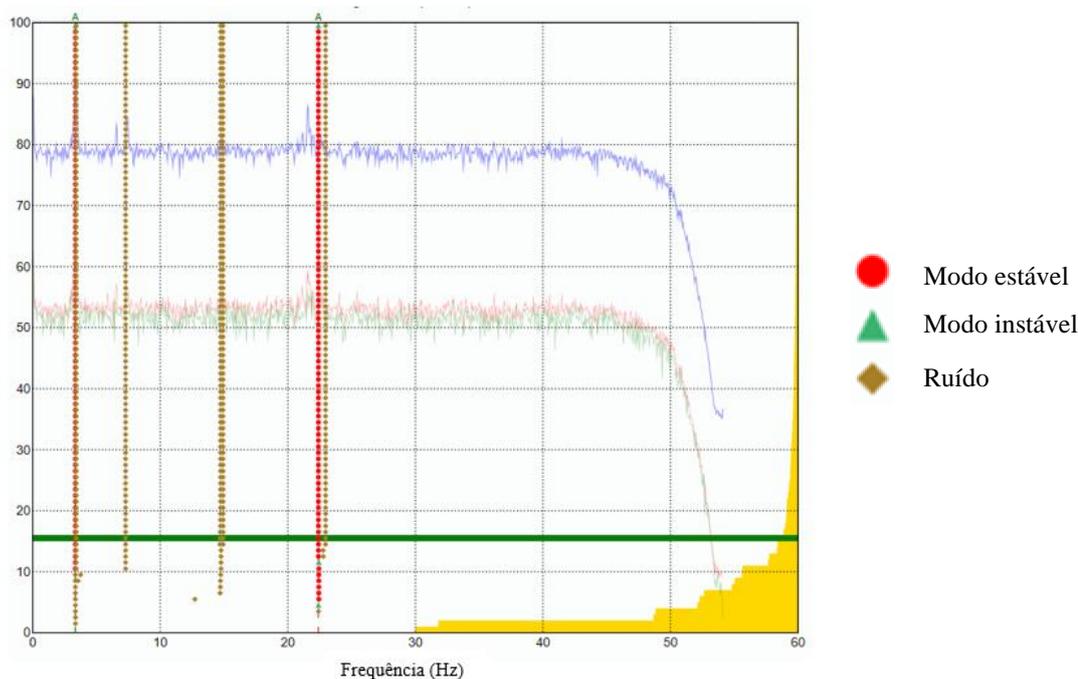


(d) Amostras trabalhadas do nó 5

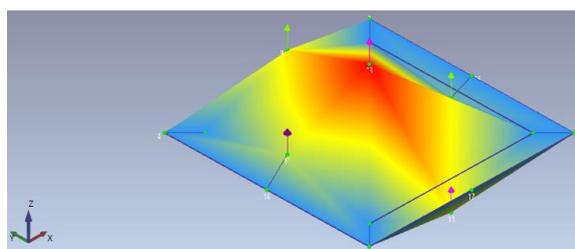


(e) Amostras trabalhadas do nó 6

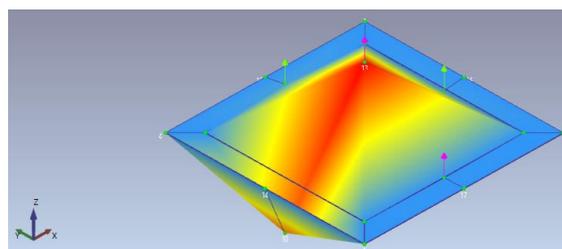
Figura 4.6 – Estrutura do sinal amostrado da laje à vibração livre pelo Sistema 3, repetição #2



(a) Resultado da análise SSI – UPC



(b) 1^o modo – 3.345Hz



(c) 2^o modo – 22.399Hz

Figura 4.7 – Resultados e modos identificados da laje à vibração livre pelo Sistema 3, repetição #2

Pela análise dos dados obtidos pelo Sistema 3 na segunda repetição, vê-se que foi possível a identificação do primeiro e do terceiro modos de vibração, onde o terceiro modo numérico teria equivalência com o terceiro identificado pelo Sistema 3. Ressalta-se que essa equivalência tem parâmetros de deformada modal e de frequência semelhantes.

Dessa forma, tendo como base os ensaios realizados e suas repetições, é presumível que o Sistema 3 é apto para uso apesar das problemáticas quanto à sincronização de dados. Ademais, nos ensaios à vibração ambiente, ainda que o Sistema 3 pode identificar aparentes dois modos de vibração, houve certa inconsistência dos dados obtidos quando em consideração a

quantidade de modos identificados, fato esse que pode ser justificado pelos motivos já dispostos e que salienta uma maior atenção aos resultados deste tipo de ensaio com o sistema desenvolvido.

4.3. ENSAIO PRELIMINAR

4.3.1. Ensaio de vibração ambiente

A Figura 4.8 apresenta as amostras processadas no software ARTeMIS, que foram obtidas pelo acelerômetro nos dois nós usados no ensaio com o sistema convencional, nós 4 e 5 (Figura 3.14), e pré-tratadas. Ressalva-se que os ensaios utilizando-se do sistema convencional não foram realizados na mesma data que os ensaios com o Sistema 3.

A Figura 4.9 apresenta os resultados da análise, as os modos de vibração e as frequências correspondentes para o parâmetro *decimation* estipulado de 0 – 50Hz.

A Tabela 4.4 apresenta os resultados de todas as frequências dos modos de vibração obtidos para o ensaio em questão.

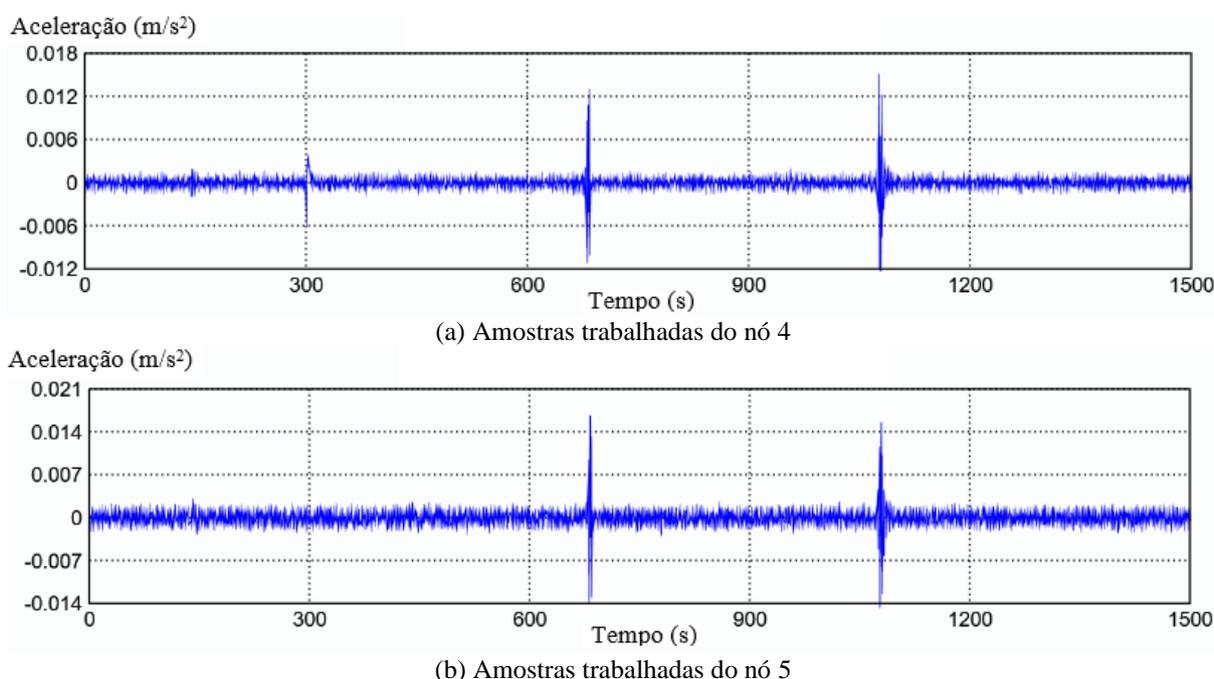
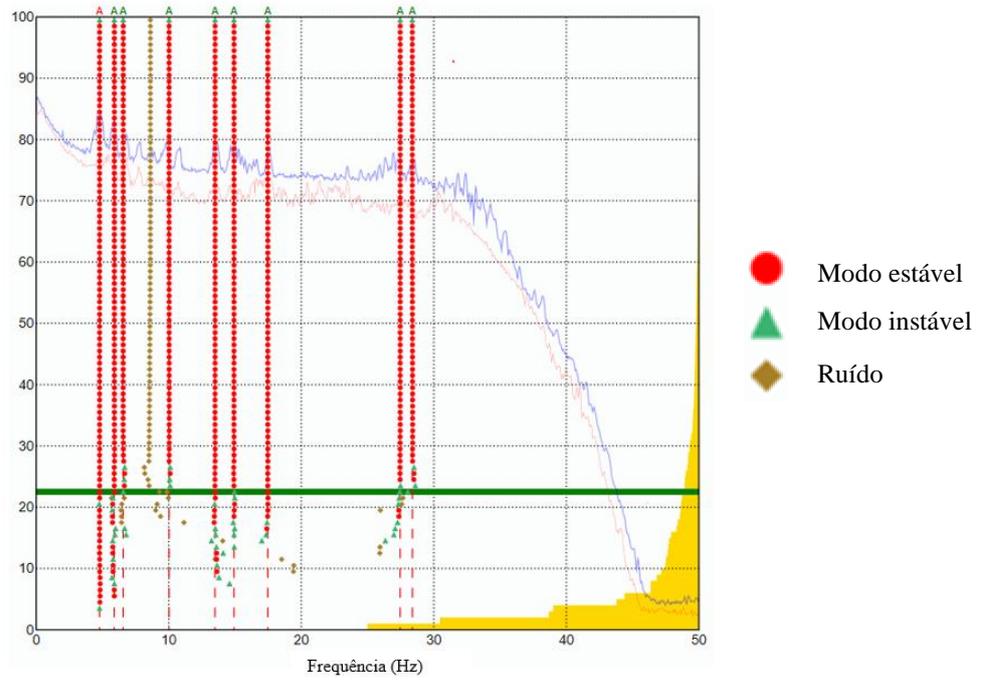
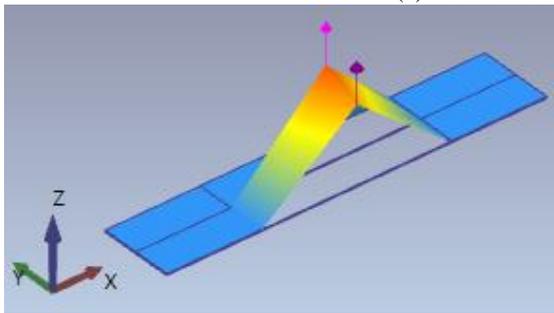


Figura 4.8 – Estrutura do sinal amostrado à vibração ambiente pelo sistema convencional

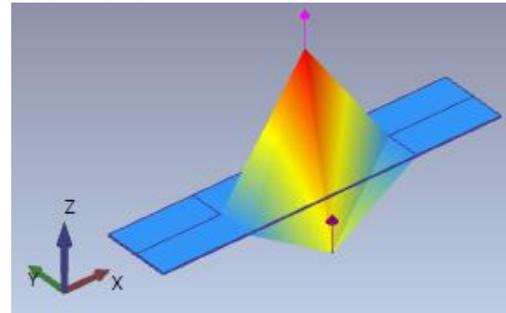
Os picos presentes na Figura 4.8 dizem respeito à passagem do metrô no outro tabuleiro da estrutura da ponte, não conectado ao estudado que não pelos pilares na região do apoio, nas extremidades do vão. Dessa forma, a ponte acaba por não se comportar em vibração ambiente durante todo o ensaio devido à presença dessa excitação indireta, devendo-se excluir esses trechos excitados pelo metrô para se ter o ensaio de fato à vibração ambiente (Figura 4.10). Os resultados quando em excitação indireta (Figura 4.9) apresenta frequências de modos de vibração que se equiparam a algumas da modelagem, ainda que configure um ensaio à vibração forçada, como é uma possível correspondência entre os modos 1 e 7 (Tabela 4.4) obtidos com o ensaio em questão com os modos 6 e 17 (Tabela 3.2) da modelagem, respectivamente.



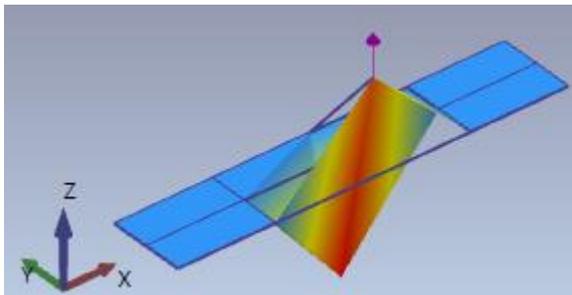
(a) Resultado da análise SSP - UPC



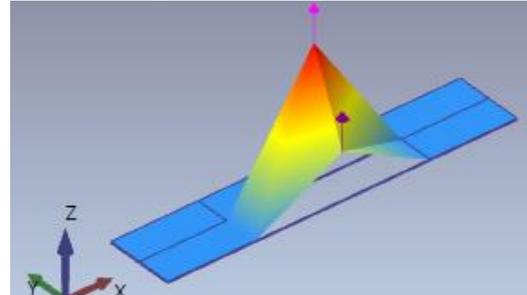
(b) 1^o modo – 4.780Hz



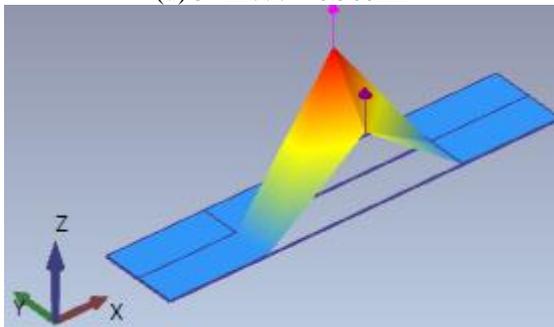
(c) 2^o modo – 5.882Hz



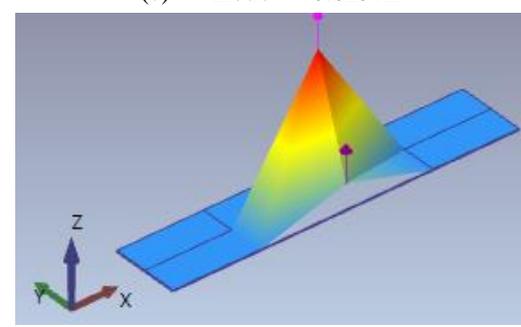
(d) 3^o modo – 6.560Hz



(e) 4^o modo – 10.025Hz



(f) 5^o modo - 13.492Hz



(g) 6^o modo – 14.919Hz

Figura 4.9 – Resultados a análise SSI-UPC e os primeiros modos identificados à vibração ambiente pelo sistema convencional com os dados da passagem do metrô na outra plataforma

Tabela 4.4 – Todas as frequências dos modos de vibração à vibração ambiente obtidos pelo ensaio com o sistema convencional

Modo de vibração	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Frequência (Hz)	4.780	5.882	6.560	10.025	13.492	14.919	17.470	27.458	28.383

Ressalta-se que, conforme é observado na Figura 4.10, só foi possível obter os modos de vibração devido à passagem do metrô no outro tabuleiro, resultando em 9 modos de vibração identificados. Quando analisados os dados sem qualquer excitação, há apenas uma frequência obtida, referente ao próprio ruído do sistema convencional.

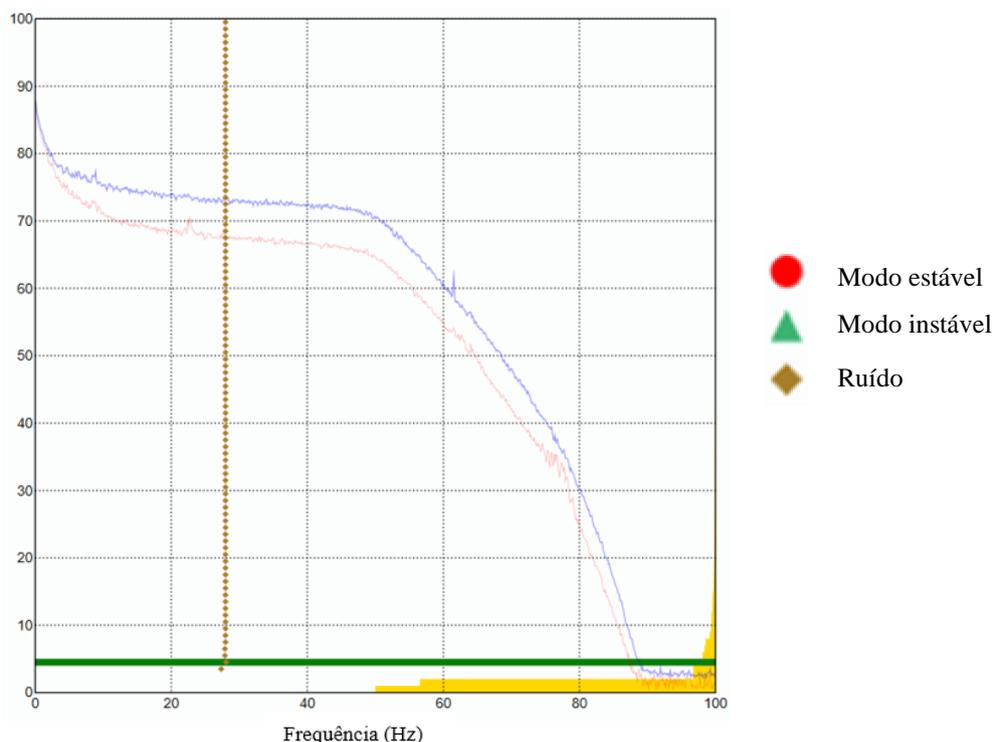
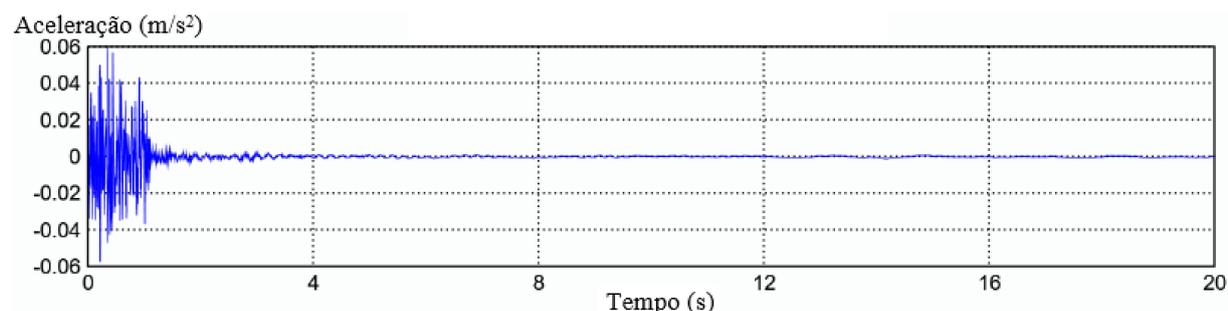


Figura 4.10 – Resultado e modos identificados à vibração ambiente pelo sistema convencional sem os dados da passagem do metrô na outra plataforma

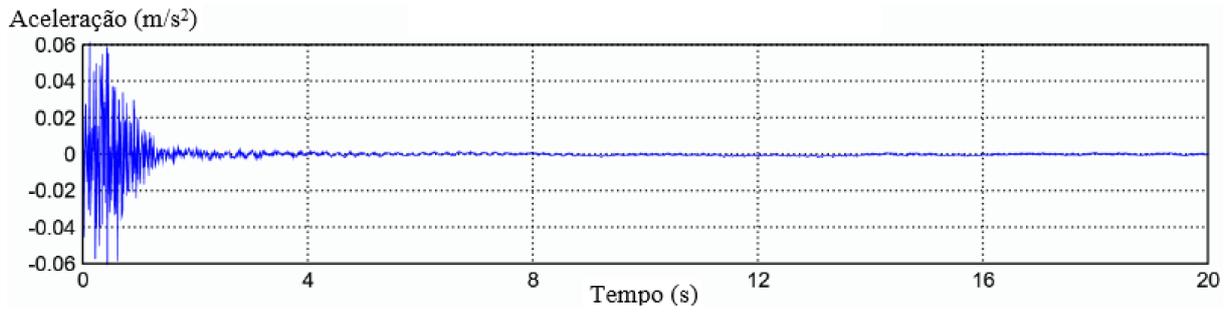
4.3.2. Ensaios de vibração livre

A Figura 4.11 apresenta as amostras processadas no software ARTeMIS, que foram obtidas pelo acelerômetro nos dois nós usados no ensaio com o sistema convencional, nós 4 e 5 (Figura 3.14), e pré-tratadas.

A Figura 4.12 apresenta os resultados da análise, as os modos de vibração e as frequências correspondentes para o parâmetro *decimation* estipulado de 0 – 100Hz.

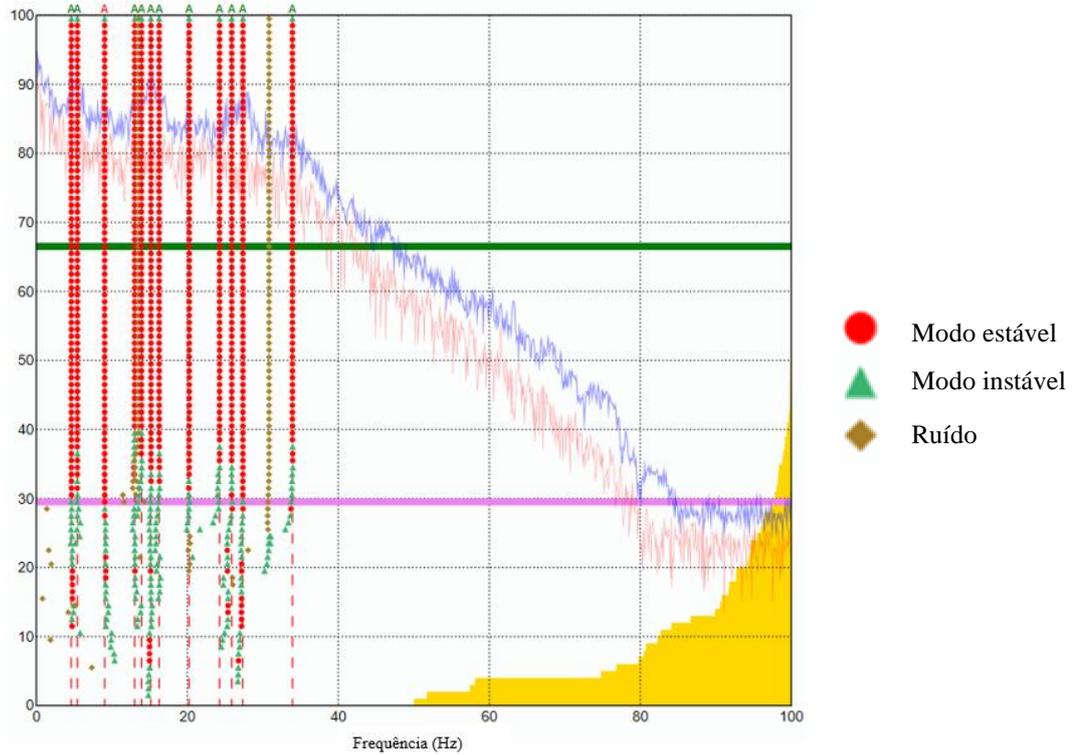


(a) Amostras trabalhadas do nó 4

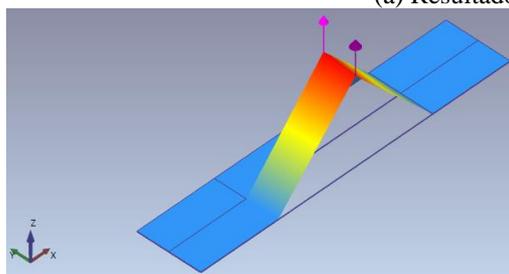


(b) Amostras trabalhadas do nó 5

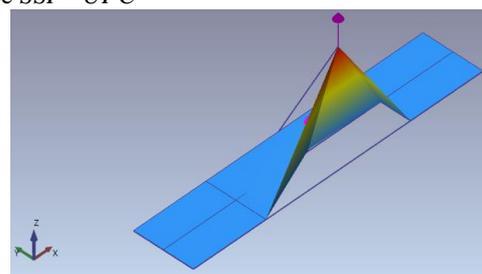
Figura 4.11 – Estrutura do sinal amostrado à vibração livre pelo sistema convencional



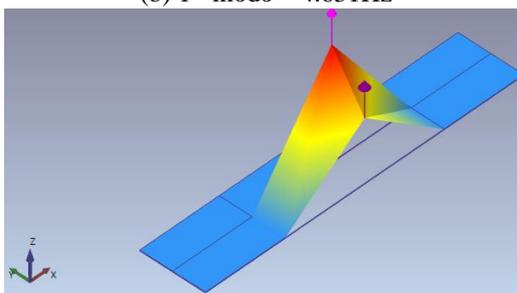
(a) Resultado da análise SSI – UPC



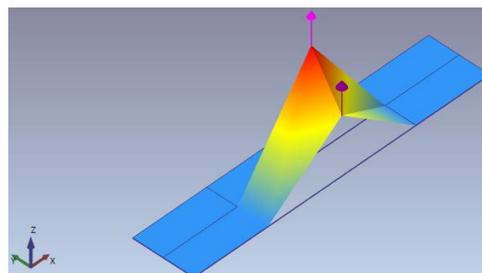
(b) 1^{ro} modo – 4.631Hz



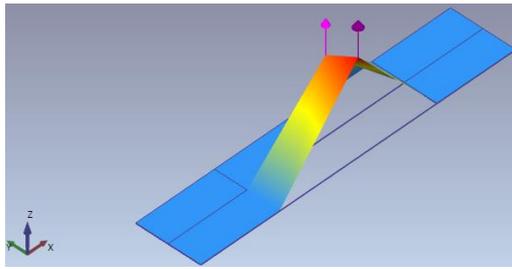
(c) 2^{do} modo – 5.340Hz



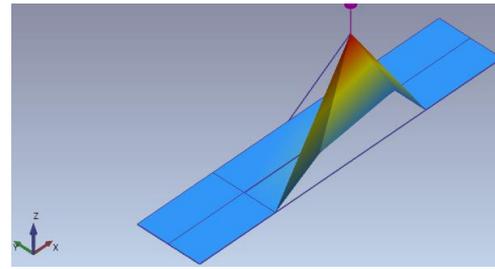
(d) 3^{ro} modo – 9.044Hz



(e) 4^{to} modo – 13.016Hz



(f) 5^o modo – 13.924Hz



(g) 6^o modo – 15.161Hz

Figura 4.12 – Resultados e os seis primeiros modos identificados à vibração livre pelo sistema convencional

A Tabela 4.5 apresenta as frequências dos modos de vibração obtidos. A diferença de resultados entre a modelagem e o ensaio com o sistema convencional pode ser explicada pelas simplificações na execução da modelagem e pelo fato de que esta foi realizada com base no projeto, de modo que, ao longo da vida útil da estrutura, suas frequências de vibração podem se alterar, assim como suas relações de rigidez. Além, o sistema convencional foi executado apenas em dois pontos da estrutura, o que pode representar uma amostragem não suficiente para expressar em sua completude o comportamento da estrutura e seus modos de vibração.

Apesar de tais pontuações, vê-se que a maioria das frequências dos modos de vibrações da modelagem possui provável correspondência com sistema convencional, como ocorre entre os modos 1, 3, 4, 7, 8, 9 e 10 (Tabela 4.5) e os modos da modelagem 6, 10, 15, 16, 29, 31 e 32 (Tabela 3.2), respectivamente. Assevera-se que não foi possível captar os dados referentes aos modos de frequência inferior a 4.6Hz, correspondentes aos modos de maiores participações modais. Tal fato pode ter justificativa, além dos fatores já pontuados, nas configurações de pré-processamento que podem não ser as ideais para a estrutura em questão.

Ademais, os resultados obtidos nesse capítulo servem, também, para potencialmente retroalimentar e para calibrar a modelagem, embora tal atividade esteja fora do escopo deste projeto.

Tabela 4.5 – Todas as frequências dos modos de vibração à vibração livre obtidos pelo ensaio com o sistema convencional

Modo de vibração	1	2	3	4	5	6
Frequência (Hz)	4.631	5.430	9.044	13.016	13.924	15.161
Modo de vibração	7	8	9	10	11	12
Frequência (Hz)	16.264	20.235	24.256	25.878	27.332	33.914

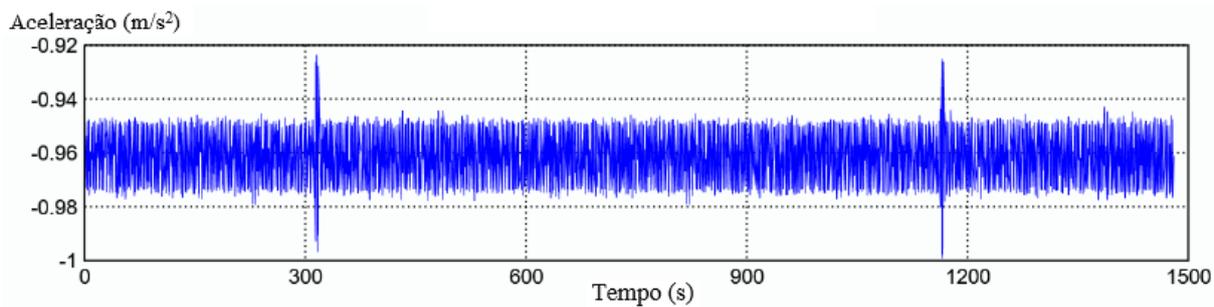
4.4. ENSAIO FINAL

4.4.1. Ensaio de vibração ambiente

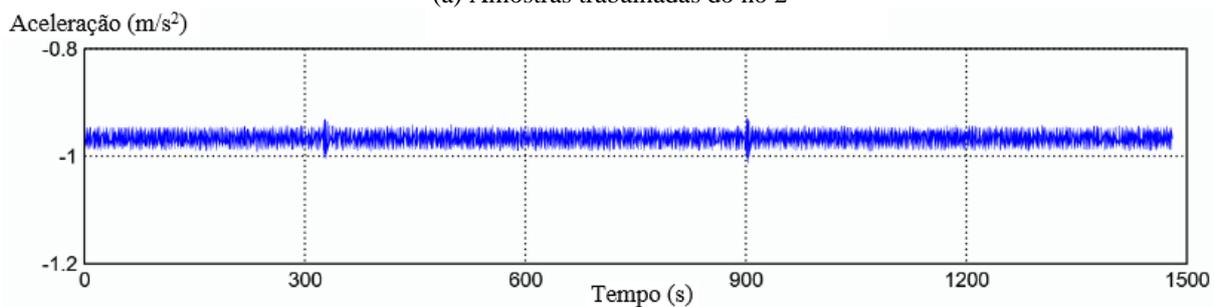
A Figura 4.13 apresenta as amostras processadas no *software* ARTEMIS, que foram obtidas pelo acelerômetro nos dois nós usados no ensaio com o Sistema 3 (Figura 3.14) e pré-tratadas.

Nessas amostras, percebe-se, novamente, a presença de dois picos de sinais, devido à passagem do metrô no tabuleiro ao lado do estudado, que geram os modos de vibração apresentados na Figura 4.14. Já os resultados quando analisados apenas as amostras sem qualquer pico não apresentam qualquer sinal estável de modo de vibração, apenas de ruído do próprio sistema, conforme se observa na Figura 4.15, assim como ocorreu com o sistema convencional.

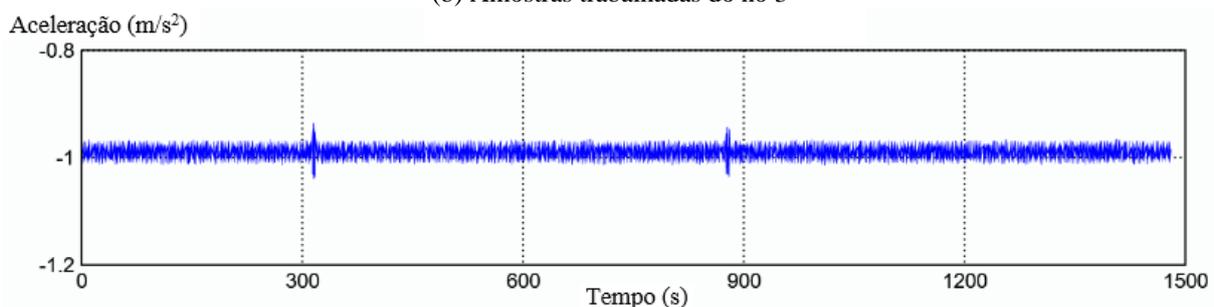
A Figura 4.14 apresenta os resultados da análise, as os modos de vibração e as frequências correspondentes para o parâmetro *decimation* estipulado de 0 – 53.3Hz.



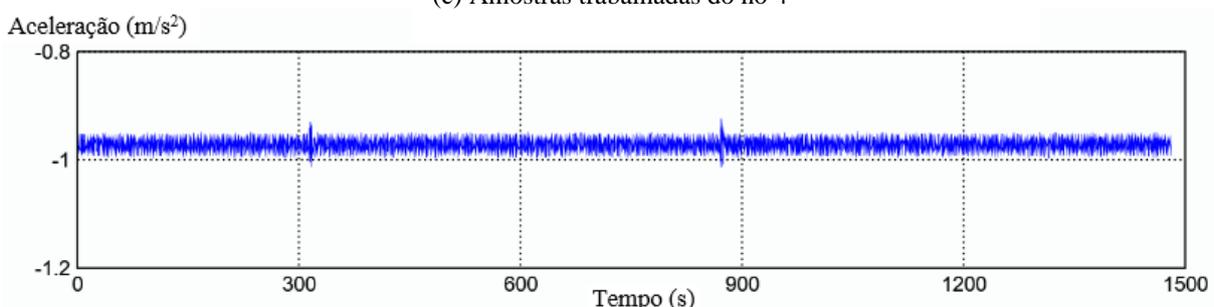
(a) Amostras trabalhadas do nó 2



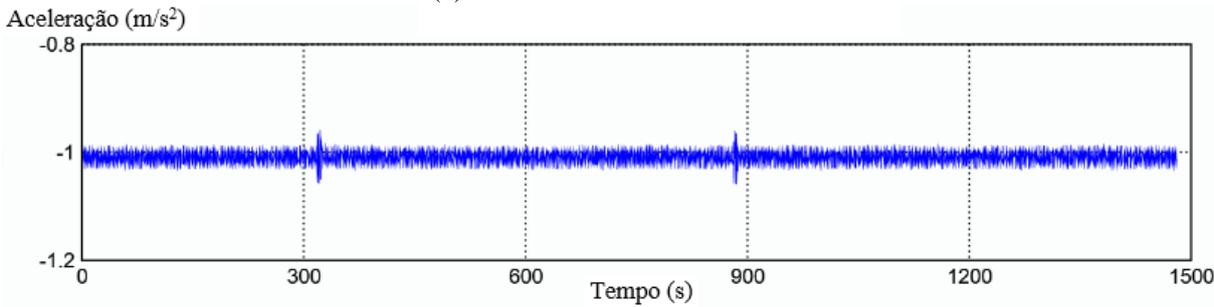
(b) Amostras trabalhadas do nó 3



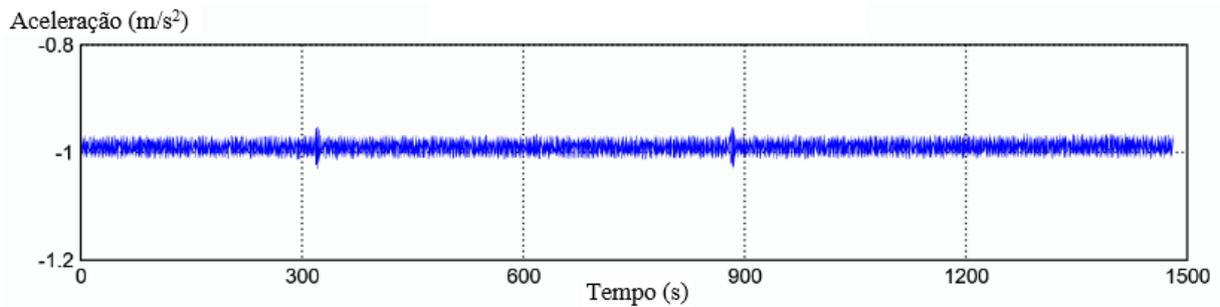
(c) Amostras trabalhadas do nó 4



(d) Amostras trabalhadas do nó 5

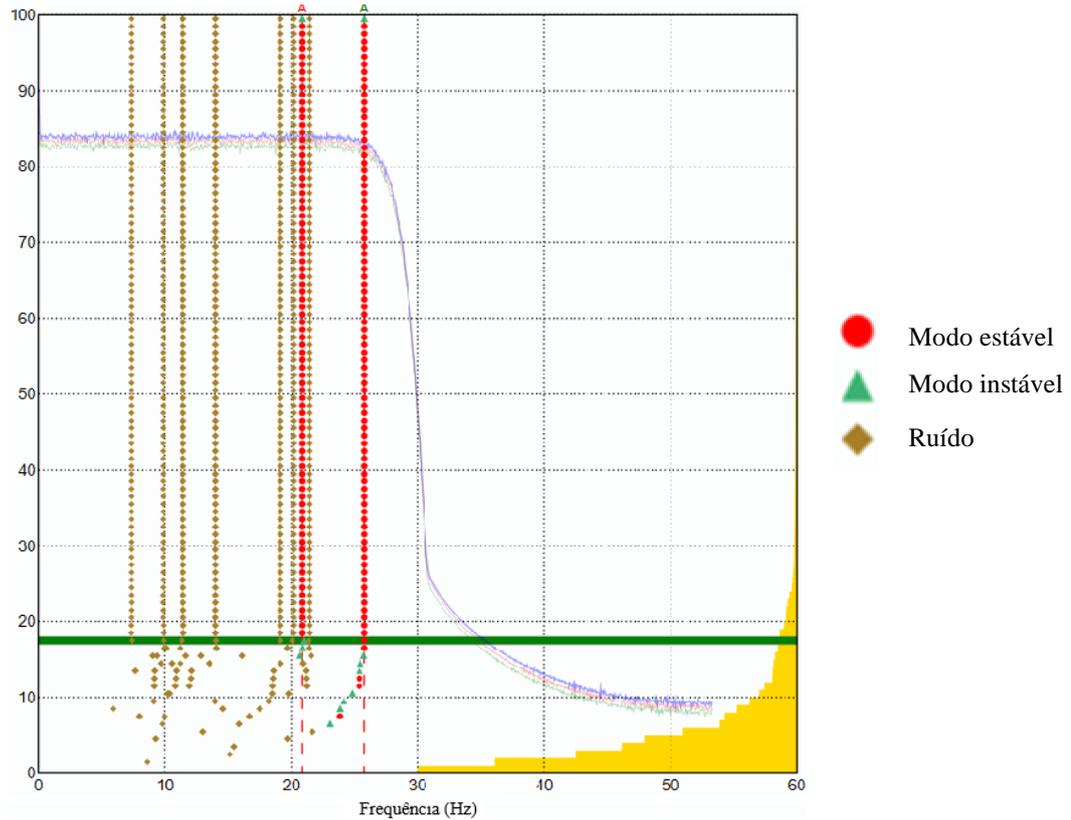


(e) Amostras trabalhadas do nó 6

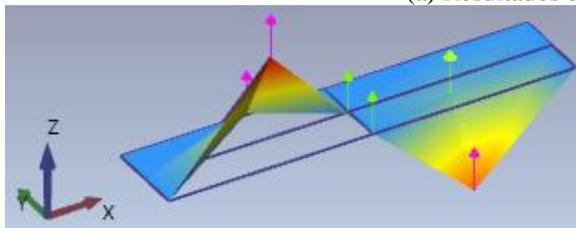


(f) Amostras trabalhadas do nó 7

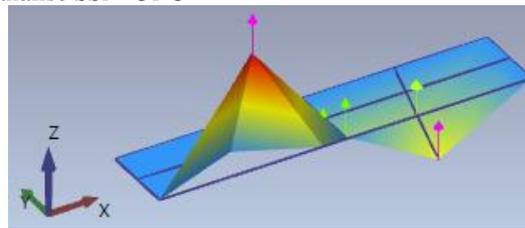
Figura 4.13 – Estrutura do sinal amostrado à vibração ambiente pelo Sistema 3



(a) Resultados da análise SSI - UPC



(b) 1º modo – 20.850Hz



(c) 2º modo – 25.777 Hz

Figura 4.14 – Resultados da análise SSI-UPC e modos identificados à vibração ambiente pelo Sistema 3 com os dados da passagem do metrô na outra plataforma

A Tabela 4.6 apresenta as frequências dos modos de vibração obtidos nesse ensaio. Algo notável é a quantidade de modos, inferior aos resultados quando em foco o ensaio convencional (Tabela 4.4). Além, não há qualquer correspondência clara entre as frequências dos modos obtidos com os identificados pelo sistema convencional e pela modelagem.

Tal fato pode ter causa: nos ruídos do sistema, englobando também o inserido pelo pré-tratamento e o da própria característica do acelerômetro de baixo custo (Tabela 2.4); no código

não refinado do sistema (ANEXO B); e no processamento do sinal que pode não ser o mais adequado para a situação.

Chama-se atenção, também, à quantidade de ruídos presentes nos resultados do ensaio (Figura 4.14), sendo nitidamente superior em quantidade aos resultados do sistema convencional (Figura 4.10).

Tabela 4.6 – Todas as frequências dos modos de vibração à vibração ambiente obtidas pelo ensaio com o Sistema 3

Modo de vibração	1	2
Frequência (Hz)	20.850	25.777

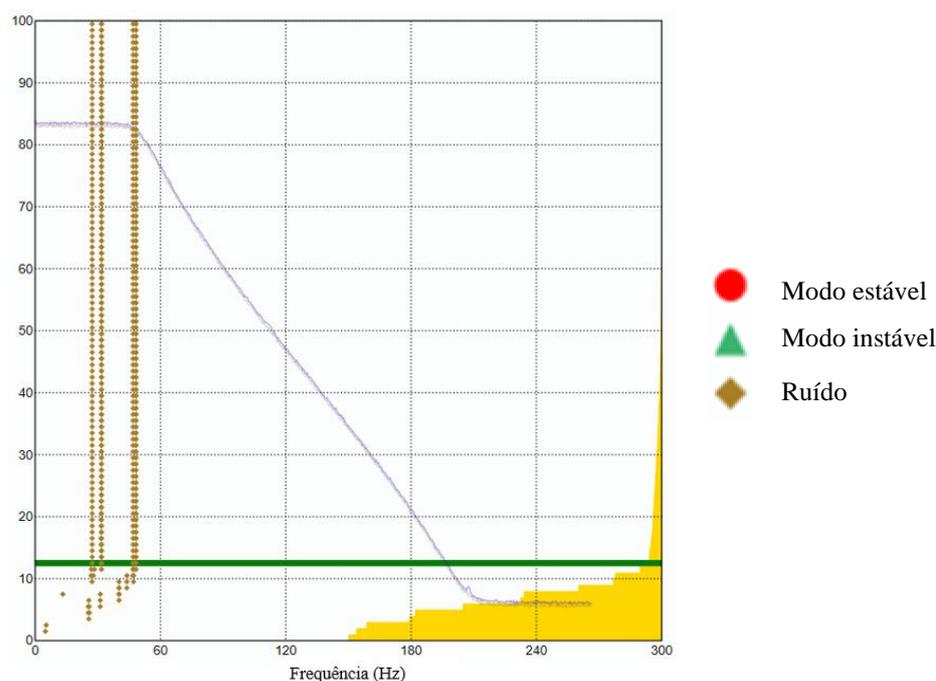


Figura 4.15 – Resultados da análise SSI - UPC e modos identificados à vibração ambiente pelo Sistema 3 sem os dados da passagem do metrô na outra plataforma

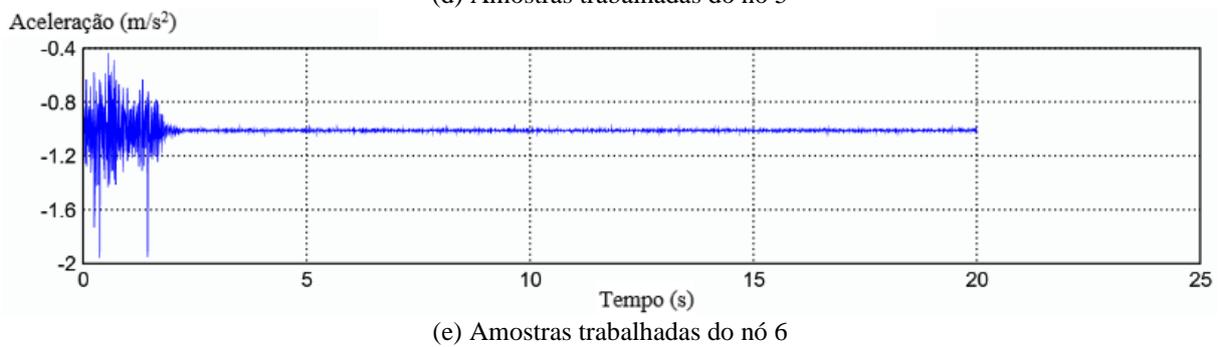
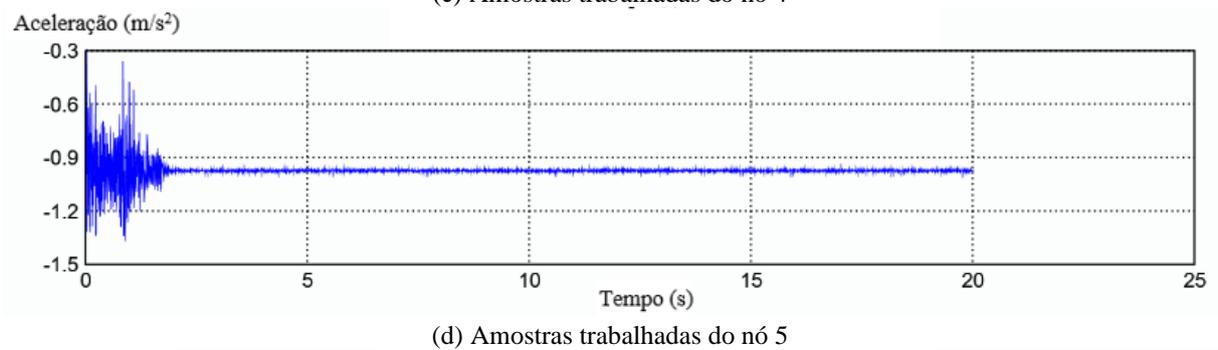
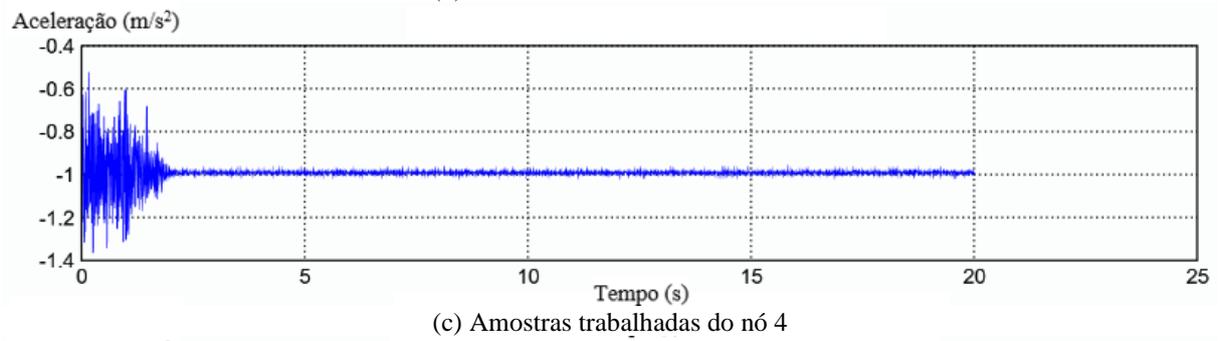
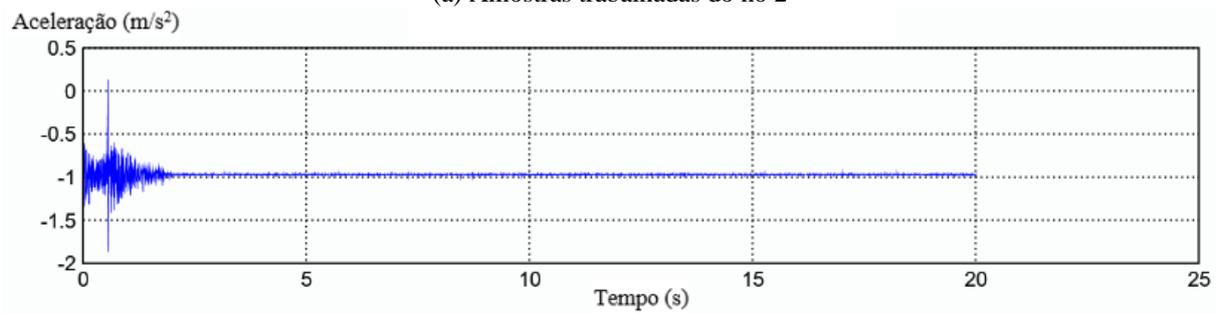
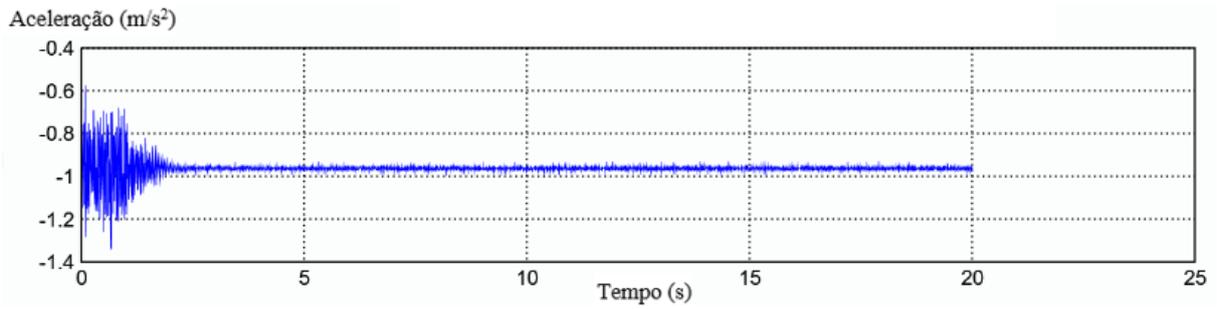
4.4.2. Ensaios de vibração livre

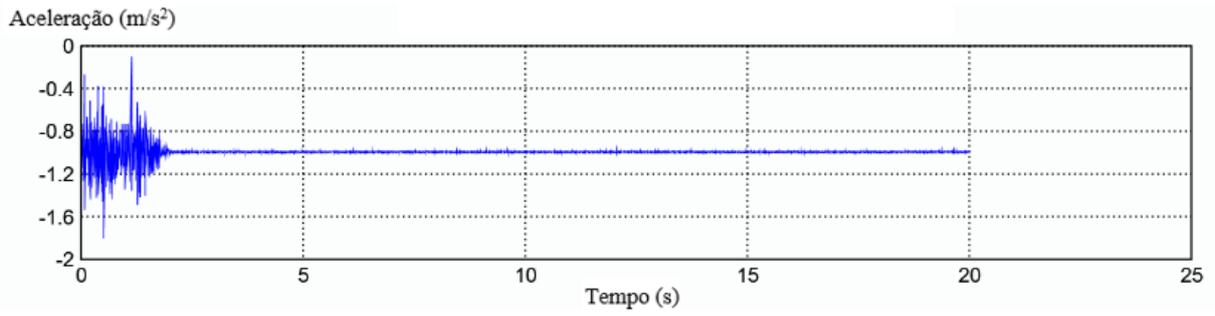
4.4.2.1. Repetição #1

A Figura 4.16 apresenta as amostras processadas no *software* ARTeMIS, que foram obtidas pelo acelerômetro nos seis nós usados no ensaio de vibração livre com o Sistema 3 (Figura 3.14) e pré-tratadas.

A Figura 4.17 apresenta os resultados da análise, as os modos de vibração e as frequências correspondentes para o parâmetro *decimation* estipulado de 0 – 52.4Hz, constituindo 9 modos de vibração identificados.

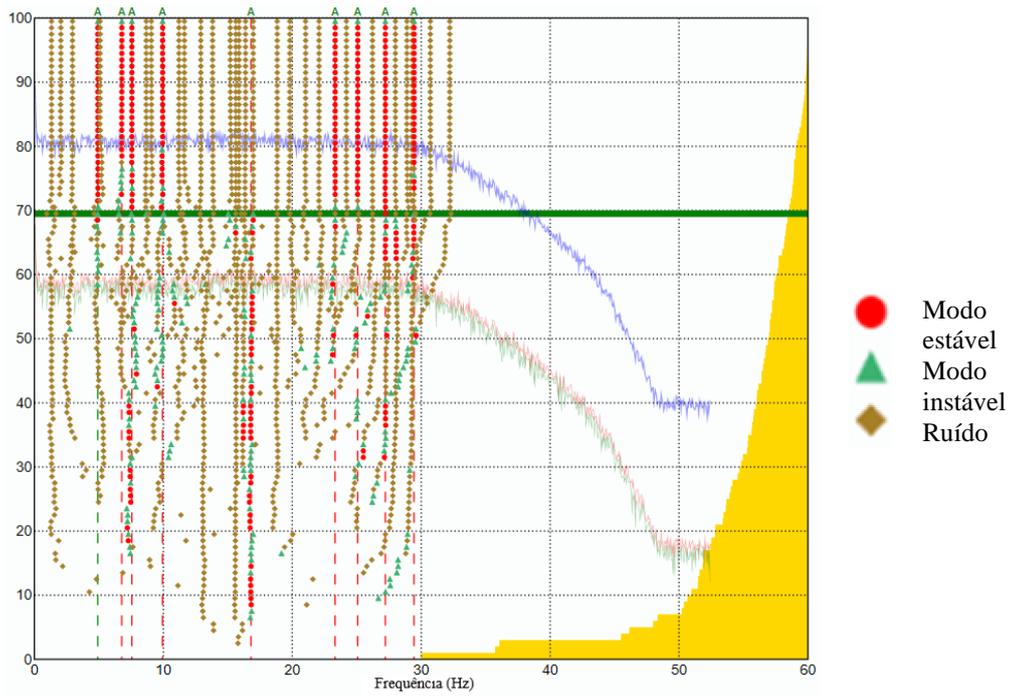
A Tabela 4.7 apresenta as frequências dos modos de vibração obtidos nesse ensaio.



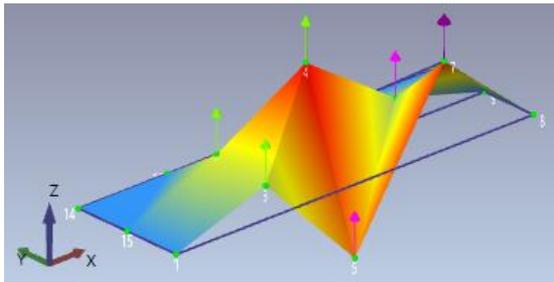


(f) Amostras trabalhadas do nó 7

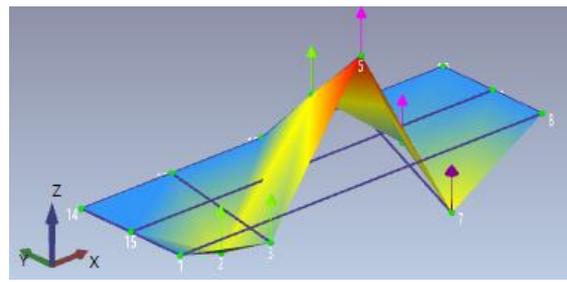
Figura 4.16 – Estrutura do sinal amostrado à vibração livre pelo Sistema 3, repetição #1



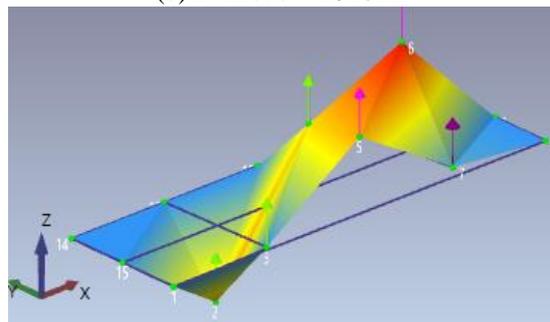
(a) Resultado da análise SSI – UPC



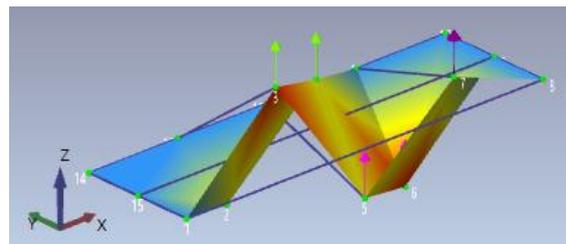
(b) 1^{ro} modo – 4.913Hz



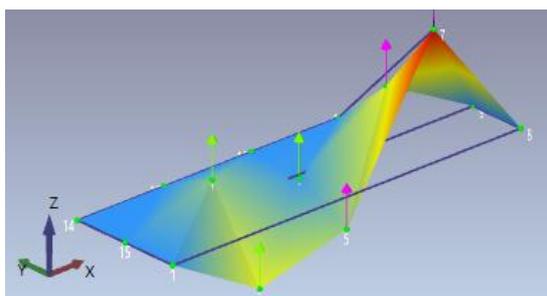
(c) 2^{do} modo – 6.774Hz



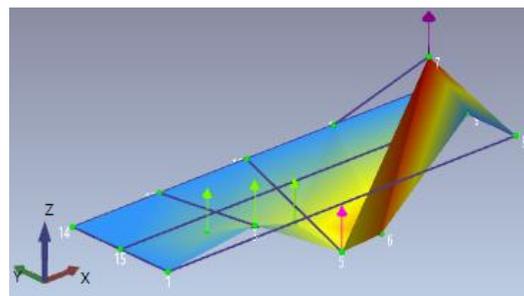
(d) 3^{ro} modo – 7.558Hz



(e) 4^{to} modo – 9.929Hz



(f) 5^o modo – 16.795Hz



(g) 6^o modo – 23.327Hz

Figura 4.17 – Resultados e alguns modos identificados à vibração livre pelo Sistema 3, repetição #1

Tabela 4.7 – Todas as frequências dos modos de vibração à vibração livre, repetição #1, obtidas pelo ensaio com o Sistema 3

Modo de vibração	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Frequência (Hz)	4.913	6.774	7.558	9.929	16.795	23.327	25.072	27.219	29.441

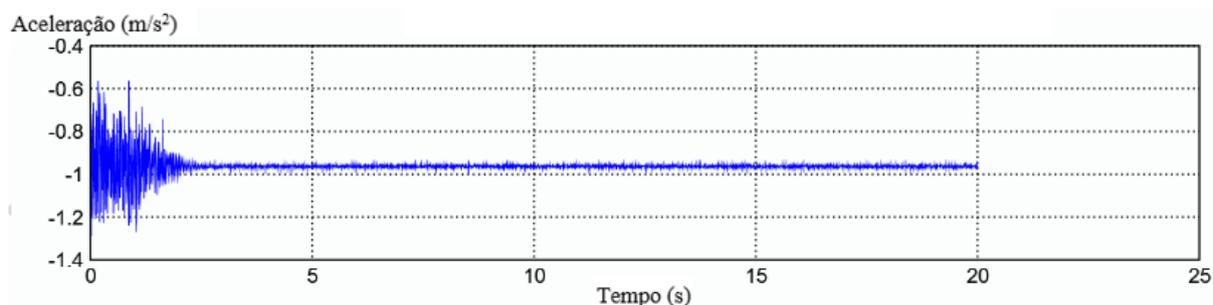
Apesar de todas as problemáticas já pontuadas sobre os dados, ao se comparar os resultados entre o Sistema 3 (Figura 4.17), o sistema convencional (Figura 4.12) e a modelagem (Figura 3.13 e Tabela 3.2), é observável que algumas frequências dos modos de vibração foram semelhantes, sendo elas as correspondentes aos modos 1, 5 e 7 do ensaio em questão (Tabela 4.7) com os modos 7, 16 e 32 da modelagem (Tabela 3.2). Tal provável correspondência é asseverada pelos modos de participação modal apresentados na modelagem para os modos em questão, que são, respectivamente, $RY=0.27$, $UZ=0.01$ e $UZ=0.02$. Quanto aos deslocamentos da estrutura, vê-se que o primeiro modo obtido não se assemelha muito ao da modelagem, fato com possíveis causas no não sincronismo do Sistema 3.

4.4.2.2. Repetição #2

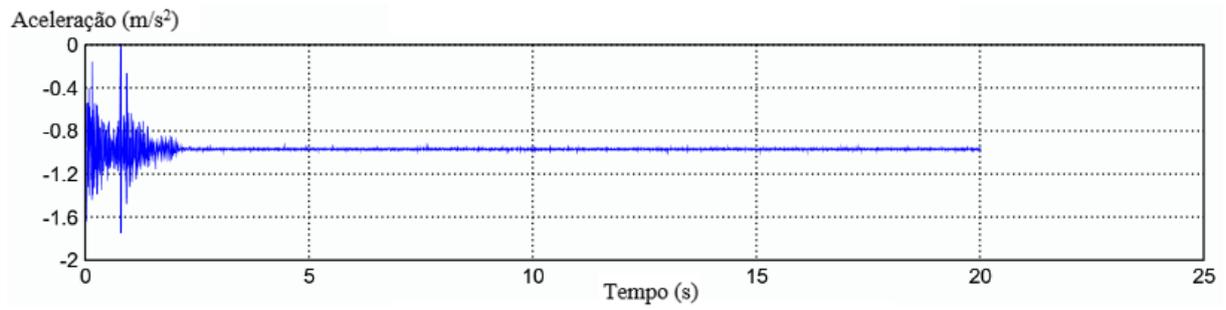
Essa repetição foi realizada a critério de consistência dos dados obtidos.

A Figura 4.18 apresenta as amostras processadas no *software* ARTEMIS, que foram obtidas pelo acelerômetro nos seis nós usados no ensaio (Figura 3.14) e pré-tratadas.

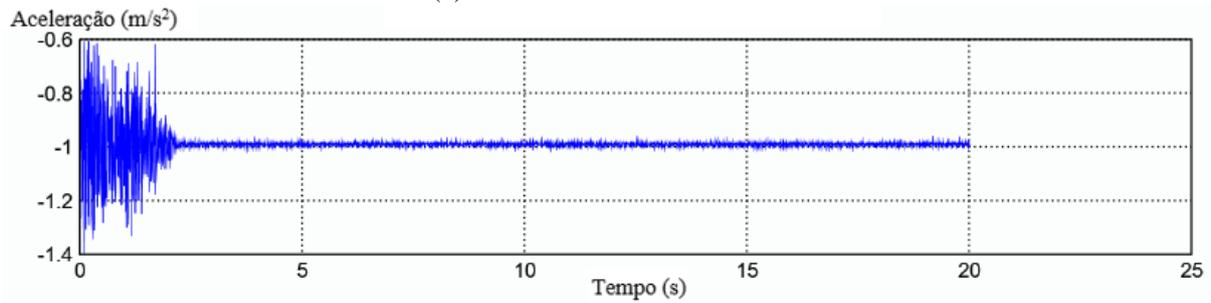
A Figura 4.19 apresenta os resultados da análise, as os modos de vibração e as frequências correspondentes para o parâmetro *decimation* estipulado de 0–52.4Hz, constituindo 11 modos de vibração identificados.



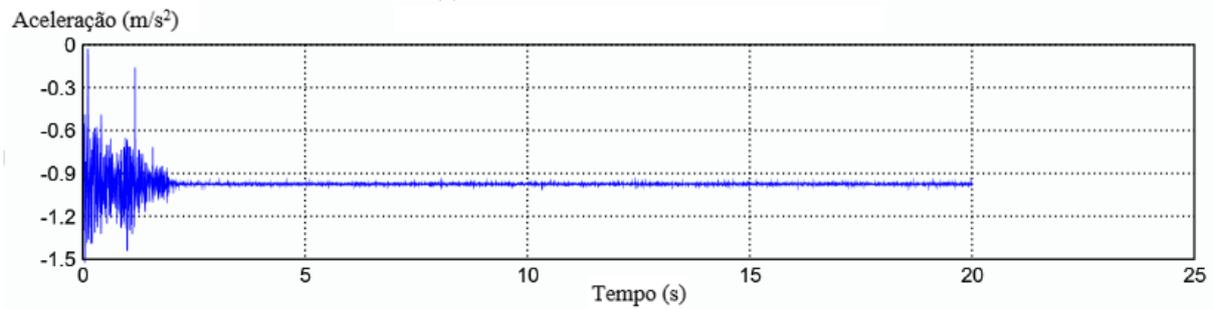
(a) Amostras trabalhadas do nó 2



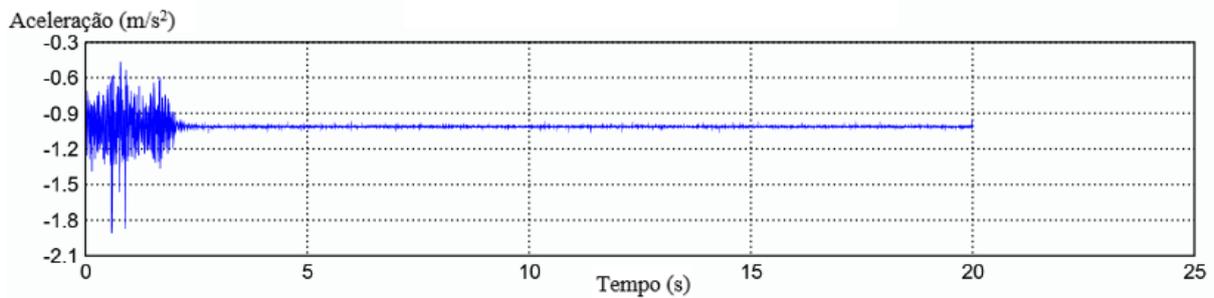
(b) Amostras trabalhadas do nó 3



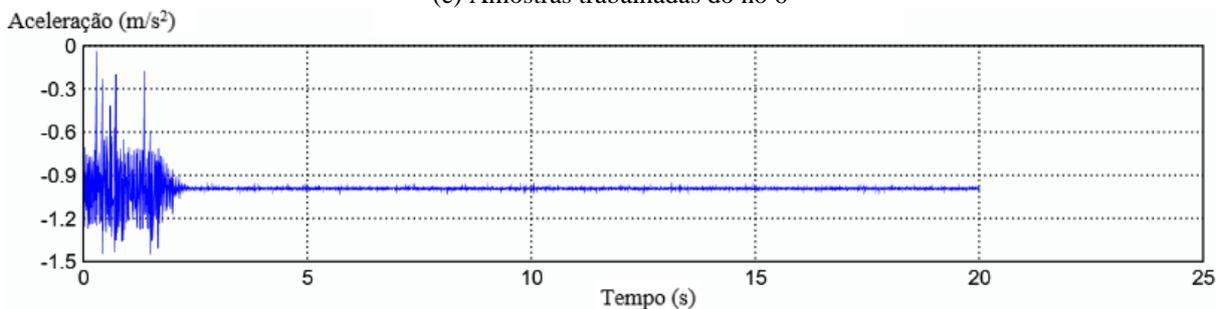
(c) Amostras trabalhadas do nó 4



(d) Amostras trabalhadas do nó 5

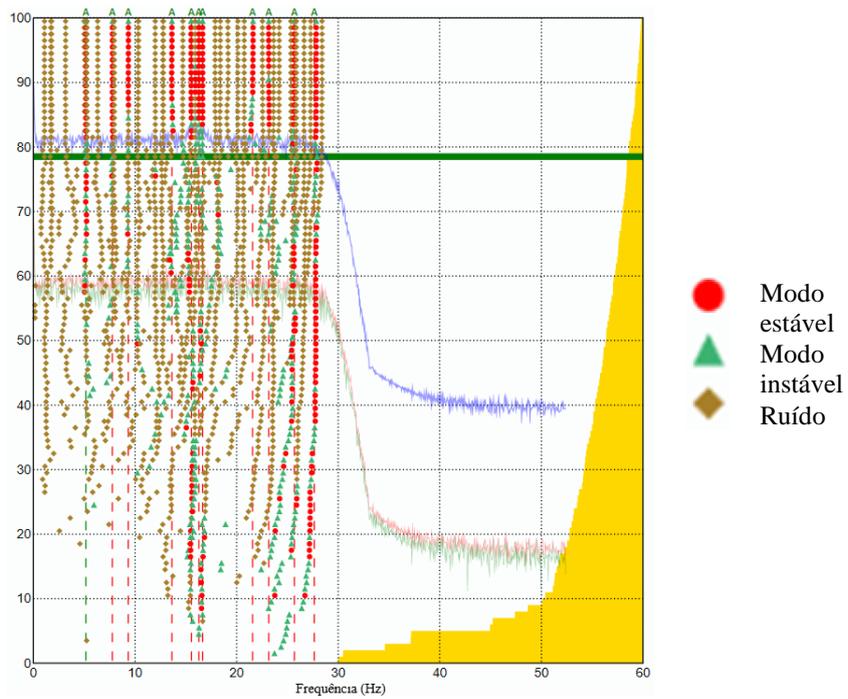


(e) Amostras trabalhadas do nó 6

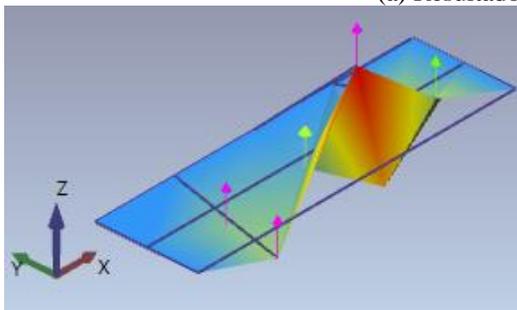


(f) Amostras trabalhadas do nó 7

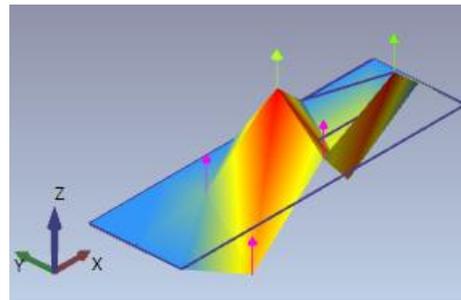
Figura 4.18 – Estrutura do sinal amostrado à vibração livre pelo Sistema 3, repetição #2



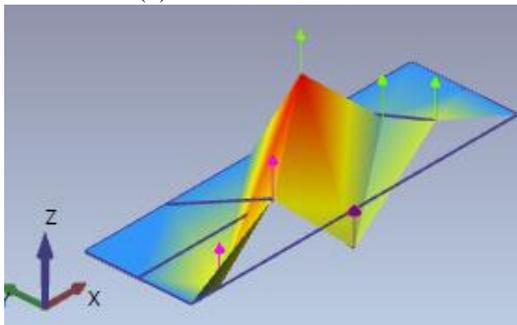
(a) Resultado da análise SSI – UPC



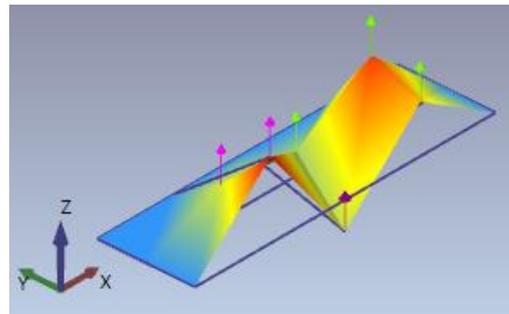
(b) 1^o modo – 5.176Hz



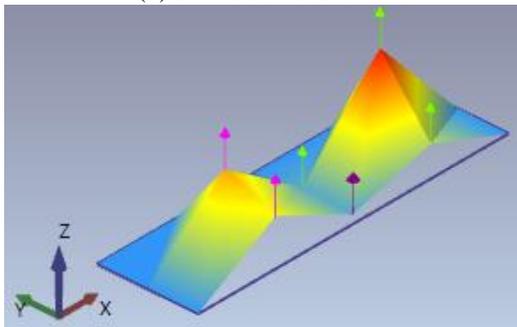
(c) 2^o modo – 7.774Hz



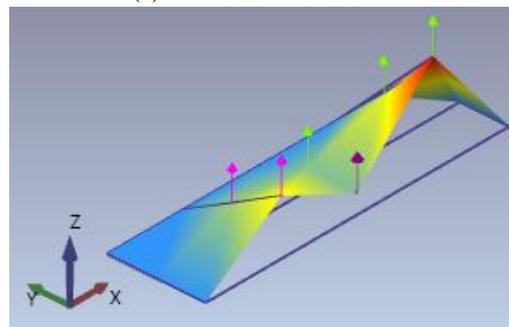
(d) 3^o modo – 9.347Hz



(e) 4^o modo – 13.637Hz



(f) 5^o modo – 15.550Hz



(g) 6^o modo – 16.656Hz

Figura 4.19 – Resultados e alguns modos identificados à vibração livre pelo Sistema 3, repetição #2

Tabela 4.8 – Todas as frequências dos modos de vibração à vibração livre, repetição #2, obtidas pelo ensaio com o Sistema 3

Modo de vibração	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Frequência (Hz)	5.176	7.774	9.347	13.637	15.550	16.287	16.656	21.576	23.176	25.693	27.656

A partir da Figura 4.19 e da Tabela 4.8 referentes à segunda repetição do ensaio à vibração livre, vê-se que há certa consistência nos resultados, onde alguns se repetiram e, além, o primeiro modo identificado pelo Sistema 3 neste ensaio apresenta um valor numérico pouco superior ao da repetição #1, além de um deslocamento semelhante. Quando comparados as frequências dos modos obtidos neste ensaio com a modelagem, vê-se uma possível correspondência entre as frequências dos modos obtidos pelo Sistema 3: 1, 7 e 10 (Tabela 4.8) com os modos 7, 16 e 32 da modelagem (Tabela 3.2).

Ademais, os prováveis modos identificados são os mesmos que os encontrados na repetição #1 do ensaio à vibração livre do Sistema 3, apresentando-o como um sistema passível consistente e passível de ser usado em estruturas robustas apesar das problemáticas já citadas oriundas, em grande parte, dos ruídos e da dessincronização dos dados.

4.4.3. Resultados gerais

A Tabela 4.9 traz um compilado dos resultados obtidos, referentes às frequências dos modos de vibração da modelagem, do sistema convencional e do Sistema 3 em todos os ensaios que foram realizados.

Primeiramente, observa-se que, para a estrutura da ponte metroviária, os resultados do ensaio ambiente pelo Sistema 3 não se mostraram favoráveis à identificação dos modos de frequência inferior a 20Hz. Contudo, o segundo modo identificado neste ensaio apresenta semelhança numérica à frequência dos décimos modos aferidos pelo sistema convencional na vibração livre e pelo Sistema 3, repetição #2, mostrando que há potencial no ensaio do tipo ambiente pelo Sistema 3.

Quanto aos ensaios à vibração livre do Sistema 3, vê-se que, entre as repetições, há certa consistência nos valores, principalmente quando em foco o primeiro modo de vibração e outros dois modos com fatores de participação modal expressivos, identificados em ambas as repetições. O fato de esses modos dos ensaios à vibração livre terem sido classificados é um indicativo de que o Sistema 3, composto por seis nós com acelerômetro comunicados por rádio frequência, é passível de aferir os modos de vibração de estruturas robustas, inclusive quando comparado com a modelagem numérica.

Repara-se, também, que excetuando-se os modos de vibração tratados, sequer o sistema convencional possui correspondência clara com os dados da modelagem, principalmente quando em foco os modos de frequências baixas, entre 0 e 4Hz.

Por fim, ressalta-se, novamente, que as comparações entre os modos de vibração identificados pelos sistemas convencional e desenvolvido e pela modelagem é a critério de identificação de tendências, não configurando dados absolutos ou estritamente corretos e representativos da realidade, dado que: a modelagem é pautada em considerações de projeto, podendo não ser representativas da situação da ponte no dia do ensaio; o sistema convencional foi executado em apenas dois pontos da estrutura da ponte e não é o mais apropriado para a análise feita, podendo não ser capaz de identificar, em sua completude, os modos de vibração e frequências correspondentes; o Sistema 3 possui ruídos e dessincronizações expressivos da própria especificação do sistema e outros introduzidos pelo pré-tratamento dos dados.

Há, ainda, a dificuldade de se identificar com exatidão o instante em que é iniciada a vibração livre, o que é agravado pela robustez da estrutura que possui amortecimento rápido das vibrações, restringindo o intervalo passível de se obter e de se analisar como vibração livre. Além disso, há a etapa de processamento de dados, as considerações e parâmetros definidos para as análises no ARTeMIS que podem não ter sido as melhores possíveis para as situações vistas.

Tabela 4.9 – Resultados gerais para as frequências dos primeiros modos de vibração referentes à cada ensaio e da modelagem organizados na ordem em que foram identificados

Ensaio Modo de vibração	Modelagem	Vibração ambiente		Vibração livre		
		S. C. ^{1*}	S. 3 ^{2*}	S.C.	S. 3 – R#1 ³	S. 3 – R#2 ⁴
1	0.473	4.780	20.850	4.631	4.913	5.176
2	0.490	5.882	25.777	5.430	6.774	7.774
3	0.821	6.560	-	9.044	7.558	9.347
4	1.464	10.025	-	13.016	9.929	13.637
5	2.022	13.492	-	13.924	16.795	15.550
6	4.835	14.919	-	15.161	23.327	16.287
7	4.964	17.470	-	16.264	25.02	16.656
8	5.865	27.458	-	20.235	27.219	21.576
9	8.030	28.383	-	24.256	29.441	23.176
10	8.702	-	-	25.878	-	25.693
11	10.341	-	-	27.332	-	27.656
12	10.856	-	-	33.914	-	-
13	11.622	-	-	-	-	-
14	12.411	-	-	-	-	-
15	12.740	-	-	-	-	-
16	16.616	-	-	-	-	-
17	17.443	-	-	-	-	-
18	17.727	-	-	-	-	-
19	17.895	-	-	-	-	-
20	17.945	-	-	-	-	-
21	18.079	-	-	-	-	-
22	18.089	-	-	-	-	-
23	18.461	-	-	-	-	-
24	18.724	-	-	-	-	-
25	19.431	-	-	-	-	-
26	19.866	-	-	-	-	-
27	19.907	-	-	-	-	-
28	20.018	-	-	-	-	-
29	20.028	-	-	-	-	-
30	21.519	-	-	-	-	-
31	24.229	-	-	-	-	-
32	25.106	-	-	-	-	-

¹ Sistema Convencional

² Sistema 3

³ Sistema 3, repetição #1

⁴ Sistema 3, repetição #2

* Indica que o ensaio não foi, de fato, realizado à vibração ambiente

5. CONCLUSÃO

Este trabalho desenvolveu e avaliou a performance de sistemas de baixo custo e de código aberto para a monitorização de grandes estruturas, que neste estudo fora uma ponte metroviária, além de ser validado em um modelo estrutural de parâmetros conhecidos.

Sobre desenvolvimento das três versões do sistema, em nós isolados, cabeados e sem fio, pode-se concluir que o sistema final desenvolvido compôs um sistema com amostragem média de dados de 539Hz, além de ser, entre os três executados, o mais complexo em termos de código, mas que apresentou facilidades e êxito quanto à implantação para ensaio em estruturas e ao acionamento conjunto dos acelerômetros.

Sobre a validação do sistema sem fio (Sistema 3) em um modelo estrutural, viu-se que foi possível validá-lo, dado que identificou as frequências de vibração referentes ao primeiro e o terceiro modos de vibração da estrutura, de modo que o segundo modo provavelmente não foi de possível aferição devido a presença de um nó modal na região da excitação e por limitações quando comparado a modelagem numérica, o ensaio real e seus graus de liberdade. O sistema desenvolvido apresentou outros modos de vibração que podem ter origem em problemáticas de sincronização dos dados devido a duas situações: o pré-tratamento, oriundo da dispersão dos dados ao se igualar o mesmo número de amostras para todos os nós; e a execução do código no Arduino, que é desempenhado a taxas diferentes entre os nós, ainda que todos os sistemas foram construídos de maneira análoga.

Sobre a monitoração de uma ponte metroviária submetida à vibrações ambiente e livre após passagem de metrô, conclui-se que o Sistema 3 foi capaz de identificar três modos de vibração de fatores de participação modal de 27%, 1% e 2%, apresentando-se como promissor. Ressalva-se que tanto o Sistema 3 quanto o convencional, nos ensaios realizados, não foram capazes de averiguar todos os modos de vibração da estrutura modelada, fato esse já esperado, apesar de terem identificado diversos modos de vibração. Quando em foco os maiores fatores de participação modal, contidos entre as frequências de 0 e de 4Hz, nenhum dos sistemas utilizados foi capaz de aferir tal gama de frequências. Isso porque houve duas problemáticas que envolveram fortemente o trabalho: a sensibilidade dos sensores utilizados, que tem influência tanto no ruído quanto na capacidade de se identificar pequenas frequências de vibração; e a questão que envolve o sistema de aquisição, por sobre sua taxa de amostragem não constante e dessincronizações inseridas na etapa de pré-tratamento. Este último problema se apresenta apenas no Sistema 3 desenvolvido.

Dessa forma, obteve-se sucesso com o Sistema 3 tanto em estruturas rígidas quanto flexíveis, de modo de esta última configura a situação em que o sistema melhor teve desempenho. Contudo, ainda há questões a serem solucionadas e que são sugestões para trabalhos futuros, como a busca por uma amostragem estável de dados em todos os nós e a definição de um método seguro para a determinação do intervalo de tempo em que a estrutura vibra à vibração livre.

6. REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 9452:2019. 2019. **Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto - Procedimento.**
- Aktan A., Catbas F., Grimmelsman K., Pervizpour K. 2002. **Development of a Model Health Monitoring Guide for Major Bridges.** Drexel University. Intelligent Infrastructure Institute. Contract/order no. DTFH61-01-P-00374.
- Arduíno®. 2020. Arduino Store. Disponível em:<<https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>>.
- Assis W. S. de. 2007. **Sistemas computacionais de apoio à monitoração de estruturas de engenharia civil.** Tese (doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. São Paulo.
- Basto C.; Pelà L.; Chacón R. 2016. **Open-source digital technologies for low-cost monitoring of historical constructions.** Journal of Cultural Heritage, vol. 25, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.12.003>.
- Beards C. F. 2003. **Structural Vibration: Analysis and Damping.** London: BUTTERWORTH HEINEMANN.
- Bedon C.; Bergamo E.; Izzi, M.; Noè, S. 2018. **Prototyping and Validation of MEMS Accelerometers for Structural Health Monitoring - The Case Study of the Pietratagliata Cable-Stayed Bridge.** Journal of Sensor and Actuator Networks, <https://doi.org/10.3390/jsan7030030>.
- Brasiliano A. 2005. **Identificação de Sistemas e Atualização de Modelos Numéricos com Vistas à Avaliação da Integridade Estrutural.** Tese (doutorado). Universidade de Brasília. Distrito Federal. Publicação PECC.TD-06A/05.
- Brownjohn J. M. 2007. **Structural health monitoring of civil infrastructure.** Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 365, no. 1851, JSTOR, www.jstor.org/stable/25190455.
- Carmona J. E. C. 2011. **Plataforma de ensaios dinâmicos: estudos preliminares, projeto e construção.** Dissertação (mestrado) em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-008A/11, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília. Distrito Federal.
- Carmona J. E. C.; Avila S. M.; Doz, G. 2017. **Proposal of a tuned mass damper with friction damping to control excessive floor vibrations.** Engineering Structures, vol. 148, ELSEVIER, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.06.022>.
- Centro-Oeste Brasil. (s.d.). **Características técnicas dos Trens-Unidade Elétricos (TUEs).** Disponível em <<http://doc.brazilia.jor.br/TrMetro/Metro-DF-TUEs-Trens-unidade-Mafersa.shtml>>. Último acesso em abril de 2021.
- Chopra A. K. 2012. **Dynamics of Structures Theory and Applications to Earthquake Engineering.** 4th ed. United States of America: PEARSON EDUCATION.

- Clough R. W. 2003. **Dynamics of Structures**. 3rd ed. United States of America.
- Cunha A.; Caetano. E.; Magalhães, F.; Moutinho, C. 2012. **Recent perspectives in dynamic testing and monitoring of bridges**. Structural Control Health Monitoring. Wiley Online Library, <https://doi.org/10.1002/stc.1516>.
- Cunha A.; Caetano E.; Moutinho C.; Magalhães, F. 2018. **Continuous dynamic monitoring of large civil infrastructures**. 11th National Congress on Experimental Mechanics. Porto/Portugal 4-7 November 2018. Ed. J.F. Silva Gomes. INEGI/FEUP. ISBN: 978-989-20-8771-9.
- Doebbling S. W.; Farrar, C. R.; Prime, M. B.; Shevitz, D. W. 1996. **Damage identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review**. <https://doi.org/10.2172/249299>.
- Doebbling S. W.; Farrar C. R.; Prime M. B. 1998. **A Summary Review Of Vibration-Based Damage Identification Methods**. Engineering Analysis Group. Los Alamos, NM.
- Fédération Internationale du Béton (fib). 2003. **Monitoring and safety evaluation of existing concrete structures**. State-of-art report. Bulletin 22.
- Feng D.; Feng M. Q. 2017. **Computer vision for SHM of civil structures: From dynamic response measurement to damage detection - A review**. Engineering Structures, vol. 156, ELSEVIER, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.11.018>.
- Fenves S. J.; Veletsos, A. S.; Siess, C. P. 1962. **Dynamic Studies of the AASHO Road Test Bridges**. Highwat Research Board Conference on the AASHO Road Test.
- Galdino E.; Cury A. 2016. **Development of low-cost wireless acceletometer for structural dynamic monitoring**. XXXVII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering. Brasília, Brazil.
- Speckmann H.; Henrich R. **Structural health monitoring (SHM) - Overview on technologies under development**. Disponível em: https://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/aerospace/563_henrich.pdf. Último acesso em maio de 2021.
- He J.; Fu Z. 2001. **Modal Analysis**. BUTTERWORTH-HEINEMANN.
- Iacono F. L.; Navarra G.; Oliva M. 2017. **Structural monitoring of 'Himera' viaduct by low-cost MEMS sensors: characterization and preliminary results**. Meccanica, vol. 52, <https://doi.org/10.1007/s11012-017-0691-4>.
- INMAN D. J. **Smart Structures: Examples and New Problems. Proceedings, 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2001)**, Uberlândia, Brazil, November 26-30, (Opening Plenary Lecture), v.12, p4-13, 2001.
- ISIS Canada. 2001. **Guidelines for Structural Health Monitoring**.
- IvenSense Inc. (2013). **MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification**. Document Number: PS-MPU-6000A-00. Revision 3.4.

- Jang S.; Jo H.; Cho S.; Mechitov K.; Rice J. A.; Sim S.; Jung H.; Yun C.; Spencer Jr. B. F.; Agha G. 2010. **Structural health monitoring of a cable-stayed bridge using smart sensor technology: deployment and evaluation**. Smart Structures and Systems, vol. 6, no. 5-6.
- Júnior E. T.; Cury A.; Júnior J. L. 2020. **Assessment of low-cost wireless sensor of structural health monitoring applications**. IBRACON Structures and Materials Journal, vol. 14, <https://doi.org/10.1590/S1983-41952021000200013>.
- Klikowicz P.; Salamak M.; Poprawa G. 2016. **Structural Health Monitoring of Urban Structures**. World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium, WMCAUS.
- Magalhães F. M. L. de. 2010. **Operational Modal Analysis For Testing And Monitoring Of Bridges And Special Structures**. Tese (doutorado). Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto, <http://hdl.handle.net/10216/59924>.
- Maio C. E. B. 2011. **Técnicas para monitoramento de integridade estrutural usando sensores e atuadores piezoelétricos**. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Dinâmica das Máquinas e Sistemas. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Matos J. C. L.; Branco, V. H. L.; Macêdo A. N.; Oliveira D. R. C. 2015. **Avaliação estrutural da ponte sobre o rio Sororó na ferrovia Carajás**. IBRACON Structures and Materials Journal, vol 8, no 2, <https://doi.org/10.1590/S1983-41952015000200006>.
- Maxim Integrated Products, Inc. 2015. **DS3231 Extremely Accurated I²C-Integrated RTC/TCXO/Crystal**. 19-5170; Rev 10; 3/15.
- Maxim Integrated Productz. 2003. **Low-Power, Slew-Rate-Limited RS-485/RS-422 Transceivers**. 19-0122; Rev 7; 6/03.
- Montoya R. A.; Azevedo A. A.; Souza R. M. de; Sampaio R.,; Neto, A. P. da C.; Bittencourt T. N. 2010. **Monitoração de pontes treliçadas nas ferrovias da Vale**. II Encontro de Ferrovias. Vitória. Espírito Santo.
- Montoya R. A.; Azevedo A. A.; Souza R. M. de; Sampaio R. A. C.; Veloso L. A. C. M. 2010. **Monitoração de Pontes de Concreto Armado e Protendido na Estrada de Ferro Carajás**. Vitória, Espírito Santo.
- Moreu F.; Li X.; Li S., Zhang D. 2018. **Technical Specifications of Structural Health Monitoring for Highway Bridges: New Chinese Structural Health Monitoring Code**. Frontiers in Built Environment, vol 4, <https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00010>.
- NORDIC SEMICONDUCTOR. 2006. **Preliminary Product Spafication Single Chip 2.4GHz Transceiver nRF24L01**.

- Nunes D. S. 2019. **Identificação de Sistemas e Detecção de Danos de Estruturas Estaiadas.** Tese (doutorado) em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília. Brasília. Distrito Federal. Publicação E.TD-12A/19.
- Oliveira T. R. R.; Souza R. M. de; Sampaio R. A. C.; Facchini M. M., Tagliarini, R. M. 2016. **Análise comparativa entre métodos experimentais e ferramentas computacionais para avaliação do comportamento dinâmico de edifícios em concreto armado.** Anais 58º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON, ISSN 2175-8182.
- Ou J.; Li H. 2010. **Structural Health Monitoring in mainland China: Review and Futures Trends.** Structural Health Monitoring, <https://doi.org/10.1177/1475921710365269>.
- Peeters B.; Maeck J.; Roeck G. D. 2000. **Excitation sources and dynamics system identification in civil engineering.** In Proceedings of the European COST F3 Conference on SYstem Identification and Strucutral Health Monitoring, Madrid, Spain.
- Peeters B.; Couvreur G.; Razinkov O.; Kündig C.; Van der Auweraer H.; De Roeck G. 2009. **Continuous monitoring of the Øresund Bridge: system and data analysis.** Structure and Infrastructure Engineering vol. 5, no. 5.
- Rabelo D. de S. 2014. **Monitoramento de integridade estrutural baseado na técnica da impedância eletromecânica incorporando compensação do efeito da variação da temperatura.** Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de concentração: Mecânica dos sólidos e vibrações. Uberlândia, Minas Gerais.
- Reda Taha, M., M., Lucero, J.. 2005. **Damage identificatio for structural health monitoring using fuzzy pattern recognition.** Engineering Structures, vol 27, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.04.018>.
- Ribeiro R. R.; Lameiras, R. M. 2019. **Evaluation of low-cost MEMS accelerometers for SHM: frequency and damping identification of civil structures.** Latin American Journal os Solids and Structures, <http://dx.doi.org/10.1590/1679-78255308>.
- Ribeiro R. R.; Sobral R. A.; Cavalcante I. B.; Veloso L. A. C. M.; Lameiras R. 2021. **Análise da Influência da Rigidez do Solo no Comportamento Dinâmico de um Modelo Numérico de uma Ponte Metroviária.** XII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas.
- Rodrigues R. 2004. **Identificação Modal Estocástica - Métodos de análise e aplicações em estruturas de engenharia civil.** Tese (doutorado). Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Universidade do Porto.
- Rytter, A. 1993. **Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures.** Dept. of Building Technology and Structural Engineering. Aalborg University. Fracture and Dynamics vol. R9314 no. 44.
- Salawu O. S.; Williams, C. 1993. **Review of full-scale dynamic testing of bridge structures.** Engng Struct, vol 17, [https://doi.org/10.1016/0141-0296\(95\)92642-L](https://doi.org/10.1016/0141-0296(95)92642-L).

SAMCO. 2006. **F08b Guideline for Structural Health Monitoring**. SAMCO Final Report.

Sampaio R. A. C.; Souza R. M. de; Bentes J. L.; Barichello C. V. M. 2010. **Análise Dinâmica Experimental de Ponte Ferroviária em Concreto Protendido**. III Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas. Rio de Janeiro.

Sobral R. A.; Ribeiro R. R.; Cavalcante I. B.; Lameiras R. M.; Veloso, A. C. M. 2020. **Análise paramétrica da influência de parâmetros de modelagem nas propriedades modais de um modelo MEF de uma ponte metroviária**. 62º Congresso Brasileiro do Concreto, ISSN 2175-8182.

Spencer Jr. B. F.; Hoskere V.; Narazaki, Y. 2018. **Advances in Computer Vision-Bases Civil Infrastructure Inspection and Monitoring**. Engineering, vol. 5, ELSEVIER, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.11.030>.

Structural Vibration Solutions. ARTeMIS. Disponível em: <<https://svibs.com>>. Último acesso em maio de 2021.

Yang Y.; Li Q. S.; Yan, B. W. (2017). **Specifications and applications of the technical code for monitoring of building and bridge structures in China**. Advances in Mechanical Engineering, vol. 9, <https://doi.org/10.1177/1687814016684272>.

ANEXO A – CÓDIGO DO NÓ MESTRE

```
1  #include <RF24.h>
2
3  #define radiolD 0
4
5  struct estruturaDadosRF
6  {
7      boolean ligando = false;
8      boolean botao1 = false;
9      boolean botao2 = false;
10 };
11 typedef struct estruturaDadosRF tipoDadosRF;
12 tipoDadosRF dadosRF;
13 tipoDadosRF dadosRecebidos;
14
15 boolean transmitido = true;
16 boolean alterado = false;
17
18 RF24 radio(7,8);
19
20 byte enderecos[][6] =
21 {"1node", "2node", "3node", "4node", "5node", "6node"};
22
23 boolean botao1Ant = HIGH;
24 boolean botao1 = HIGH;
25 boolean botao2Ant = HIGH;
26 boolean botao2 = HIGH;
27
28 void setup()
29 {
30     radio.begin();
31
32     #if radiolD == 0
33         radio.openWritingPipe(enderecos[0]);
34     #endif
35
36     dadosRF.ligando = false;
37     radio.startListening();
38
39     pinMode(A1, OUTPUT);
40     pinMode(A5, OUTPUT);
41     pinMode(3, INPUT_PULLUP);
42     pinMode(4, INPUT_PULLUP);
43 }
```

```

44
45 void loop()
46 {
47     if (alterado || !transmitido) {
48         radio.stopListening();
49         transmitido = radio.write( &dadosRF,
50 sizeof(tipoDadosRF) );
51         radio.startListening();
52         alterado = false;
53     }
54
55     if (radio.available()) {
56         radio.read( &dadosRecebidos, sizeof(tipoDadosRF)
57 );
58
59         if (dadosRecebidos.ligando) {
60             alterado = true;
61         } else {
62             dadosRF = dadosRecebidos;
63         }
64     }
65
66     botao1 = digitalRead(4);
67     if (botao1 && (botao1 != botao1Ant)) {
68         dadosRF.botao1 = !dadosRF.botao1;
69         alterado = true;
70     }
71     botao1Ant = botao1;
72
73     botao2 = digitalRead(3);
74     if (botao2 && (botao2 != botao2Ant)) {
75         dadosRF.botao2 = !dadosRF.botao2;
76         alterado = true;
77     }
78     botao2Ant = botao2;
79
80     digitalWrite(A1, dadosRF.botao1);
81     digitalWrite(A5, dadosRF.botao2);
82
83     delay(5);
84 }

```

ANEXO B – CÓDIGO DO NÓ COM ACELERÔMETRO

```
1  #include <SPI.h>
2  #include <SD.h>
3  #include <Wire.h>
4  #include <DS3231.h>
5  #include <RF24.h>
6
7  #define radioid 1
8  #define comunicaRf 7
9  #define comunicaSD 4
10
11 unsigned long delays;
12
13 int nonBreak[6] = {2,3,5,6,9,10};
14 int i;
15
16 long accelX, accelY, accelZ;
17
18 int x = 0;
19 int j = 0;
20 File myFile;
21
22 DS3231 rtc(SDA, SCL);
23 Time t;
24
25 int y=0;
26
27 struct estruturaDadosRF
28 {
29     boolean ligando = false;
30     boolean botao1 = false;
31     boolean botao2 = false;
32 };
33 typedef struct estruturaDadosRF tipoDadosRF;
34 tipoDadosRF dadosRF;
35 tipoDadosRF dadosRecebidos;
36
37 boolean transmitido = true;
38 boolean alterado = false;
39
40 RF24 radio(7,8);
41
42 byte enderecos[][6] = {"1node","2node"};
43
44 void (*reset) () = 0;
```

```

45
46 void setup()
47 {
48     for (i=1;i<=6;i=i+1){
49         pinMode(nonBreak[i], OUTPUT);
50     }
51
52     rtc.begin();
53
54     Wire.begin();
55     setupMPU();
56
57     digitalWrite(comunicaRf, HIGH);
58     digitalWrite(comunicaSD, LOW);
59     delay(100);
60
61     if(!SD.begin(4))
62     {
63         while(1);
64     }
65
66     delay(50);
67
68     digitalWrite(comunicaSD, HIGH);
69     digitalWrite(comunicaRf, LOW);
70     delay(100);
71
72     radio.begin();
73
74     #if radioid == 1
75         radio.openReadingPipe(1, enderecos[0]);
76         radio.openWritingPipe(enderecos[1]);
77     #endif
78
79     dadosRF.ligando = false;
80     radio.startListening();
81 }
82
83 void loop()
84 {
85     for (i=1;i<=6;i=i+1)
86     {
87         digitalWrite(nonBreak[i], HIGH);
88     }
89

```

```

90   comunicaPlacas();
91
92   if(dadosRF.botao1 == HIGH)
93   {
94       digitalWrite(A1, HIGH);
95       digitalWrite(comunicaRf, HIGH);
96       digitalWrite(comunicaSD, LOW);
97       delay(100);
98       y=1;
99       myFile = SD.open("Ensaio.txt", FILE_WRITE);
100      if (y==1)
101      {
102          t = rtc.getTime();
103          myFile.println();
104          myFile.println("Amostragem Vibração Livre");
105          registroRelogio();
106          delays = millis();
107          while (y==1)
108          {
109              aquisicaoAceleracao();
110              registroAceleracao();
111              if (millis() - delays >= 30000)
112              {
113                  y=2;
114              }
115          }
116      }
117      if (y==2)
118      {
119          myFile.println("Amostragem Vibração Livre");
120          myFile.close();
121          delay(100);
122          digitalWrite(A1, LOW);
123          reset();
124      }
125  }
126
127  if(dadosRF.botao2 == HIGH)
128  {
129      digitalWrite(A1, HIGH);
130      digitalWrite(comunicaRf, HIGH);
131      digitalWrite(comunicaSD, LOW);
132      delay(100);
133      y=1;
134      myFile = SD.open("Ensaio.txt", FILE_WRITE);

```

```

135     if (y==1)
136     {
137         t = rtc.getTime();
138         myFile.println();
139         myFile.println("Amostragem Vibricao Ambiente");
140         registroRelogio();
141         delays = millis();
142         while (y==1)
143         {
144             aquisicaoAceleracao();
145             registroAceleracao();
146             if (millis() - delays >= 300000)
147             {
148                 y=2;
149             }
150         }
151     }
152     if (y==2)
153     {
154         myFile.println("Amostragem Vibricao Ambiente");
155         myFile.close();
156         delay(100);
157         digitalWrite(A1, LOW);
158         reset();
159     }
160 }
161 }
162
163 void comunicaPlacas()
164 {
165     if (alterado || !transmitido) {
166         radio.stopListening();
167         transmitido = radio.write( &dadosRF,
168 sizeof(tipoDadosRF) );
169         radio.startListening();
170         alterado = false;
171     }
172
173     if (radio.available()) {
174         radio.read( &dadosRecebidos, sizeof(tipoDadosRF)
175 );
176
177         if (dadosRecebidos.ligando) {
178             alterado = true;
179         } else {

```

```

180         dadosRF = dadosRecebidos;
181     }
182 }
183 }
184
185 void setupMPU()
186 {
187     Wire.beginTransmission(0b1101001);
188     Wire.write(0x6B);
189     Wire.write(0b00000000);
190     Wire.endTransmission();
191     Wire.beginTransmission(0b1101001);
192     Wire.write(0x1C);
193     Wire.write(0b00000000);
194     Wire.endTransmission();
195 }
196
197 void aquisicaoAceleracao()
198 {
199     Wire.beginTransmission(0b1101001);
200     Wire.write(0x3B);
201     Wire.endTransmission();
202     Wire.requestFrom(0b1101001, 6);
203     while (Wire.available() < 6);
204     accelX = Wire.read() << 8 | Wire.read();
205     accelY = Wire.read() << 8 | Wire.read();
206     accelZ = Wire.read() << 8 | Wire.read();
207 }
208
209 void registroRelogio()
210 {
211     myFile.println("Hora:" + String(micros()) + "," +
212 String(t.hour) + "," + String(t.min) + "," +
213 String(t.sec));
214 }
215
216 void registroAceleracao()
217 {
218     myFile.println(String(micros()) + "," + (accelX) +
219 ", " + (accelY) + "," + (accelZ));
220 }

```