

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL

OTÁVIO SILVEIRA GODINHO
THIAGO SANTOS KRAUSS FERRAZ

**Viabilidade de um sistema simplificado para o monitoramento remoto de
pontes e viadutos**

São Paulo

2019

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL

OTÁVIO SILVEIRA GODINHO
THIAGO SANTOS KRAUSS FERRAZ

**Viabilidade de um sistema simplificado para o monitoramento remoto de
pontes e viadutos**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Leal Maranhão

São Paulo

2019

RESUMO

Após a ocorrência de diversos acidentes envolvendo Obras de Arte Especiais (OAE), tanto no panorama nacional, como no internacional, demonstrando um processo de obsolescência do parque de infraestrutura e a necessidade de monitor tais estruturas. Propôs-se um sistema viável de monitoramento do comportamento mecânico de pontes e viadutos, de baixo custo, quando comparado ao método tradicional. Para este objetivo, aplicou-se referências relativas ao processo de monitoramento convencional, de prototipagem de um sistema simplificado e do processamento e análise dos dados obtidos. Para isso, com apoio da pesquisa exploratória por referências bibliográficas, em uma abordagem qualitativa, prototipagem do sistema a ser empregado no estudo e pesquisas de campo. Após o estudo do chamado método convencional, produziu-se o protótipo, que foi instalado em quatro OAEs, sendo três localizadas na Cidade Universitária e a quarta escolhida foi a Ponte Cidade Universitária, a qual cruza a Marginal e o Rio Pinheiros, sendo a de maior porte, optou-se por analisá-la em três diferentes pontos. Com o sinal de aceleração obtido, realizou-se uma Análise Modal Operacional (OMA) e determinou-se o parâmetro dinâmico da frequência natural de excitação estrutural. Concluiu-se, com base nos resultados obtidos, que é possível a utilização do sistema simplificado de Monitoramento da Saúde Estrutural (SHM), que ele é capaz de apresentar informações precisas e correlaciona-las ao tráfego presente na estrutura. Também se propôs as configurações mínimas recomendadas para a realização do monitoramento de pontes e viadutos.

Palavras-chave: Monitoramento de Saúde Estrutural. Análise Modal de Estruturas. Análise Espectral. Frequência Natural. Transformada Rápida de Fourier.

ABSTRACT

After the occurrence of several accidents involving Special Engineering Structures, both on the national and international scene, demonstrating a process of obsolescence of the infrastructure park and the need to initiate the monitoring of such structures. Sought to propose a viable low-cost system for the mechanical behavior monitoring, when compared to the traditional method, in addition to understanding how it happens. For this purpose, references were sought regarding the conventional monitoring process, prototyping a simplified system and the processing and analysis of the data obtained. In order to do this, were used exploratory research by bibliographic references, in a qualitative approach, prototyping of the system to be employed in the study and field research. After studying the so-called conventional method, the prototype was produced and installed in four Special Engineering Structures, three located in the University of São Paulo Campus and the fourth Structure is the Cidade Universitária Bridge, which crosses the Marginal Pinheiros and Pinheiros River, being the largest, were decided to analyze the bridge in three different positions. With the acceleration signal obtained, an Operational Modal analysis (OMA) was performed and the dynamic parameter of the natural frequency was determined. Concludes, based on the results obtained, that it is possible to use the simplified Structural Health Monitoring (SHM) system, which is capable of presenting accurate information and correlating them to the traffic present in the structure. Also proposed the minimum recommended settings for the monitoring of bridges and viaducts.

Keywords: Structural Health Monitoring. Structural Modal Analysis. Spectral Analysis. Natural Frequency. Fast Fourier Transform.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fixação de extensômetro na armadura da parte inferior da longarina.....	29
Figura 2 - Arranjo dos acelerômetros adotado na OAE 35.	29
Figura 3 - Ensaio tipo Drop-Weight.	30
Figura 4 - Modos de vibração experimental, obtido no software ARTeMIS®.....	30
Figura 5 - Comparação entre os modos de vibração numérico e experimental.	33
Figura 6 - Vista do sistema de monitoramento, mostrando a localização dos sensores de deslocamento e abertura de fissuras.....	34
Figura 7 - Transdutores de deslocamento instalados no meio do vão e nos apoios da ponte.....	35
Figura 8 - Extensômetros instalados nas armaduras.....	36
Figura 9 - Extensômetros instalados no concreto.....	36
Figura 10 - Transdutor de abertura de fissura em laje.....	36
Figura 11 - Sistema convencional, não modular.....	37
Figura 12 - Sistema modular e programável.	37
Figura 13 - Sistema de comunicação direta.	38
Figura 14 - Sistema sem fio e sem necessidade de programação, com sensores inteligentes ("Plug and Play").	38
Figura 15 - Sensores de deformação. (a) Extensômetro elétrico; (b) Extensômetro com quatro extensômetros elétricos; (c) Transdutor de corda vibrante.	39
Figura 16 - Sensores diversos. (a) Acelerômetro com base em MEMS; (b) Clinômetro MEMS; (c) LVDT; (d) Sensor de temperatura MEMS.	39
Figura 17 - Testes dinâmicos de pontes: tipos de testes, técnicas de excitação, parâmetros modais obtidos e suas aplicações.	41
Figura 18 - Ponte ferroviária de médio porte, localizada sobre o rio Śleza em Wrocław, Polônia: (a) visão geral; (b) dimensões da estrutura, localização e caracterização dos sensores e posição do excitador.	42

Figura 19 - Equipamento fixado sobre trilho e detalhe.	44
Figura 20 - Detalhe da proposta de modernização da estrutura alvo do estudo.	46
Figura 21 - Modelo de elementos finitos inicial. (a) Modos e frequências naturais; (b) Vista lateral.	47
Figura 22 - Modelo de elementos finitos mais discretizado. (a) Modos e frequências naturais; (b) Vista lateral.	47
Figura 23 - Obras de arte especiais estudadas.	49
Figura 24 - Modelo gerado.	51
Figura 25 - Detalhes do modelo gerado. (a) Detalhe do apoio central com travessa, longarinas e transversinas; (b) Vista; (c) Detalhe de um apoio central.	51
Figura 26 - Resultados gráficos do modelo.	52
Figura 27 - Resultados gráficos do modelo com comboios.	53
Figura 28 - Fotografia do protótipo elaborado.	57
Figura 29 - Protótipo idealizado para a realização do monitoramento remoto.	58
Figura 30 - Localização do Ponto A da Ponte Cidade Universitária.....	75
Figura 31 - Localização do Ponto B da Ponte Cidade Universitária.....	78
Figura 32 - Localização do Ponto C da Ponte Cidade Universitária.	81

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - FPM na direção Z e modos numéricos obtidos.	31
Gráfico 2 - FPM na direção Z e modos experimentais obtidos.	31
Gráfico 3 - Série temporal de deformações medidas na OAE 51. (a) Trem descarregado; (b) Trem carregado.....	32
Gráfico 4 - Sinal obtido pela passagem do trem.....	43
Gráfico 5 - Análise espectral do sinal obtido.	43
Gráfico 6 - Análise Espectral dos sinais obtidos.....	45
Gráfico 7 - Detalhe da Análise Modal, frequências entre 3,5 e 5,0 Hz.....	45
Gráfico 8 - Compilado dos dados de frequência natural obtidos.	50
Gráfico 9 - Compilado dos dados de taxa de amortecimento obtidos.....	50
Gráfico 10 - Comparação entre os dados de Z, obtidos pelo celular e pelo protótipo	65
Gráfico 11 - Detalhe da defasagem de tempo entre os picos, do trecho 1.	66
Gráfico 12 - Detalhe pós sincronização do trecho 1.	67
Gráfico 13 - Detalhe pós sincronização do trecho 3.	67
Gráfico 14 - Resultado final, de Z, após a sincronização dos dados.	68
Gráfico 15 - Comparação entre Z, obtido pelo celular e pelo Arduino.	69
Gráfico 16 - Comparação entre o módulo da aceleração obtido pelo celular e pelo Arduino.	69
Gráfico 17 - Comparação entre $Z_n - Z_{n-1}$, obtido pelo celular e pelo Arduino.	70
Gráfico 18 - Comparação entre Z, obtido pelo celular e pelo Arduino.	71
Gráfico 19 – Componente de aceleração vertical (Z), obtido pelo celular.....	71
Gráfico 20 – Módulo de aceleração ($ a $), obtido pelo celular.....	72
Gráfico 21 – Parâmetro $Z_n - Z_{n-1}$, obtido pelo celular.	72
Gráfico 22 - Comparação entre Z, obtido pelo celular e pelo Arduino.	73

Gráfico 23 - Comparação entre $ a $, obtido pelo celular e pelo Arduino.	73
Gráfico 24 - Comparação entre $Z_n - Z_{n-1}$, obtido pelo celular e pelo Arduino.	74
Gráfico 25 - Ponto em que a bateria começa a falhar.	76
Gráfico 26 - Aceleração Z, obtida pelo celular.	76
Gráfico 27 - Módulo da aceleração $ a $, obtida pelo celular.	77
Gráfico 28 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, obtida pelo celular.	77
Gráfico 29 - Aceleração Z, obtida pelo celular.	79
Gráfico 30 - Módulo da aceleração $ a $, obtida pelo celular.	79
Gráfico 31 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, obtida pelo celular.	80
Gráfico 32 - Aceleração Z, obtida pelo celular.	81
Gráfico 33 - Módulo da aceleração $ a $, obtida pelo celular.	82
Gráfico 34 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, obtida pelo celular.	82
Gráfico 35 - Interação entre o tráfego e a Aceleração Z, obtida pelo celular.	84
Gráfico 36 - Interação entre o tráfego e o módulo de aceleração $ a $, obtida pelo celular.	84
Gráfico 37 - Interação entre o tráfego e a Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, obtida pelo celular.	85
Gráfico 38 - Análise espectral do sinal da componente z, da ponte da Ponte Cidade Universitária - Ponto C, obtido pelo celular ($f=10\text{Hz}$).	86
Gráfico 39 - Análise espectral do sinal da componente z, da ponte da Ponte Cidade Universitária - Ponto C, obtido pelo celular ($f=100\text{Hz}$).	87
Gráfico 40 - Análise espectral do sinal da componente z, da ponte da Ponte Cidade Universitária - Ponto C, obtido pelo protótipo ($f=30\text{Hz}$).	87
Gráfico 41 - Espectro de frequência não usual da aceleração. (a) Gerado pelo sinal da componente z; (b) Apresentado por Valinejadshoubi, Bagchi e Meselhi (2016).	89
Gráfico 42 - Comparação da obtenção da F_n através de: (a) Análise espectral da componente z da aceleração; (b) Análise espectral do parâmetro $Z_n - Z_{n-1}$	90
Gráfico 43 - Componente z da aceleração, coletado na passarela de pedestres da Escola Politécnica.	98

Gráfico 44 - Módulo da aceleração, coletado na passarela de pedestres da Escola Politécnica.	98
Gráfico 45 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na passarela de pedestres da Escola Politécnica.	99
Gráfico 46 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na passarela de pedestres da Escola Politécnica.	99
Gráfico 47 - Componente z da aceleração, coletado na ponte de veículos do estacionamento da Escola Politécnica.	100
Gráfico 48 - Módulo da aceleração, coletado na ponte de veículos do estacionamento da Escola Politécnica.	100
Gráfico 49 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na ponte de veículos do estacionamento da Escola Politécnica.	101
Gráfico 50 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na ponte de veículos do estacionamento da Escola Politécnica.	101
Gráfico 51 - Componente z da aceleração, coletado na ponte da Avenida Almeida Prado.	102
Gráfico 52 - Módulo da aceleração, coletado na ponte da Avenida Almeida Prado.	102
Gráfico 53 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na ponte da Avenida Almeida Prado.	103
Gráfico 54 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na ponte da Avenida Almeida Prado.	103
Gráfico 55 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A.	104
Gráfico 56 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A.	104
Gráfico 57 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A.	105
Gráfico 58 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A.	105

Gráfico 59 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B.	106
Gráfico 60 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B.	106
Gráfico 61 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B.	107
Gráfico 62 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B.	107
Gráfico 63 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C.	108
Gráfico 64 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C.	108
Gráfico 65 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C.	109
Gráfico 66 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C.	109
Gráfico 67 - Componente z da aceleração, coletado na passarela de pedestres da Escola Politécnica.	110
Gráfico 68 - Módulo da aceleração, coletado na passarela de pedestres da Escola Politécnica.	110
Gráfico 69 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na passarela de pedestres da Escola Politécnica.	111
Gráfico 70 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na passarela de pedestres da Escola Politécnica.	111
Gráfico 71 - Componente z da aceleração, coletado na ponte de veículos do estacionamento da Escola Politécnica.	112
Gráfico 72 - Módulo da aceleração, coletado na ponte de veículos do estacionamento da Escola Politécnica.	112
Gráfico 73 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na ponte de veículos do estacionamento da Escola Politécnica.	113

Gráfico 74 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na ponte de veículos do estacionamento da Escola Politécnica.	113
Gráfico 75 - Componente z da aceleração, coletado na ponte da Avenida Almeida Prado.	114
Gráfico 76 - Módulo da aceleração, coletado na ponte da Avenida Almeida Prado.	114
Gráfico 77 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na ponte da Avenida Almeida Prado.	115
Gráfico 78 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na ponte da Avenida Almeida Prado.	115
Gráfico 79 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A.	116
Gráfico 80 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A.	116
Gráfico 81 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A.	117
Gráfico 82 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A.	117
Gráfico 83 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A, amostra 1.	118
Gráfico 84 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A, amostra 1.	118
Gráfico 85 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A, amostra 1.	119
Gráfico 86 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A, amostra 1.	119
Gráfico 87 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A, amostra 2.	120
Gráfico 88 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A, amostra 2.	120

Gráfico 89 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A, amostra 2.....	121
Gráfico 90 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A, amostra 2.....	121
Gráfico 91 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A, amostra 3.	122
Gráfico 92 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A, amostra 3.....	122
Gráfico 93 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A, amostra 3.....	123
Gráfico 94 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A, amostra 3.....	123
Gráfico 95 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B, amostra 1.	124
Gráfico 96 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B, amostra 1.....	124
Gráfico 97 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B, amostra 1.....	125
Gráfico 98 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B, amostra 1.....	125
Gráfico 99 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B, amostra 2.	126
Gráfico 100 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B, amostra 2.....	126
Gráfico 101 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B, amostra 2.....	127
Gráfico 102 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B, amostra 2.....	127
Gráfico 103 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B, amostra 3.	128

Gráfico 104 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B, amostra 3.....	128
Gráfico 105 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B, amostra 3.....	129
Gráfico 106 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B, amostra 3.....	129
Gráfico 107 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 1.	130
Gráfico 108 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 1.	130
Gráfico 109 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 1.....	131
Gráfico 110 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 1.	131
Gráfico 111 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 2.	132
Gráfico 112 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 2.	132
Gráfico 113 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 2.....	133
Gráfico 114 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 2.	133
Gráfico 115 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 3.	134
Gráfico 116 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 3.	134
Gráfico 117 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 3.....	135
Gráfico 118 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 3.	135

Gráfico 119 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 4.	136
Gráfico 120 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 4.	136
Gráfico 121 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 4.	137
Gráfico 122 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 4.	137
Gráfico 123 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A.	138
Gráfico 124 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A.	138
Gráfico 125 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A.	139
Gráfico 126 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A.	139
Gráfico 127 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B.	140
Gráfico 128 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B.	140
Gráfico 129 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B.	141
Gráfico 130 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B.	141
Gráfico 131 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C.	142
Gráfico 132 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C.	142
Gráfico 133 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C.	143

Gráfico 134 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C.	143
Gráfico 135 - Análise espectral do sinal da componente z, da passarela de pedestres da Escola Politécnica.	144
Gráfico 136 - Análise espectral do sinal da componente z, da ponte de veículos da Escola Politécnica.	144
Gráfico 137 - Análise espectral do sinal da componente z, da ponte da Avenida Almeida Prado.	145
Gráfico 138 - Análise espectral do sinal da componente z, da ponte da Ponte Cidade Universitária - Ponto A.	145
Gráfico 139 - Análise espectral do sinal da componente z, da ponte da Ponte Cidade Universitária - Ponto B.	146
Gráfico 140 - Análise espectral do sinal da componente z, da ponte da Ponte Cidade Universitária - Ponto C.	146
Gráfico 141 - Análise espectral do sinal da componente z, da passarela de pedestres da Escola Politécnica.	147
Gráfico 142 - Análise espectral do sinal da componente z, da ponte de veículos da Escola Politécnica.	147
Gráfico 143 - Análise espectral do sinal da componente z, da ponte da Avenida Almeida Prado.	148
Gráfico 144 - Análise espectral do sinal da componente z, da ponte da Ponte Cidade Universitária - Ponto A.	148
Gráfico 145 - Análise espectral do sinal da componente z, da Ponte Cidade Universitária - Ponto A, amostra 1.....	149
Gráfico 146 - Análise espectral do sinal da componente z, da Ponte Cidade Universitária - Ponto A, amostra 2.....	149
Gráfico 147 - Análise espectral do sinal da componente z, da Ponte Cidade Universitária - Ponto A, amostra 3.....	150
Gráfico 148 - Análise espectral do sinal da componente z, da Ponte Cidade Universitária - Ponto B, amostra 1.....	150

Gráfico 149 - Análise espectral do sinal da componente z, da Ponte Cidade Universitária - Ponto B, amostra 2.....	151
Gráfico 150 - Análise espectral do sinal da componente z, da Ponte Cidade Universitária - Ponto B, amostra 3.....	151
Gráfico 151 - Análise espectral do sinal da componente z, da Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 1.	152
Gráfico 152 - Análise espectral do sinal da componente z, da Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 2.	152
Gráfico 153 - Análise espectral do sinal da componente z, da Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 3.	153
Gráfico 154 - Análise espectral do sinal da componente z, da Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 4.	153
Gráfico 155 - Análise espectral do sinal da componente x, y, z e do módulo da aceleração, da Ponte Cidade Universitária - Ponto A.....	154
Gráfico 156 - Análise espectral do sinal da componente z, da Ponte Cidade Universitária - Ponto B.	154
Gráfico 157 - Análise espectral do sinal da componente z, da Ponte Cidade Universitária - Ponto C.	155

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características Geométricas das Pontes analisadas da EFC.....	28
Tabela 2 - Comparação entre os FADs.....	33
Tabela 3 - Resumo do sistema de monitoramento da ponte Rio Jaguari.....	34
Tabela 4 - Relação de sensores instalados na ponte do Rio Jaguari.	35
Tabela 5 - Comparação dos valores obtidos para a estrutura original e modernizada.	48
Tabela 6 - Resumo dos modos de vibração do modelo.....	52
Tabela 7 - Resumo dos modos de vibração do modelo com comboios.....	53
Tabela 8 - Compilação dos resultados obtidos pelos estudos de referência.	54
Tabela 9 - Configuração das conexões do sensor MPU-6050.....	58
Tabela 10 - Configuração das conexões do módulo Bluetooth HC-05.	59
Tabela 11 - Dados exportados pelo aplicativo.....	61
Tabela 12 - Dados obtidos pelo aplicativo, após tratamento.	62
Tabela 13 - Dados obtidos pelo aplicativo, após tratamento.	63
Tabela 14 - Dados exportados pelo protótipo.....	64
Tabela 15 - Dados obtidos pelo protótipo, após tratamento.	65
Tabela 16 - Fatores de sincronização aplicados.	66
Tabela 17 - Trecho da ficha de medição de tráfego do Ponto C da Ponte Cidade Universitária.....	83
Tabela 18 - Tabela resumo das frequências naturais calculadas, a partir da componente z da aceleração.	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CMA	Análise Modal Clássica ¹
CUASO	Cidade Universitária Armando Salles de Oliveira
DFT	Transformada Discreta de Fourier ²
EMA	Análise Modal Experimental ³
EP	Escola Politécnica
FFT	Transformada Rápida de Fourier ⁴
FPM	Fator de Participação Modal de Massa
LVDT	Transdutores para Medição de Deslocamento Linear ⁵
MEF	Método dos Elementos Finitos
MIE	Monitoramento de Integridade Estrutural
MP	Ministério Público
OAE	Obra de Arte Especial
OMA	Análise Modal Operacional ⁶
OT	Testes Operacionais ⁷
SHM	Monitoramento de Saúde Estrutural ⁸
Sinaenco	Sindicato de Engenharia e Arquitetura
TAC	Termo de Compromisso de Ajustamento de Conduta
USP	Universidade de São Paulo

¹ Classical Modal Analysis.

² Discrete Fourier transform.

³ Experimental Modal Analysis.

⁴ Fast Fourier Transform.

⁵ Linear Variable Differential Transformer.

⁶ Operational Modal Analysis.

⁷ Operational Tests.

⁸ Structural Health Monitoring

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
1.1. CONTEXTO	21
1.2. OBJETIVOS.....	22
1.3. JUSTIFICATIVA.....	23
1.4. MÉTODOS DE PESQUISA.....	23
1.4.1. Pesquisa bibliográfica.....	24
1.4.2. Pesquisa de campo	25
1.4.3. Análise dos dados	25
1.5. ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	26
2. MONITORAMENTO REMOTO DE OBRAS DE ARTE ESPECIAIS.....	27
2.1. MÉTODO CONVENCIONAL DE MONITORAMENTO	28
2.1.1. Monitoramento Estrada de Ferro Carajás	28
2.1.2. Monitoramento de Saúde Estrutural - Arteris	34
2.1.3. Sistema de Aquisição de Dados	37
2.2. ANÁLISE MODAL	40
2.2.1. Comparação entre Análise Modal Operacional (OMA) e Análise Modal Clássica (CMA).....	42
2.2.2. Comparação Análise Modal Clássica e Análise Modal Computacional	46
2.2.3. Análise Modal Operacional Utilizando Smartphones	49
2.2.4. Análise Modal Computacional	51
2.2.5. Considerações.....	54
3. PESQUISA DE CAMPO.....	57
3.1. PROTOTIPAGEM DE SISTEMA DE BAIXO CUSTO DE MONITORAMENTO	57
3.2. DADOS OBTIDOS PELO SMARTPHONE	61
3.2.1. Levantamento de Campo ($f=10\text{Hz}$)	61
3.2.2. Levantamento de Campo ($f=100\text{Hz}$)	63
3.3. DADOS OBTIDOS PELO PROTÓTIPO	64
3.3.1. Sincronização do Sinal	65
4. APRESENTAÇÃO DOS DADOS	69

4.1. PASSARELA DE PEDESTRE DA EP	69
4.2. PONTE DO ESTACIONAMENTO DA EP	71
4.3. PONTE DA AVENIDA ALMEIDA PRADO	73
4.4. PONTE CIDADE UNIVERSITÁRIA – PONTO A	75
4.5. PONTE CIDADE UNIVERSITÁRIA – PONTO B	78
4.6. PONTE CIDADE UNIVERSITÁRIA – PONTO C	81
4.7. INTERAÇÃO COM O TRÁFEGO	83
5. ANÁLISE MODAL OPERACIONAL.....	86
5.1. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	86
5.2. RUÍDO OBSERVADO	89
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
REFERÊNCIAS	93
APÊNDICE A – GRÁFICOS ELABORADOS COM OS DADOS DO CELULAR (F=10Hz).....	98
APÊNDICE B – GRÁFICOS ELABORADOS COM OS DADOS DO ARDUINO (F=10Hz).....	110
APÊNDICE C – GRÁFICOS ELABORADOS COM OS DADOS DO CELULAR (F=100Hz).....	118
APÊNDICE D – GRÁFICOS ELABORADOS COM OS DADOS DO ARDUINO (F=30Hz).....	138
APÊNDICE E – ANÁLISES ESPECTRAIS ELABORADAS COM DADOS DO CELULAR (F=10Hz).....	144
APÊNDICE F – ANÁLISES ESPECTRAIS ELABORADAS COM DADOS DO ARDUINO (F=10Hz)	147
APÊNDICE G – ANÁLISES ESPECTRAIS ELABORADAS COM DADOS DO CELULAR (F=100Hz).....	149
APÊNDICE H – ANÁLISES ESPECTRAIS ELABORADAS COM DADOS DO ARDUINO (F=30Hz)	154
APÊNDICE I – CÓDIGO PARA OBTENÇÃO DOS DADOS DO ARDUINO	156

APÊNDICE J – CÓDIGO PARA REALIZAÇÃO DA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER.....	159
APÊNDICE K – FICHAS DE MEDIÇÃO DE TRÁFEGO	161

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo tratará do contexto do tema, que será desenvolvido neste trabalho, assim como seus objetivos, justificativas, métodos de pesquisa utilizados e como o mesmo foi estruturação.

1.1. CONTEXTO

O tema a ser desenvolvido neste trabalho, está relacionado à notoriedade dos eventos ocorridos no ano de 2018, quando ocorreram ao menos dois grandes incidentes relacionados à Obras de Artes Especiais (OAEs), e do início do ano de 2019, onde outra gerou uma grande repercussão na imprensa ao ser interditada, dada a necessidade de sua restauração, devido ao rompimento de uma de suas vigas.

O primeiro destes incidentes, foi o desabamento de um trecho do viaduto do Eixo Rodoviário de Brasília, Asa Sul, mais conhecido pela alcunha informal de “Eixão Sul”, localizado na área central de Brasília, ocorrido no dia 06 de fevereiro de 2018. Inaugurado juntamente à cidade de Brasília, no dia 20 de abril de 1960, a estrutura já apresentava a necessidade de reparos, como exposto pelo Sindicato de Engenharia e Arquitetura (2009), em seu relatório da campanha intitulada “Infraestrutura: Prazo de validade Vencido”, após a realização de inspeções visuais em 25 estruturas da cidade de Brasília.

O segundo evento ocorrido no ano de 2018, foi o rompimento de uma das vigas transversais do elevado de acesso da Marginal Pinheiros, na cidade de São Paulo, que levou a um trecho do tabuleiro, a ceder cerca de dois metros, em 15 de novembro. Inaugurado em outubro de 1978, o elevado nunca recebeu obras de manutenção, embora tenha sido vistoriado cerca de três meses antes do acontecimento.

Assim como ocorrido no caso do Eixo Rodoviário de Brasília, já havia sido apontada a necessidade de intervenções no viaduto, em um Termo de Compromisso de Ajustamento de Conduta (TAC), que foi assinado pela Prefeitura de São Paulo, no ano de 2007, em um acordo feito com o Ministério Público (MP), para a criação de um programa de manutenção de 50 OAEs. No TAC assinado, constava a necessidade de intervenções em 50 pontes e viadutos da cidade, indicados após vistorias realizadas pela Prefeitura de São Paulo e pelo Instituto de Engenharia.

O TAC previa que a Prefeitura deveria entregar em um prazo de seis meses, um cronograma de inspeções rotineiras e periódicas, além de realizar a manutenção estrutural das 50 OAEs, que estavam em situação inadequadas, em um prazo de 10 anos. Entretanto em 2014, um relatório emitido pelo MP, apontava que o município não cumpria com as obrigações assumidas havia seis anos.

No dia 06 de dezembro de 2018, a Prefeitura publicou um edital de chamamento para empresas interessadas em realizar laudos que atestassem as condições de 33 estruturas, dentre elas a Ponte Cidade Universitária e a Ponte e Viaduto Presidente Dutra, que será mencionado a seguir.

Por fim, no início de 2019, a Prefeitura de São Paulo interditou a Ponte Presidente Dutra, que liga a Marginal Tietê à Rodovia Presidente Dutra, no dia 23 de janeiro, após a vistoria ter apontado o rompimento de suas vigas de apoio da estrutura no pilar. Em nota emitida pela Prefeitura de São Paulo, o problema apresentado pela ponte, foi semelhante ao ocorrido no viaduto da Marginal Pinheiros, dois meses antes. Internacionalmente, estas visitas vêm sendo executadas, predominantemente, por avaliações de pessoas especializadas e em alguns casos, com o apoio de equipamentos.

Dado aos eventos ocorridos, iniciou-se o questionamento sobre como a utilização da tecnologia, poderia beneficiar os métodos de verificação e avaliação da saúde dos sistemas estruturais de pontes e viadutos.

1.2. OBJETIVOS

Este Trabalho de Conclusão de Curso, tem como principal objetivo propor um método simplificado e de custo reduzido para o monitoramento remoto do comportamento mecânico de pontes e viadutos. Seus objetivos específicos podem ser assim elencados:

- i. Compreender os elementos e as características analisadas pelo método convencional, através de pesquisa bibliográfica;
- ii. Estudar as possibilidades para a obtenção dos dados, para a escolha da maneira que melhor atenda às necessidades do projeto;
- iii. Construção de um protótipo que forneça os dados de aceleração da estrutura;

- iv. Implementação do protótipo em uma estrutura, conjuntamente a um aparelho celular com acelerômetro, para avaliar a capacidade de obtenção dos dados;
- v. Análise e comparação dos resultados obtidos, com o objetivo da validação ou não do protótipo proposto.

1.3. JUSTIFICATIVA

No dia 26 de fevereiro de 2019, a Prefeitura de São Paulo anunciou que, dentro de um prazo de trinta dias, iria publicar um edital de chamamento público, para receber projetos de um sistema de monitoramento eletrônico de pontes e viadutos da cidade. Tal iniciativa pertence às ações para melhorar o controle dessas estruturas.

Segundo o Secretário Municipal de Obras, Vitor Aly, “A gente precisa avançar na questão da gestão”, além de comentar ter sido procurado por empresários alemães, franceses e italianos, que estariam dispostos a repassar tecnologias para o monitoramento das OAEs. Os sensores seriam capazes de emitir alertas ao observar resultados inesperados.

De acordo com Toledo Júnior (2018), o método convencional de monitoramento remoto de OAEs, possui um custo elevado de implantação. Sendo assim, propondo um sistema simplificado e de baixo custo, capaz de gerar dados que possibilitem sua avaliação, poderá permitir sua implantação difusa. Outro ponto importante a ser citado é que este nicho de mercado, apresenta uma grande capacidade de crescimento, com a ampliação da cultura *data-driven*, que pode ser traduzido como cultura orientada por dados, na qual a obtenção de dados é altamente valorizada e todas as decisões tomadas são baseadas nelas.

1.4. MÉTODOS DE PESQUISA

O propósito deste trabalho de formatura foi uma pesquisa exploratória, acerca do tema de monitoramento remoto de obras de arte especiais, utilizando-se de uma abordagem qualitativa dos dados obtidos.

A pesquisa foi desenvolvida a partir de:

1.4.1. Pesquisa bibliográfica

Os conceitos estudados, relacionados ao chamado método convencional de monitoramento, foram baseados principalmente nos artigos *“Monitoramento de pontes em concreto armado da estrada de ferro Carajás – Brasil”* (CARVALHO NETO; VELOSO, 2016); *“Monitoramento “Convencional” de Estruturas: Análise Modal, Modelagem Numérica, Tipos de Equipamentos”* (BITTENCOURT, 2013); *“Desenvolvimento e aplicação de técnicas de “structural health monitoring” para avaliação estrutural de pontes rodoviárias”* (ARTERIS, 2015); *“Sistema de Monitoramento contínuo e automatizado da ponte estaiada da Estação Santo Amaro da linha 5 do Metrô”* (MICHISHITA, 2012).

Quanto aos conceitos relacionados à prototipagem de um equipamento de baixo custo para o monitoramento remoto, as principais referências foram *“Sistema para monitoramento de vibrações utilizando Arduino”* (SILVA et al., 2014); *“Sistema de monitoramento de vibração estrutural baseado em IOT (internet das coisas)”* (TAVARES; FERREIRA, 2018); *“Desenvolvimento de acelerômetro sem fio de baixo custo para monitoramento dinâmico estrutural”* (TOLEDO JÚNIOR, 2018); *“Sistema de baixo custo para monitoramento de vibração”* (ALMEIDA, 2017); *“Medição de características de vibração de pontes de concreto utilizando telefonia móvel”* (PRAVIA; BRAIDO, 2015).

Enquanto que, para os conceitos correlacionados às análises modais de obras de arte especiais, foram utilizadas como referências os artigos *“Frequências e taxas de amortecimento de pontes através de análise modal operacional utilizando smartphones”* (CASTELLANOS-TORO, 2018, tradução nossa)⁹; *“Monitoramento de saúde estrutural de construções e infraestrutura”* (VALINEJADSHOUBI; BAGCHI; MOSELHI, 2016, tradução nossa)¹⁰; *“Análise modal de estruturas de pontes por meio de testes de vibração forçada”* (ZWOLSKI; BIEN, 2011, tradução nossa)¹¹; *“Transformada de Fourier uso do Excel para processamento de sinais”* (COSTA; GOMES, 2017); *“Memorial de cálculo – estudo de conforto”* (DERSA, 2017); *“Avaliação de modernização de pontes rodoviárias por testes dinâmicos e modelo de*

⁹ “Frequencies and damping ratios of bridges through Operational Modal Analysis using smartphones”.

¹⁰ “Structural health monitoring of buildings and infrastructure”.

¹¹ “Modal analysis of bridge structures by means of forced vibrations tests”.

elementos finitos (BROWNJOHN et al., 2003, tradução nossa)¹²; “Caracterização do Tráfego Ferroviário e dos seus Efeitos em Pontes de Pequeno Vão” (PIMENTEL, 2008).

1.4.2. Pesquisa de campo

A pesquisa de campo, foi realizada em dois momentos distintos. Primeiramente, utilizando-se do protótipo criado para este trabalho e o acelerômetro de um celular, realizou-se uma análise comparativa e uma avaliação da qualidade dos dados obtidos pelo protótipo. Os objetos do estudo, desta pesquisa de campo, foram quatro OAEs submetidas a cargas máximas de pedestres, carros, ônibus e caminhões respectivamente, os quais serão detalhados no decorrer deste trabalho. Dentre as OAEs estudadas, três estão localizadas na Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira (CUASO), sede da Universidade de São Paulo (USP), além da Ponte Cidade Universitária – Prefeito William Salem, que constitui parte do sistema viário da Marginal Pinheiros, localizadas na cidade de São Paulo.

Posteriormente, com base nas lições e nos conhecimentos obtidos na etapa anterior, realizou-se uma nova coleta de dados, através do protótipo desenvolvido e um aparelho celular, porém com uma nova configuração dos sensores. Entretanto, restringiu-se à Ponte Cidade Universitária – Prefeito William Salem, para realização do monitoramento.

1.4.3. Análise dos dados

A análise de dados se deu principalmente no tratamento dos dados dos sinais obtidos na pesquisa de campo, considerando o módulo da aceleração e da amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, posteriormente foi realizada a análise espectral do sinal, possibilitando a realização da análise modal operacional das OAEs, obtendo a partir de tal a frequência natural de excitação das estruturas.

¹² “Assessment of Highway Bridge Upgrading by Dynamic Testing and Finite-Elements Model Updating”.

1.5. ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em seis capítulos, sendo o primeiro capítulo de introdução, composto pela contextualização, objetivos, justificativa do tema e métodos de pesquisa, além de elencar o conteúdo de cada capítulo.

No segundo capítulo, é apresentada a revisão bibliográfica relativa ao método convencional de monitoramento de Obras de Arte Especiais (OEA's), embasando o conhecimento necessário para o entendimento do assunto tratado, além de apresentar as referências relativas à Análise Modal, utilizadas para o embasamento teórico necessário para a elaboração das análises realizadas. O capítulo também apresenta um compilado de informações obtidas das referências bibliográficas, as considerações realizadas, para a reconfiguração do protótipo e seu embasamento teórico.

A proposta de protótipo utilizada no estudo, é apresentada no terceiro capítulo, assim como amostras dos dados obtidos na pesquisa de campo, além do detalhamento do tratamento necessário para a obtenção de dados relevantes ao estudo.

No quarto capítulo, são apresentados os dados, de cada localização estudada, de forma gráfica para facilitar à compreensão. São apresentados alguns ocorridos durante o levantamento de dados, além de explicar as motivações de realizar as medições em três diferentes pontos da Ponte Cidade Universitária. Também contém os gráficos que comparam as informações de aceleração com as de tráfego.

No penúltimo capítulo é detalhada a metodologia adotada para a realização da análise, alguns resultados gráficos, uma tabela que compila os dados obtidos e uma análise sobre os problemas gerados pelo ruído do sinal.

Por fim, no sexto capítulo, são apresentadas as considerações finais, a proposição de recomendações mínimas para um sistema de aquisição de dados, para o monitoramento de estruturas e as conclusões tiradas.

2. MONITORAMENTO REMOTO DE OBRAS DE ARTE ESPECIAIS

De acordo com Toledo Júnior (2018), as análises experimentais de vibração realizadas em sistemas estruturais têm uma grande importância prática para a Engenharia Civil. Em seu trabalho, são citados trabalhos relacionados ao monitoramento remoto em estruturas de grande importância, tais como a Ponte Rio-Niterói (BATTISTA et al., 2000), a Ponte Z24 (REYNDERS et al., 2009), localizada na Suíça e também a Ponte Millau (GAUTIER et al., 2005), localizada na França.

O monitoramento dinâmico de estruturas é capaz indicar problemas da saúde estrutural de uma OAE, tais como a presença de fissuras, como explicitado em Lu et al. (2009), vibrações excessivas (DARUS et al., 2005), identificação de danos (CURY et al., 2010), assim como possibilita realizar uma avaliação estrutural sobre a confiabilidade, vulnerabilidade e até mesmo o ciclo de vida da OAE (TORRES et al., 2007).

O Monitoramento de Integridade Estrutural (MIE), em inglês, Structural Health Monitoring (SHM) é capaz de automatizar a avaliação da integridade estrutural das OAEs, por meio do processamento dos dados obtidos por sensores instalados à estrutura. Dentre os sensores comumente utilizados, estão os sensores de deslocamento, extensômetros e acelerômetros.

Entretanto, o MIE frequentemente se utiliza de sistemas conectados via cabo, o que acaba elevando seu custo, dado a necessidade da realização de uma manutenção contínua. Outra opção existente, são os sistemas de conexão sem fio, entretanto possuem um elevado investimento inicial de implantação (TOLEDO JÚNIOR, 2018).

O uso de sensores mais baratos, objetivo deste trabalho, vem ganhando adesão em todo mundo, como será apresentado no item 2.2.3. Para a realização deste trabalho, será utilizado um sistema de obtenção de dados, utilizando-se para sua prototipação a plataforma Arduino UNO, que representa uma solução flexível e de reduzido valor de investimento.

A seguir será tratado sobre como se dá o método convencional de monitoramento de OAEs e em seguida tratará da proposta de protótipo, assim como seus componentes e características.

2.1. MÉTODO CONVENCIONAL DE MONITORAMENTO

Para tratarmos do método convencional, será discutido como alguns trabalhos abordaram o tema, assim como a especificação de seus componentes e os dados fornecidos pelos sistemas implantados.

2.1.1. Monitoramento Estrada de Ferro Carajás

No trabalho realizado por Carvalho Neto e Veloso (2016), para a realização do monitoramento de pontes em concreto armado da estrada de ferro Carajás, foram analisadas seis estruturas, cujas características estão resumidas abaixo:

Tabela 1 - Características Geométricas das Pontes analisadas da EFC.

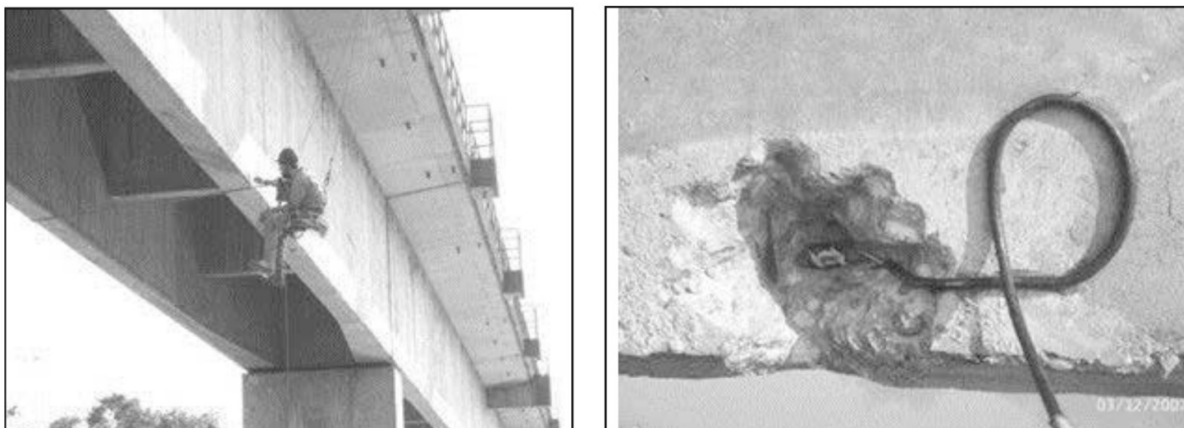
Ref. da Ponte	Tipo de Arranjo	Comprimento Total (m)	Comprimento do Vão (m)
OAE 01	Vão Isostático	44.9	18.0
OAE 08	Vão Contínuo	103.9	22.5
OAE 35	Vão Contínuo	100.0	25.0
OAE 36	Vão Contínuo	375.0	25.0
OAE 51	Vão Contínuo	131.6	15.0
OAE 57	Vão Contínuo	102.0	20.0

Fonte: Carvalho Neto e Veloso (2016, p. 44)

Para o monitoramento, as estruturas foram instrumentadas com extensômetros elétricos e acelerômetros, já para a aquisição dos dados foi utilizado o equipamento ADS-2000, da empresa Lynx®, a uma taxa de aquisição de 100Hz.

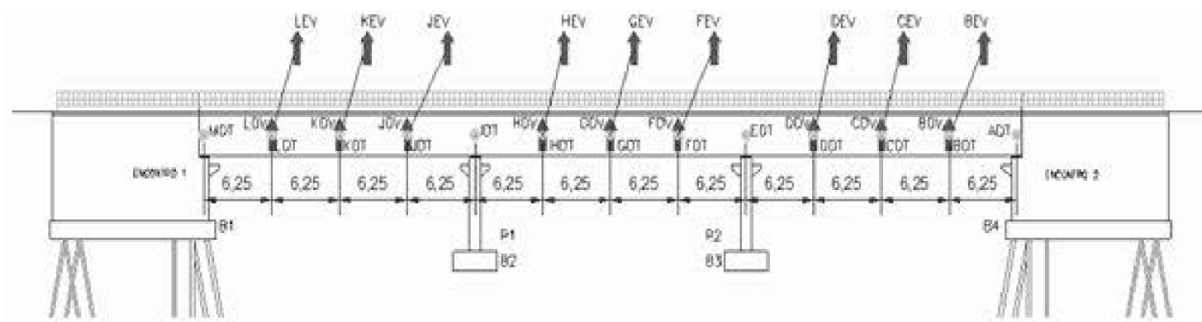
A instrumentação das OAEs se deu da seguinte forma: os extensômetros foram instalados nas seções do meio do vão, sobre os apoios, embaixo e em cima das vigas, como na Figura 1, além dos estribos das vigas e nos pilares da ponte; os acelerômetros foram dispostos verticalmente e transversalmente ao longo do tabuleiro, espaçados de um quarto do comprimento do vão, como indicado na Figura 2.

Figura 1 - Fixação de extensômetro na armadura da parte inferior da longarina.



Fonte: Carvalho Neto e Veloso (2016, p. 45)

Figura 2 - Arranjo dos acelerômetros adotado na OAE 35.



Fonte: Carvalho Neto e Veloso (2016, p. 46)

Os autores realizaram a análise modal da OAE, através do teste de queda de peso (Drop-Weight), semelhante aos realizados por Peeters, Mark e De Roeck (2000) e Luscher et al. (2001), e ilustrado na Figura 3, isso se deve ao fato da estrutura analisada ser de baixa altura e muito rígidas, tornando insuficiente a ação do vento, para a excitação da ponte.

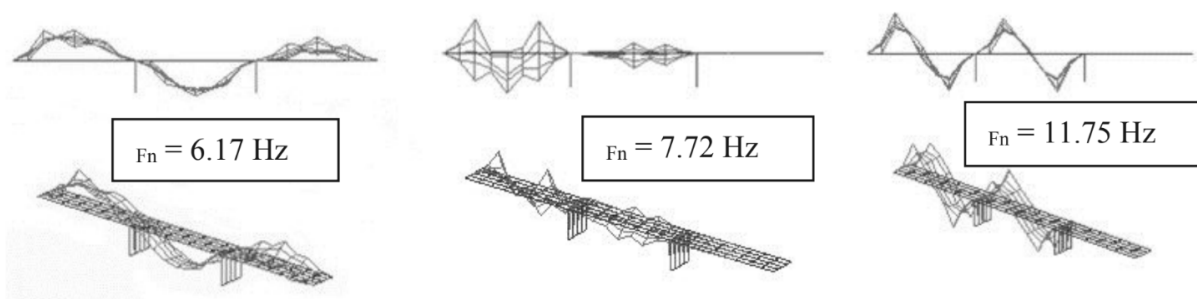
Através do software ARTeMIS®, obtiveram os modos de vibração e as frequências naturais da estrutura, sendo que os resultados obtidos para a OAE 35, estão indicados na Figura 4. Obtiveram então o fator de participação modal de massa (FPM), que avalia a importância relativa de qualquer modo na resposta dinâmica total. Eles citam que, para Chopra (2015), o FPM depende da interação do modo de vibração, com a distribuição da carga externa. Sendo assim, esta grandeza é capaz de avaliar a quantidade necessária de massa, para que um dado modo de vibração se inicie. Desta forma, o FPM se torna um indicador dos mais importantes modos de vibração, que devem ser medidos experimentalmente.

Figura 3 - Ensaio tipo Drop-Weight.



Fonte: Carvalho Neto e Veloso (2016, p. 46)

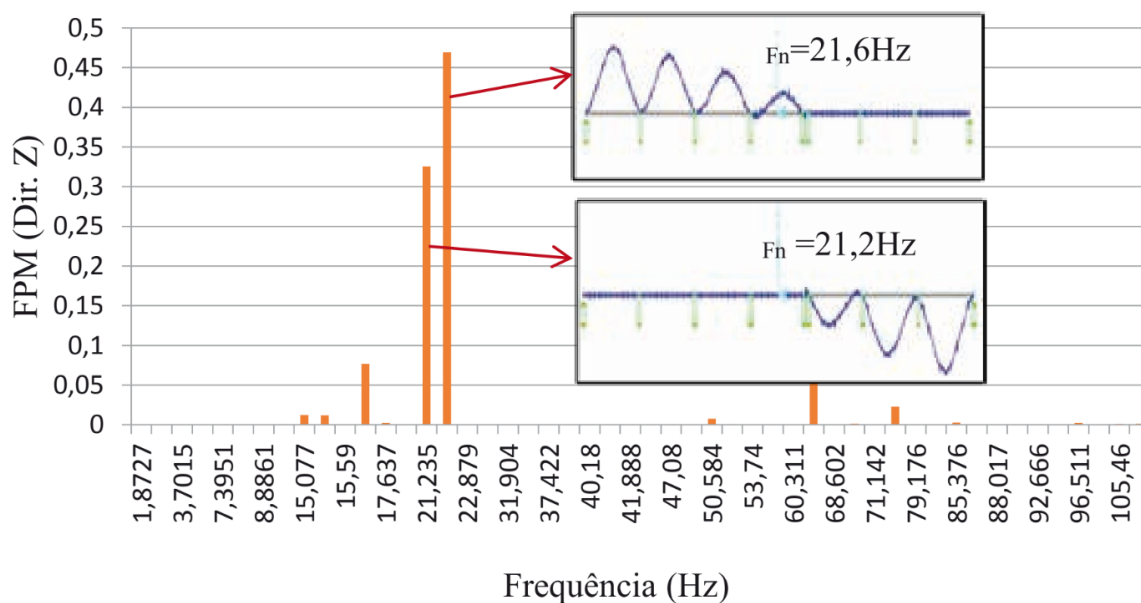
Figura 4 - Modos de vibração experimental, obtido no software ARTeMIS®.



Fonte: Carvalho Neto e Veloso (2016, p. 47)

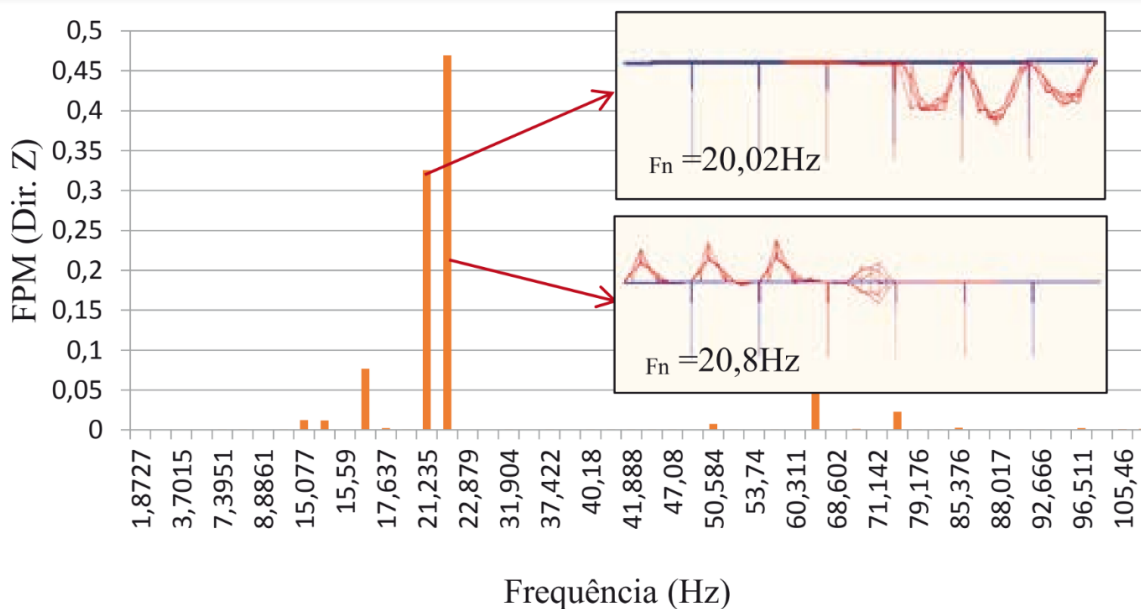
Por fim, realizam a comparação dos dados obtidos numericamente, com aqueles obtidos experimentalmente, tais informações estão apresentadas nos gráficos Gráfico 1 e Gráfico 2.

Gráfico 1 - FPM na direção Z e modos numéricos obtidos.



Fonte: Carvalho Neto e Veloso (2016, p. 48)

Gráfico 2 - FPM na direção Z e modos experimentais obtidos.



Fonte: Carvalho Neto e Veloso (2016, p. 48)

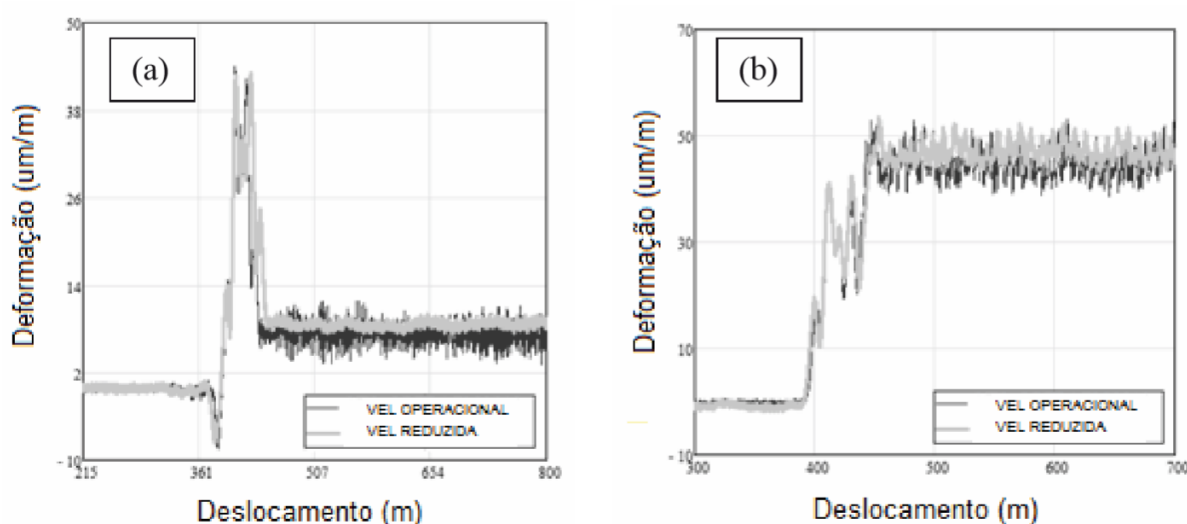
Outra análise realizada pelos autores, foi a avaliação experimental do fator de amplificação dinâmica (FAD), que segundo Pimentel (2008), sua avaliação requer a obtenção das respostas máximas estática e dinâmicas. Ainda segundo eles, a resposta dinâmica máxima, pode ser obtida diretamente da série medida experimentalmente. Entretanto, para a obtenção da resposta estática máxima, deve-se seguir um dos seguintes procedimentos:

- i. Realização de teste quase-estático, fazendo um movimento do veículo em velocidade suficientemente baixa, para que seu efeito possa ser considerado quase estático;
- ii. Aplicação de filtros digitais, do tipo passa-baixa, na série temporal medida, de modo a eliminar os componentes dinâmicos do sinal;
- iii. Numericamente, a partir da análise estática, simulando a passagem das cargas do veículo.

No trabalho realizado na estrada de ferro Carajás, os autores utilizaram uma variação do primeiro processo, dado que não era possível que o mesmo veículo realizasse as passagens em velocidade operacional e reduzida, dado às dificuldades em modificar as operações da ferrovia. Sendo assim, realizaram a determinação dos FADs, por meio das edições de deformação das longarinas da estrutura.

Para a análise da resposta estática das OAEs, foram utilizados trens carregados e descarregados, em movimento e em velocidades baixas e constantes, entre 5 e 15 km/h. As medições de deformação, para os trens semelhantes, em velocidade operacional e em velocidade reduzida, foram sincronizadas, com base na distância percorrida pelo primeiro eixo da primeira locomotiva. Seus resultados estão apresentados no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Série temporal de deformações medidas na OAE 51. (a) Trem descarregado; (b) Trem carregado.



Fonte: Carvalho Neto e Veloso (2016, p. 49)

Na Tabela 2, apresenta-se um resumo dos fatores de amplificação dinâmica, determinados experimentalmente, comparados com os valores normativos.

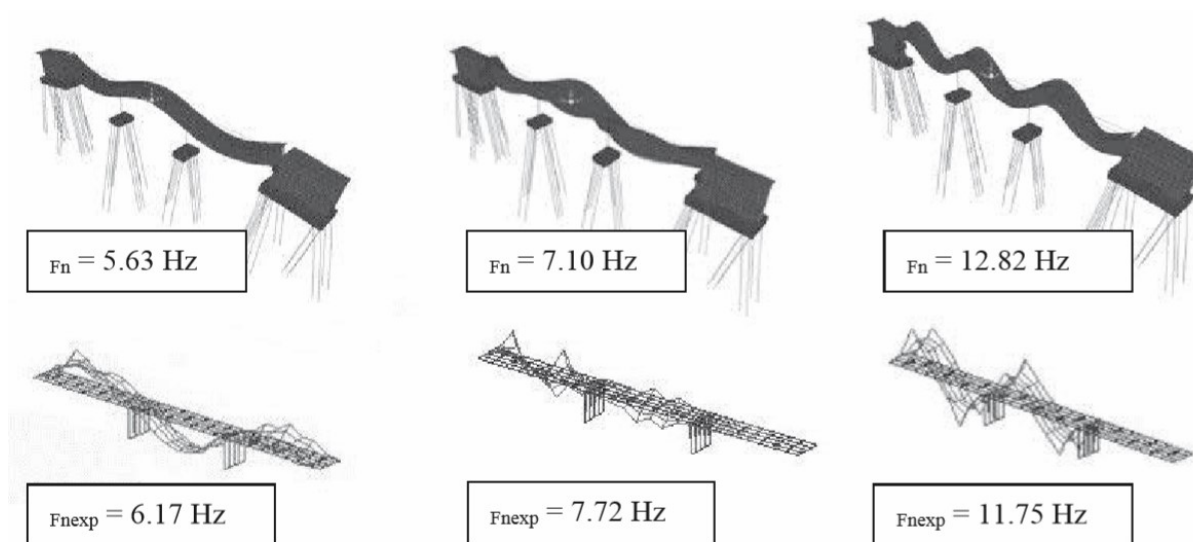
Tabela 2 - Comparação entre os FADs.

Ref. da Ponte	Comprimento do Vão (m)	NBR 7187 (2003)	EUROCODE 1	Φ	
				Carregado	Descarregado
OAE 01	18.0	1.386	1.196	1.041 (39.7)*	1.061 (47.3)*
OAE 08	22.5	1.366	1.129	1.073 (63.8)	1.014 (58.2)
OAE 35	25.0	1.356	1.123	-	1.1012 (72.4)
OAE 36	25.0	1.356	1.095	1.046 (53.1)	1.007 (67.5)
OAE 51	15.0	1.401	1.205	1.021 (45.6)	1.027 (47.5)
OAE 57	20.0	1.377	1.139	-	1.143 (35.7)

* Os valores correspondem a velocidade em km/h do trem

Fonte: Carvalho Neto e Veloso (2016, p. 50)

Figura 5 - Comparação entre os modos de vibração numérico e experimental.



Fonte: Carvalho Neto e Veloso (2016, p. 50)

Concluíram então que a metodologia para o monitoramento e análise estrutural, das pontes e viadutos da estrada de ferro Carajás, permitiu uma avaliação precisa de suas condições de segurança.

2.1.2. Monitoramento de Saúde Estrutural - Arteris

No trabalho desenvolvido pela empresa Arteris, cujo coordenador do projeto foi o Prof. Túlio Nogueira Bittencout, com o objetivo de aplicar as técnicas de SHM, para avaliação das Pontes do Rio Jaguari, localizados em Extrema – MG. No projeto foram utilizados os seguintes sensores:

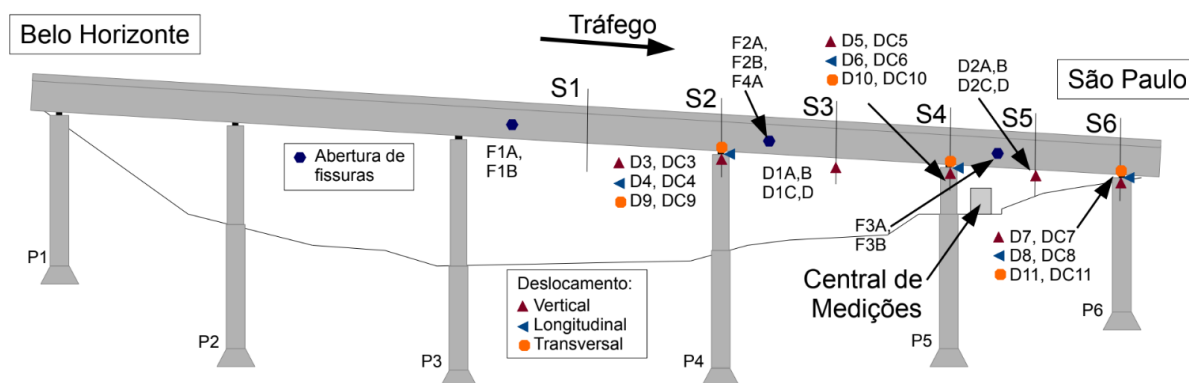
Tabela 3 - Resumo do sistema de monitoramento da ponte Rio Jaguari.

Sistema	Fenômenos Medidos	Sensores	Sistema de Aquisição
Rápido	Cargas móveis.	- Extensômetro elétrico para armaduras; - Extensômetro de ponte completa BDI para concreto; - Transdutor de deslocamento potenciométrico.	National Instruments CompactRIO
Lento	- Efeitos de temperatura; - Efeitos de degradação.	- Extensômetro de corda vibrante para armaduras e concreto Geokon; - Transdutores de deslocamento de corda vibrante Geokon.	Geokon MICRO-1000

Fonte: Arteris (2015, p. 22)

A localização da instalação dos sensores, foi baseada na análise estrutural da Ponte do Rio Jaguari e também na viabilidade da instalação dos mesmos, dado a dificuldade de acesso para serem instalados. A localização dos sensores, assim como relação dos sensores instalados estão na Figura 6 e na Tabela 4, respectivamente.

Figura 6 - Vista do sistema de monitoramento, mostrando a localização dos sensores de deslocamento e abertura de fissuras.



Fonte: Arteris (2015, p. 23)

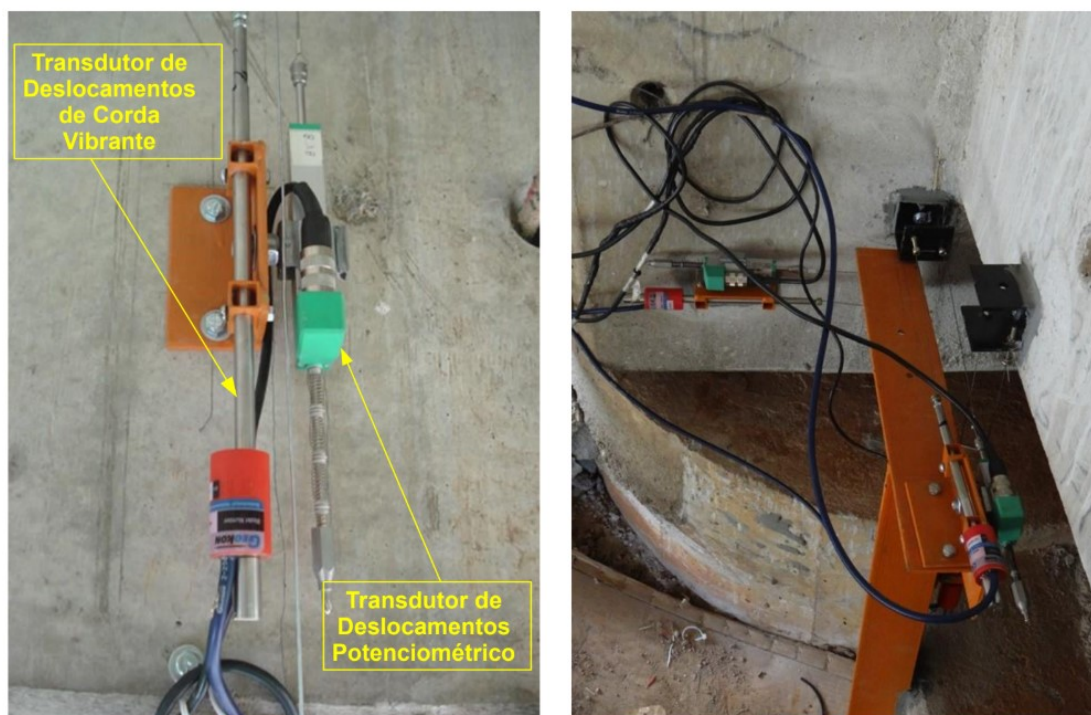
Tabela 4 - Relação de sensores instalados na ponte do Rio Jaguari.

	Sistema Lento	Sistema Rápido
Deslocamento dos aparelhos de apoio	D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11	DC3, DC4, DC5, DC6, DC7, DC8, DC9, DC10, DC11
Deslocamento do meio do vão viga 1 (interior à curva)	D1A, D2A	D1C, D2C
Deslocamento no meio do vão viga 2 (exterior à curva)	D1B, D2B	D1D, D2D
Deformação	G1, G2, ..., G19	E1, E2, ..., E19
Abertura de fissuras na viga 1	F1A, F2A, F3A, F4A	N.A.
Abertura de fissuras na viga 2	F1B, F2B, F3B	N.A.
Abertura de fissuras na laje	L1, L2, L3, L4	N.A.

Fonte: Arteris (2015, p. 23)

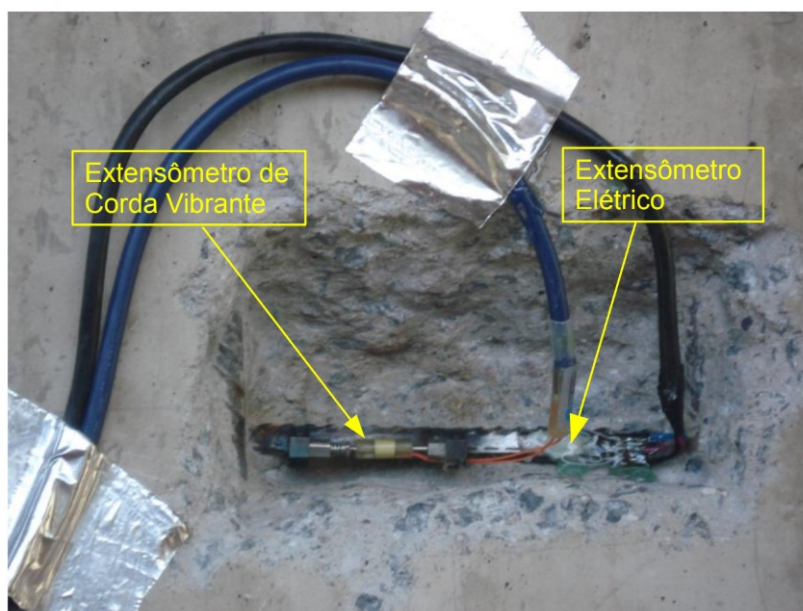
Ilustra-se no relatório o modo de instalação dos diversos sensores da estrutura, tais como:

Figura 7 - Transdutores de deslocamento instalados no meio do vão e nos apoios da ponte.



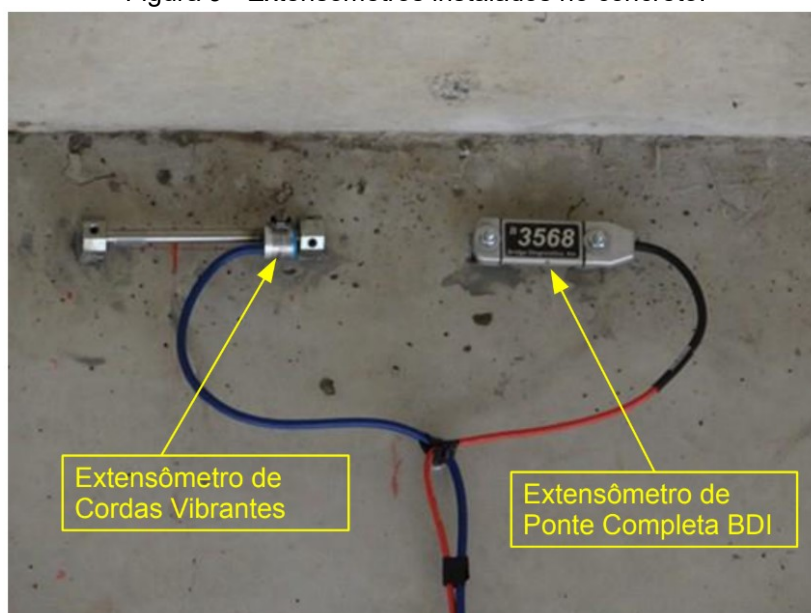
Fonte: Arteris (2015, p. 24)

Figura 8 - Extensômetros instalados nas armaduras.



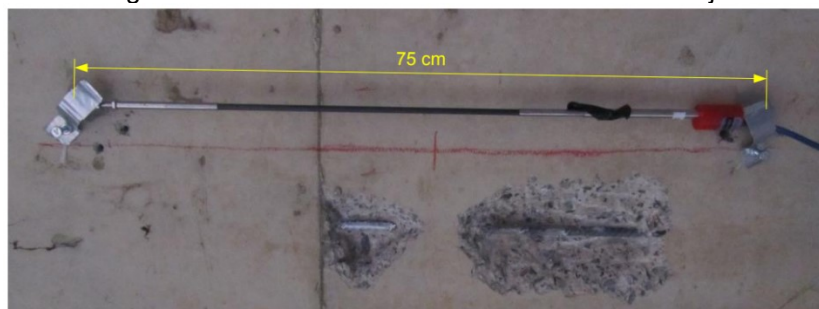
Fonte: Arteris (2015, p. 26)

Figura 9 - Extensômetros instalados no concreto.



Fonte: Arteris (2015, p. 26)

Figura 10 - Transdutor de abertura de fissura em laje.

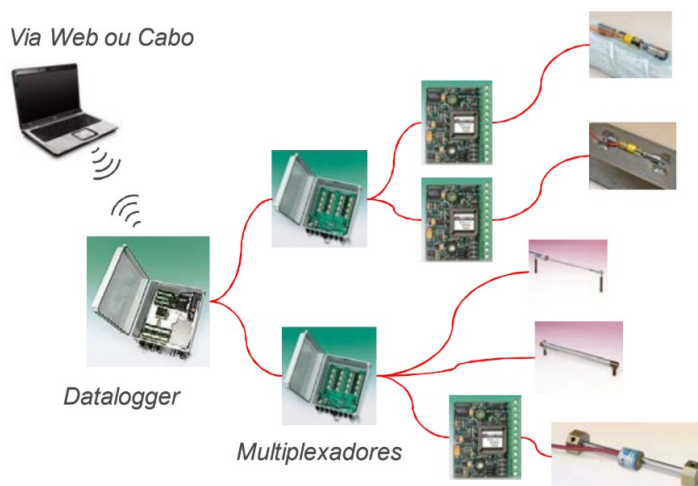


Fonte: Arteris (2015, p. 27)

2.1.3. Sistema de Aquisição de Dados

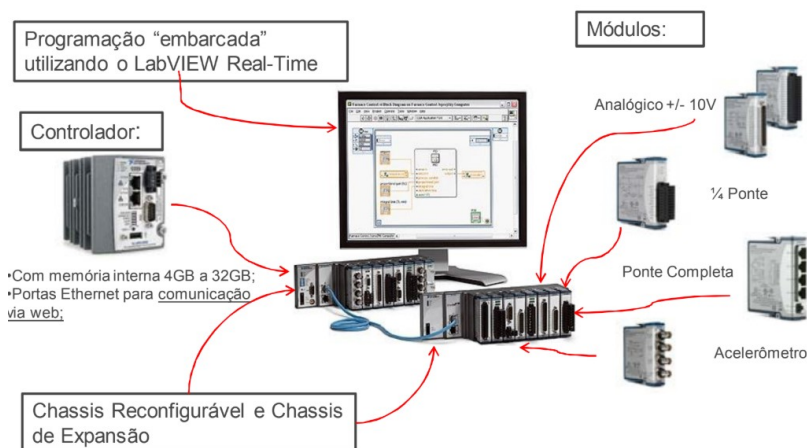
Atualmente, os sistemas de aquisição de dados, no sistema convencional, podem ser via web ou via cabo, sendo composto dos sensores, que são ligados à multiplexadores, que se comunicam com o Datalogger, que envia os dados ao computador, como ilustrado na Figura 11. Embora possam ser modulares ou via sem fio, como nas figuras Figura 12, Figura 13 e Figura 14.

Figura 11 - Sistema convencional, não modular.



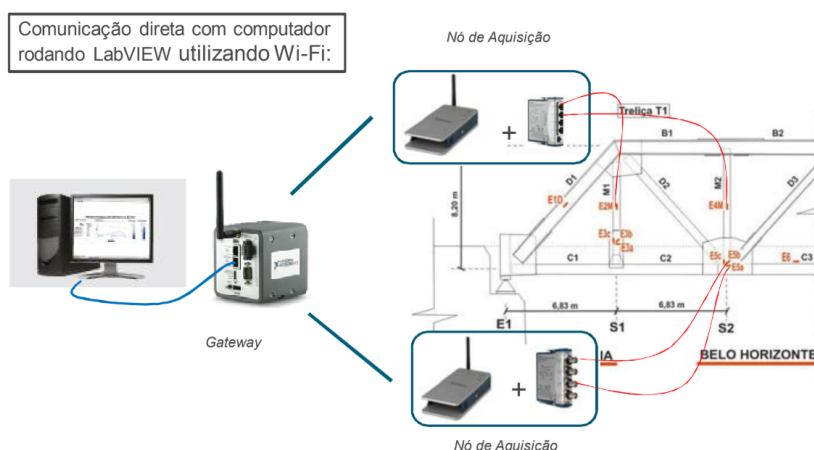
Fonte: Bittencourt (2013, p. 10)

Figura 12 - Sistema modular e programável.



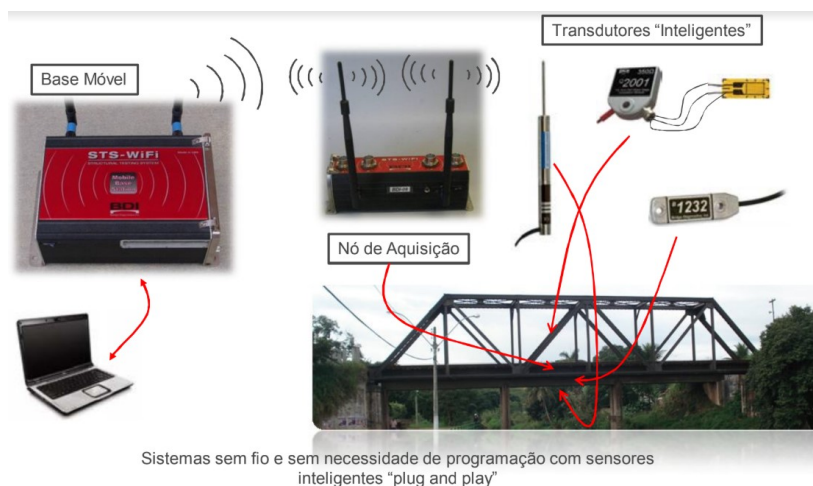
Fonte: Bittencourt (2013, p. 11)

Figura 13 - Sistema de comunicação direta.



Fonte: Bittencourt (2013, p. 12)

Figura 14 - Sistema sem fio e sem necessidade de programação, com sensores inteligentes ("Plug and Play").



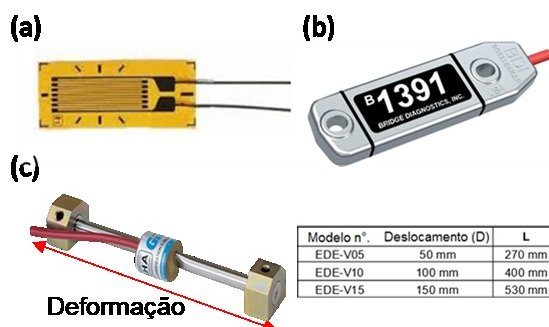
Fonte: Bittencourt (2013, p. 13)

Para estes sistemas serem utilizados, deve-se empregar o uso de sensores, tais como:

i. Sensores de deformação

São utilizados o extensômetro elétrico e o transdutor de corda vibrante, que estão indicados na Figura 15. Sendo que, o primeiro é mais adequado para pequenas deformações e o segundo para grandes deformações.

Figura 15 - Sensores de deformação. (a) Extensômetro elétrico; (b) Extensômetro com quatro extensômetros elétricos; (c) Transdutor de corda vibrante.



Fonte: Bittencourt (2013, p. 3)

ii. Sensores de deslocamentos

Potenciômetro, corda vibrante e transdutores para medição de deslocamento linear (Linear Variable Differential Transformer, LVDT).

iii. Sensores de aceleração

Utiliza-se acelerômetro com base em extensômetro elétrico, servo-acelerômetro, acelerômetro capacitivo e acelerômetro com base em sistemas microeletromecânicos (Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS).

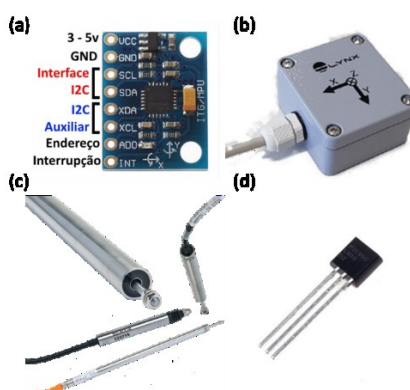
iv. Sensores de rotação

Os tipos de sensores de rotação apresentados, foram clinômetro com base em extensômetro elétrico, servo clinômetro e clinômetro MEMS.

v. Sensores de temperatura

Termômetros digitais, elétricos e com base em sistemas MEMS.

Figura 16 - Sensores diversos. (a) Acelerômetro com base em MEMS; (b) Clinômetro MEMS; (c) LVDT; (d) Sensor de temperatura MEMS.



Fonte: Thomsen (2014); Lynx Tecnologia (2019); Honeywell Sensing (2019); Thomsen (2014)

2.2. ANÁLISE MODAL

A análise modal estuda as propriedades dinâmicas de estruturas, para tal, utilizam-se testes estruturais, como amplamente abordado no item 2.1.1, ou através de simulações baseadas em análise de elementos finitos. As propriedades dinâmicas incluem as frequências naturais ou de ressonância e os modos estruturais de vibração, dependem da massa, rigidez e do coeficiente de amortecimento da estrutura. Tais propriedades determinam o comportamento de vibração estrutural, quando solicitadas pelas cargas operacionais¹³.

A análise modal experimental (EMA) pode ser utilizada para cálculos de respostas de vibrações, o que permite uma análise eficiente da saúde e integridade da estrutura. Segundo a classificação dos testes estruturais dinâmicos de Zwolski e Bien (2011), podemos dividi-los da seguinte forma:

- i. Testes Operacionais (OT): identificação dos parâmetros de vibração da estrutura estudada, para um carregamento específico;
- ii. Testes Modais (MT): identificação dos parâmetros de vibração próprios das estruturas, os quais são independentes do tipo de excitação.

Os testes operacionais (OT), normalmente usam o tráfego (veículos, trens e pedestres) ou o ambiente (vento e movimentos do terreno) para identificar a resposta da estrutura, para um carregamento dinâmico específico. Quanto ao teste modal (MT), é subdividido em duas categorias:

- i. Análise Modal Operacional (OMA), que utiliza forças imensuráveis, geradas pelo tráfego ou ambiente;
- ii. Análise Modal Clássica (CMA), que utiliza excitadores com força mensurada.

Com a análise modal operacional (OMA), pode-se obter a frequência natural e coeficientes de amortecimento. Para a obtenção de dados mais confiáveis, deve-se certificar que o carregamento deve ser aplicado randomicamente, na questão do espaçamento, distribuição e frequência, em toda a estrutura e durante todo o período do teste.

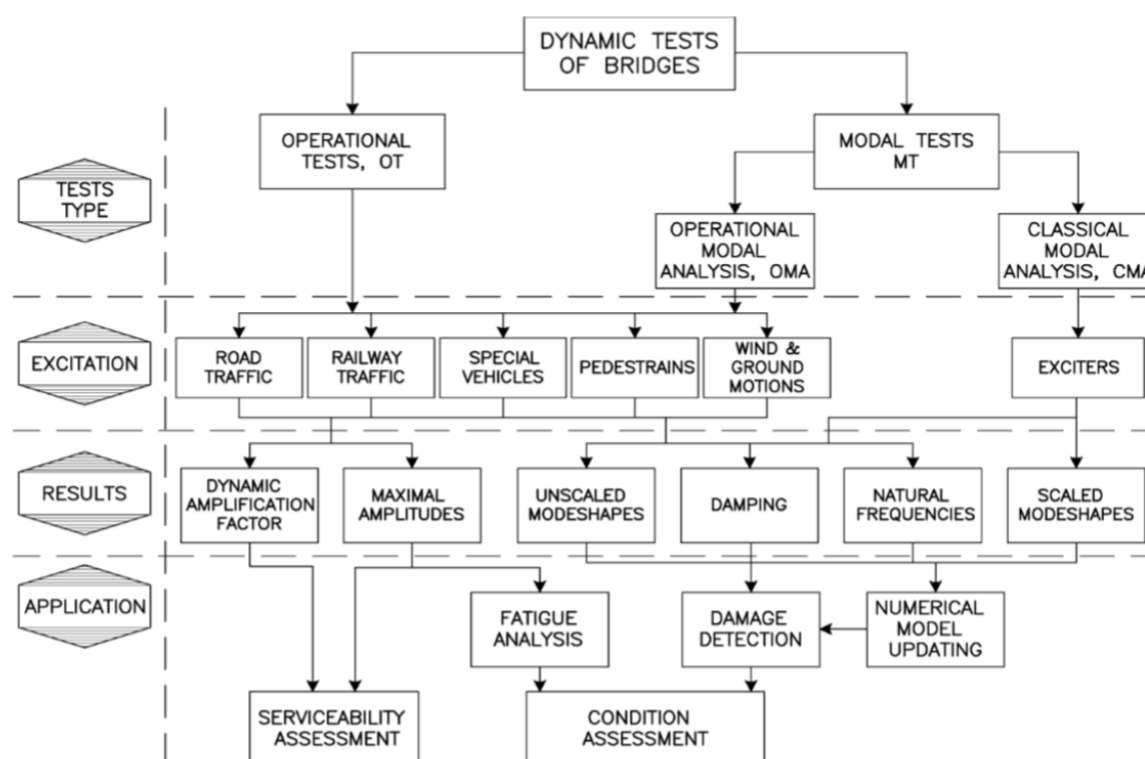
¹³ Informações fornecidas pela Siemens Digital Industries Software. Disponível em: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/modal-analysis/13172>.

Com a análise modal clássica (CMA), pode-se obter a frequência natural e coeficientes de amortecimento, correlacionados à massa, dado que a carga é um parâmetro conhecido. Dado que a excitação aplicada não afeta a massa ou a rigidez da estrutura testada, considera-se o CMA reflete o estado puro da estrutura.

O OMA é uma alternativa mais viável, quando comparado ao CMA, nos casos em que a estrutura analisada é de grande porte, como pontes de grande comprimento, as quais oferecem dificuldade em ser excitadas por equipamentos.

O trabalho de Zwolski e Bien (2011), apresenta um diagrama, dos tipos de teste, de excitação, de resultados e de aplicações, empregados em testes dinâmicos de OAEs. Tal diagrama é apresentado na Figura 17.

Figura 17 - Testes dinâmicos de pontes: tipos de testes, técnicas de excitação, parâmetros modais obtidos e suas aplicações.



Fonte: Zwolski e Bien (2011, p. 591)

A seguir, serão abordados alguns trabalhos que envolvem o conceito de determinação das frequências naturais de excitação estrutural e posteriormente, no item 5, será exposto os resultados obtidos do processamento dos dados coletados em campo.

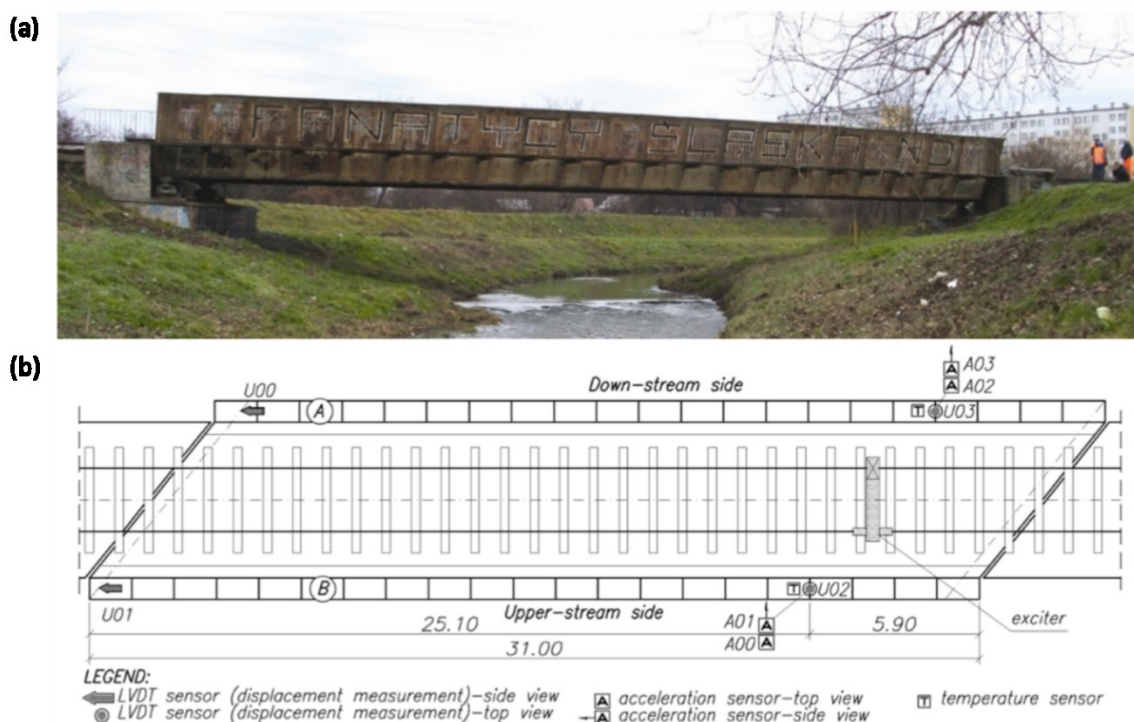
2.2.1. Comparação entre Análise Modal Operacional (OMA) e Análise Modal Clássica (CMA)

Assim como no trabalho desenvolvido por Carvalho Neto e Veloso (2016), os pesquisadores Zwolski e Bien (2011), também analisaram as propriedades dinâmicas de uma ponte ferroviária (Figura 18a), seu método de vibração forçada utilizou um equipamento rotacional de massa excêntrica, fixada sobre os trilhos (Figura 19).

Primeiramente, realizaram as medições em condições operacionais, com trens passando a uma velocidade média de 40 km/h, para tal, utilizaram quatro acelerômetros B12/200 e quatro LVDTs, ambos da empresa Hottinger Baldwin Messtechnik (Figura 18b). Um ponto interessante da análise desenvolvida pelos autores, foi a divisão do sinal obtido pelos acelerômetros em três diferentes fases (Gráfico 4), que são:

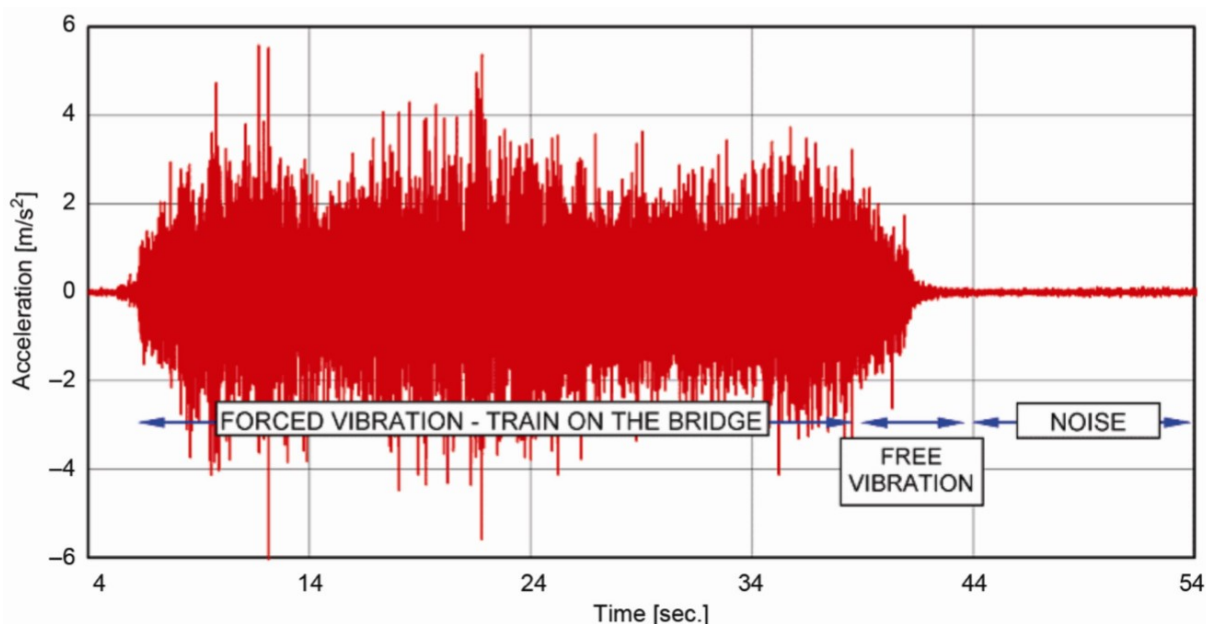
- i. Vibração resultante durante a passagem do trem;
- ii. Vibração livre;
- iii. Ruído.

Figura 18 - Ponte ferroviária de médio porte, localizada sobre o rio Ślęza em Wrocław, Polônia: (a) visão geral; (b) dimensões da estrutura, localização e caracterização dos sensores e posição do excitador.



Fonte: Zwolski e Bien (2011, p. 594 e 596)

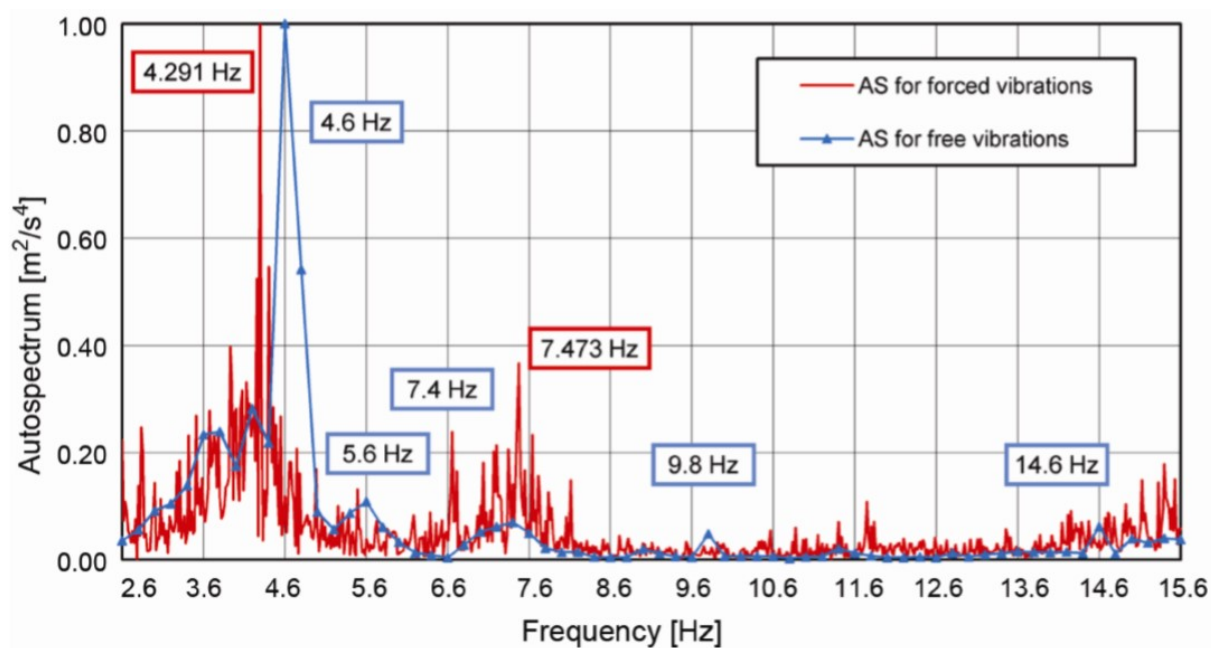
Gráfico 4 - Sinal obtido pela passagem do trem.



Fonte: Zwolski e Bien (2011, p. 595)

Posteriormente, na análise do sinal, realizaram a análise espectral referente as fases i e ii separadamente, obtendo que as frequências naturais de excitação de 4,291 Hz e 4,6 Hz, respectivamente, como mostrado no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Análise espectral do sinal obtido.



Fonte: Zwolski e Bien (2011, p. 595)

No teste de vibração forçada, utilizando excitador de massa excêntrica (Figura 19), configurou-se o equipamento em três diferentes configurações:

- i. Teste com variação exponencial de excitação, de 3,0 a 24,0 Hz, tempo de aquisição de 212 s e três repetições;
- ii. Teste com variação linear de excitação, de 3,0 a 24,0 Hz, tempo de aquisição de 317 s e duas repetições;
- iii. Teste com variação harmônica de excitação, de 3,0 a 13,2 Hz, com passo de 0,016 a 0,032 Hz, tempo de aquisição de 31 a 62 s.

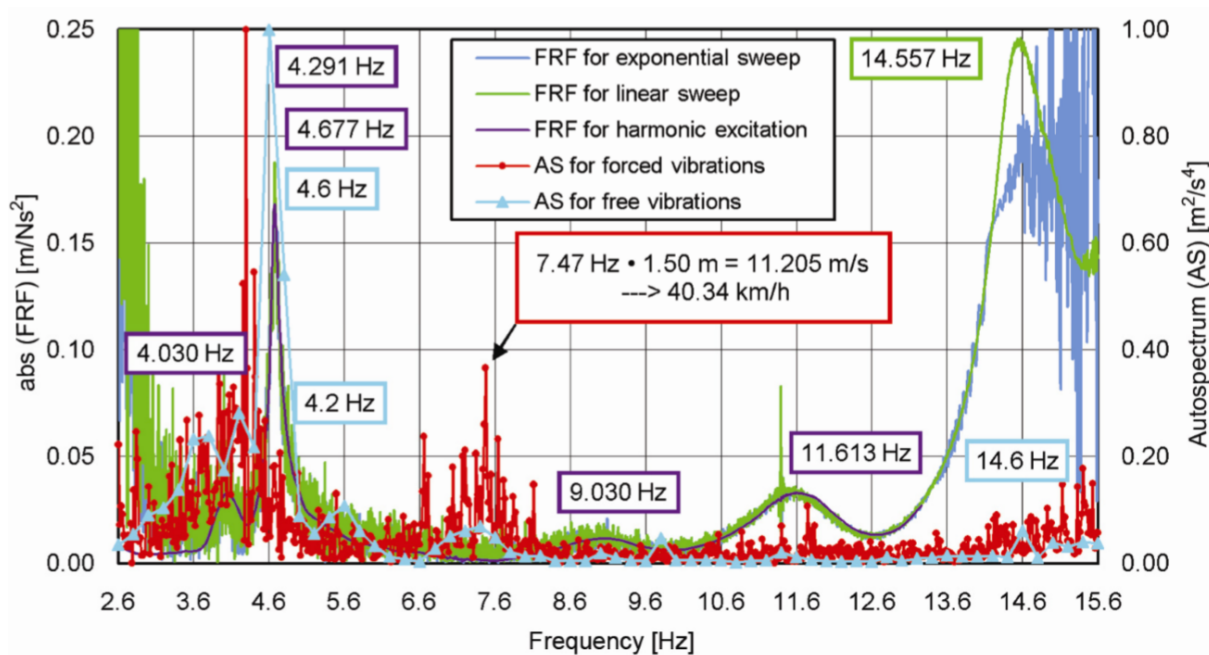
Os resultados deste teste, são apresentados conjuntamente aos dados obtidos anteriormente, nos gráficos Gráfico 6 e Gráfico 7.

Figura 19 - Equipamento fixado sobre trilho e detalhe.



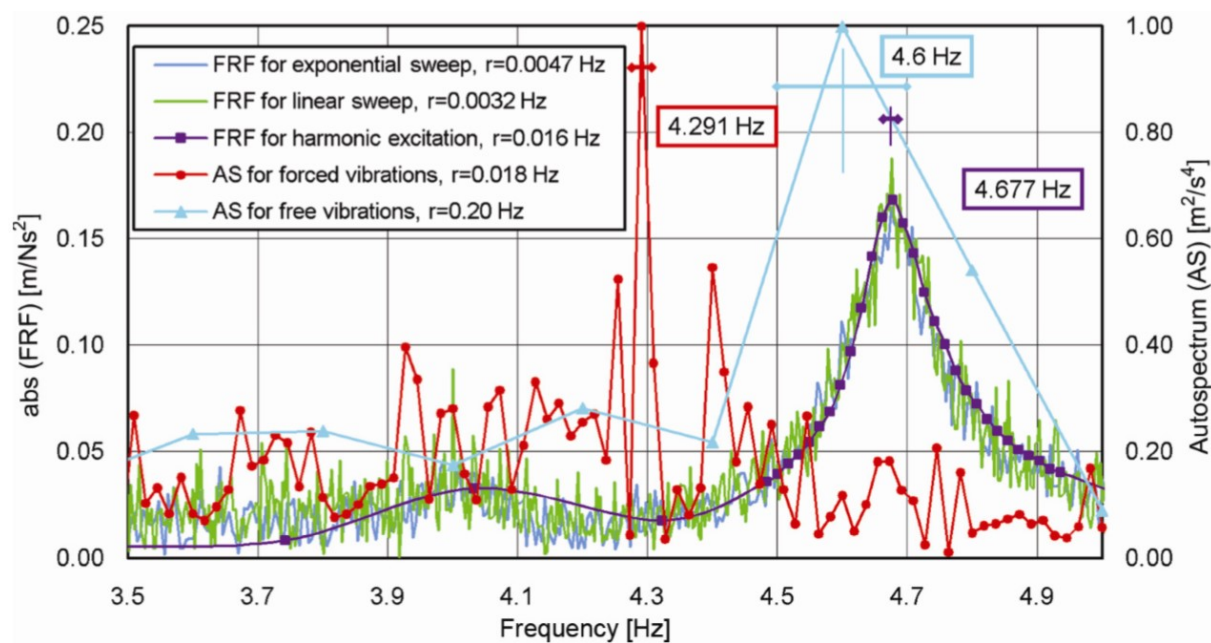
Fonte: Zwolski e Bien (2011, p. 592 e 596)

Gráfico 6 - Análise Espectral dos sinais obtidos.



Fonte: Zwolski e Bien (2011, p. 597)

Gráfico 7 - Detalhe da Análise Modal, frequências entre 3,5 e 5,0 Hz.



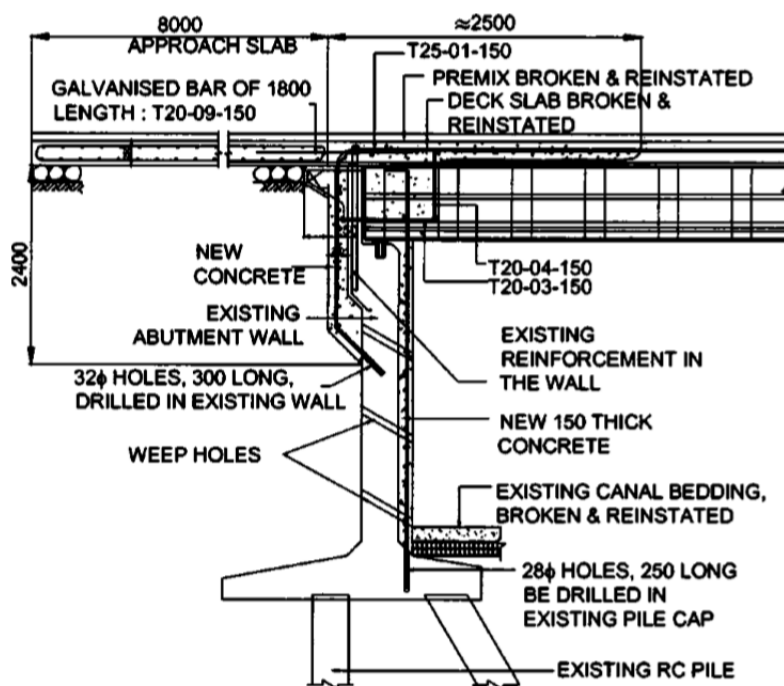
Fonte: Zwolski e Bien (2011, p. 597)

2.2.2. Comparação Análise Modal Clássica e Análise Modal Computacional

No trabalho realizado por Brownjohn et al. (2003), a obra de arte especial (OAE), alvo do estudo, sofreria uma recuperação. Anteriormente a esta intervenção, realizaram a monitorização da ponte, utilizando-se do método convencional e obtiveram os parâmetros dinâmicos da estrutura. Posteriormente a restauração, retomaram o estudo para reavaliar os parâmetros dinâmicos da estrutura. Para o estudo, utilizaram dezesseis acelerômetros, modelo QA-700, com resolução de 10^{-5} m/s^2 .

Verificou-se que os aparelhos de apoio da estrutura, haviam sido sobrecarregados. O aparelho de apoio possibilita a movimentação natural de elementos estruturais em pontes e viadutos, absorvendo os esforços horizontais e de rotações e transmitindo ao apoio da estrutura os esforços verticais¹⁴. A interferência estrutural proposta, consistia na conversão de sistema apoiado, para uma estrutura sem juntas, com a superestrutura e os pilares se tornando contínuos e monolíticos. Na Figura 20, está apresentado o detalhamento da modernização da ponte.

Figura 20 - Detalhe da proposta de modernização da estrutura alvo do estudo.

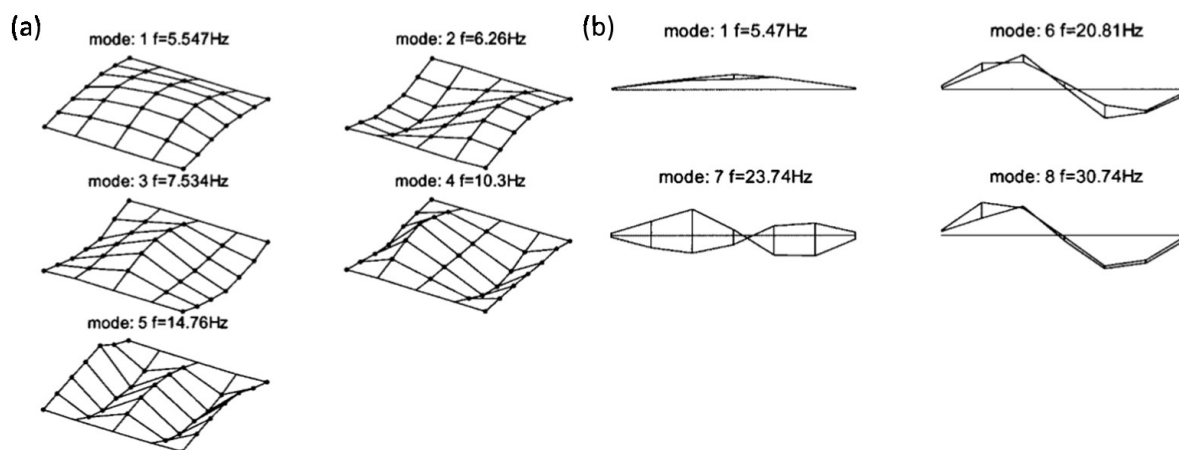


Fonte: Brownjohn et al. (2003, p. 163)

¹⁴ Informações disponibilizadas por Disprotex Produtos Técnicos para Construção. Disponível em: <http://www.diprotec.com.br/produto/neoprene/>.

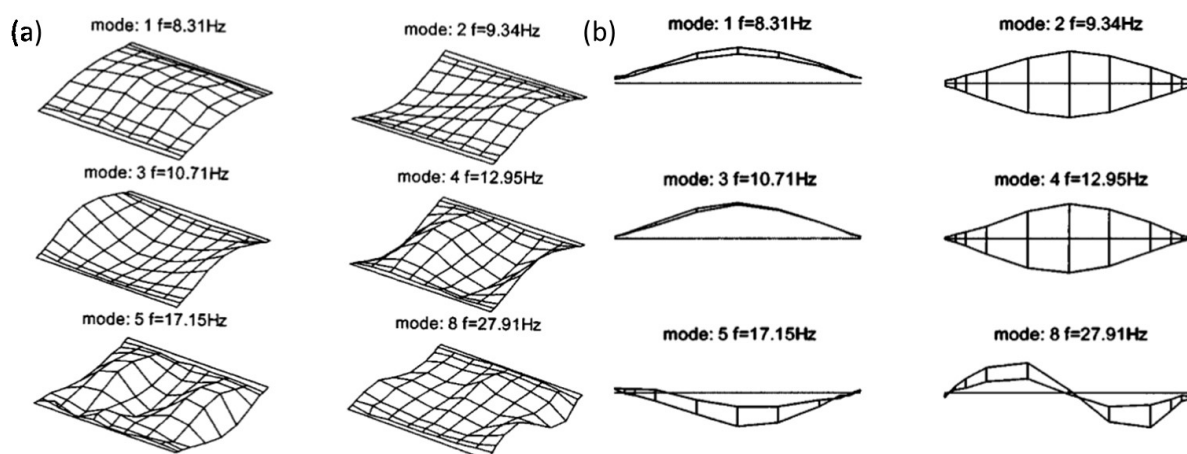
Primeiramente foi proposto um modelo computacional, por meio do método dos elementos finitos, simplificado (Figura 21) e posteriormente um modelo com maior discretização (Figura 22).

Figura 21 - Modelo de elementos finitos inicial. (a) Modos e frequências naturais; (b) Vista lateral.



Fonte: Brownjohn et al. (2003, p. 166)

Figura 22 - Modelo de elementos finitos mais discretizado. (a) Modos e frequências naturais; (b) Vista lateral.



Fonte: Brownjohn et al. (2003, p. 168)

Os resultados obtidos pela CMA, da estrutura pré e pós modernização, estão apresentados na Tabela 5. Nota-se que o modelo com maior discretização, aproxima-se mais do valor obtido pelo método clássico, além do fato do aumento da frequência natural de excitação da estrutura modernizada, quando comparada à estrutura original.

Isto se deve ao fato de a frequência natural (f_n) ser uma característica própria do sistema, dependendo apenas da rigidez (k) e da massa (m). Considerando que a restauração tornou a estrutura monolítica, teve-se o aumento significativo do módulo de rigidez.

$$f_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

Tabela 5 - Comparação dos valores obtidos para a estrutura original e modernizada.

Modo	$f_{e^a, \text{original}}$ (Hz)	$f_{e^a, \text{modernizada}}$ (Hz)	Variação (%)
1	5,55	8,31	49,7
2	6,26	9,34	49,2
3	7,53	10,71	42,2
4	10,3	12,95	25,7
5	14,76	17,15	16,2
6	20,81	21,02	1,0
7	23,74	26,89	13,3
8	30,74	27,91	-9,2

Fonte: Própria autoria (2019)

2.2.3. Análise Modal Operacional Utilizando Smartphones

O trabalho realizado por Castellanos-Toro et al. (2018), realiza a Análise Modal Operacional (OMA) de doze obras de arte especiais (OAEs), Figura 23. Por meio dos acelerômetros instalados nas OAEs, sendo eles o de referência (Wilcoxon 731A), com uma taxa de aquisição de 256 Hz e o smartphone, modelo LG H440, configurado a uma taxa de 100 Hz.

Figura 23 - Obras de arte especiais estudadas.

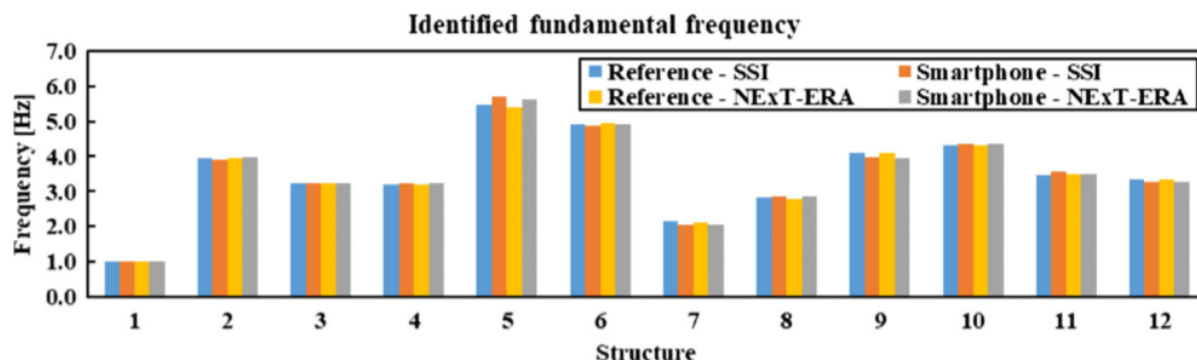


Fonte: Castellanos-Toro et al. (2018, p. 498)

Realizou dois processos diferentes para a análise do sinal. O primeiro foi o Natural Excitation Technique - Eigensystem Realization Algorithm (NExT-ERA), que é uma técnica comumente utilizada na Engenharia Civil, para a obtenção da frequência natural, modo normal e taxas de amortecimento. O segundo foi o Stochastic Subspace Identification (SSI), que também é uma técnica de extração de parâmetros dinâmicos de estruturas, a partir de sinais de aceleração.

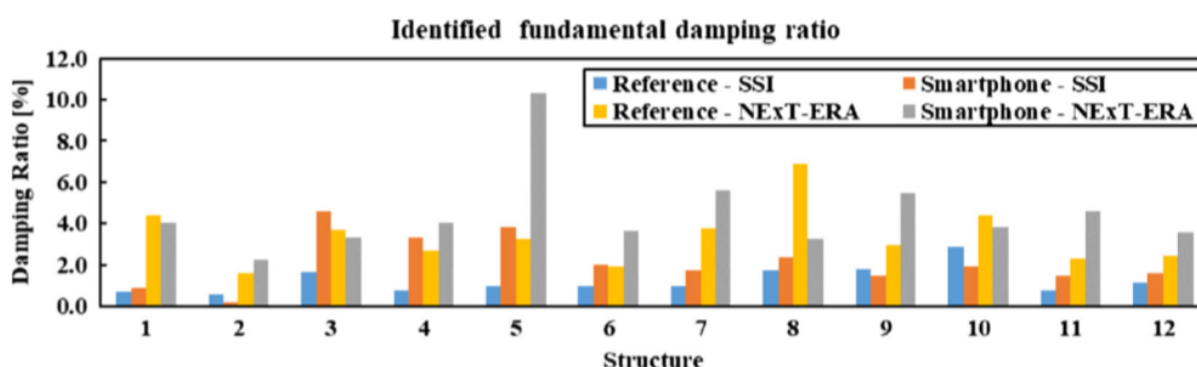
Os dados obtidos pelos pesquisadores, estão resumidos nos Gráfico 8 e Gráfico 9.

Gráfico 8 - Compilado dos dados de frequência natural obtidos.



Fonte: Castellanos-Toro et al. (2018, p. 498)

Gráfico 9 - Compilado dos dados de taxa de amortecimento obtidos.



Fonte: Castellanos-Toro et al. (2018, p. 498)

Observando os dados apresentados no Gráfico 8, nota-se que, tanto para o acelerômetro de referência, quanto para o acelerômetro do smartphone, não há diferença observável entre as técnicas de análise NExT-ERA e SSI. Quanto a comparação entre o acelerômetro de referência e do smartphone, embora seja percebida uma variação dos parâmetros obtidos, não representa uma grande variação.

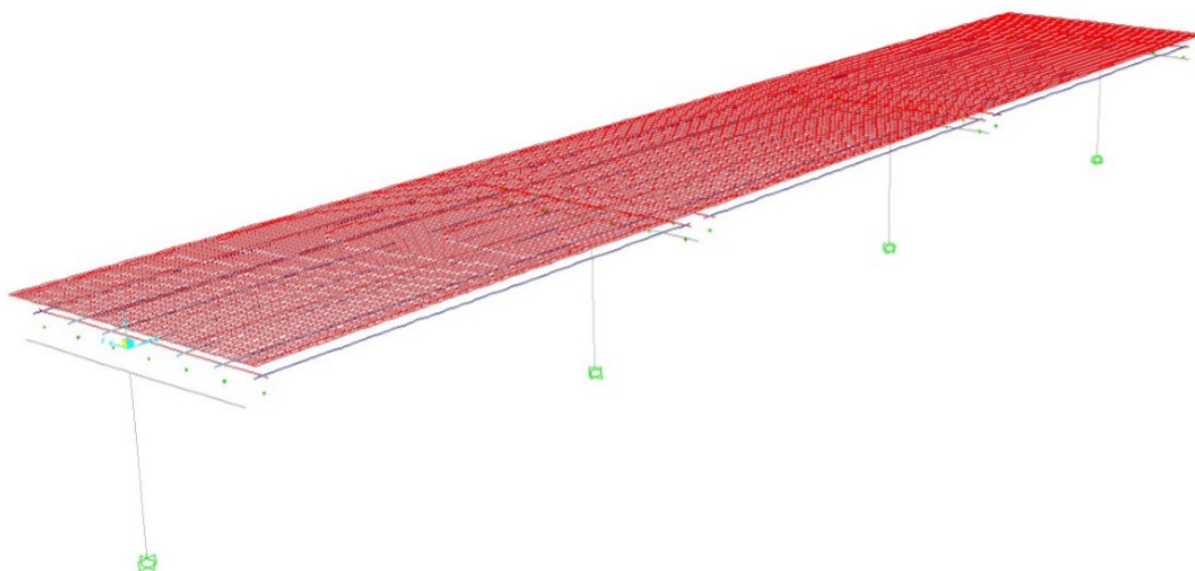
Quanto à taxa de amortecimento, observa-se uma grande variação entre os dados obtidos, tanto entre os tipos de acelerômetros utilizados, quanto entre as técnicas de análise empregadas no estudo, sendo que o NExT-ERA, apresenta em média, coeficientes de amortecimento maiores que os apresentados pelo método SSI.

2.2.4. Análise Modal Computacional

No trabalho desenvolvido no Trecho 11 – Norte do Rodoanel Mário Covas, foi desenvolvido um modelo computacional por MEF (Figura 24 e Figura 25) e foram realizadas duas análises:

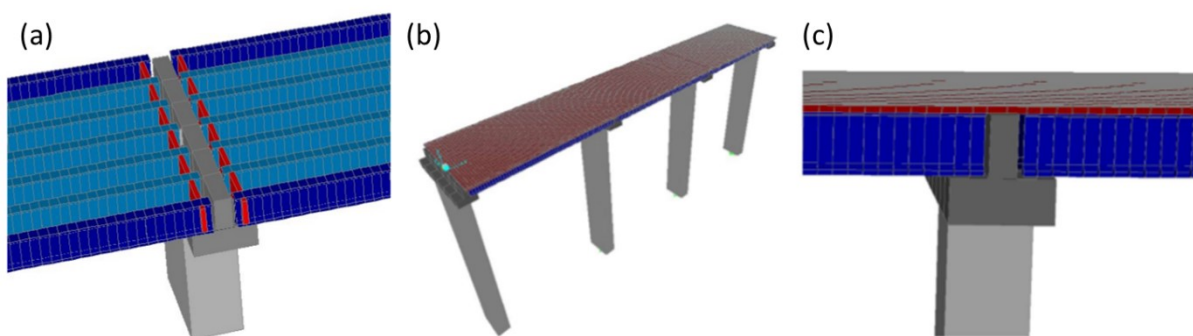
- i. Vibração livre: para obtenção das frequências e modos de vibração naturais;
- ii. Vibração por passagem de comboio.
 - a. Comboio 1: três linhas de quatro veículos trafegando em paralelo e à mesma velocidade, defasadas de dois segundos;
 - b. Comboio 2: quatro linhas de dois veículos trafegando em paralelo e à mesma velocidade, defasadas de um segundo.

Figura 24 - Modelo gerado.



Fonte: Dersa (2017, p. 9)

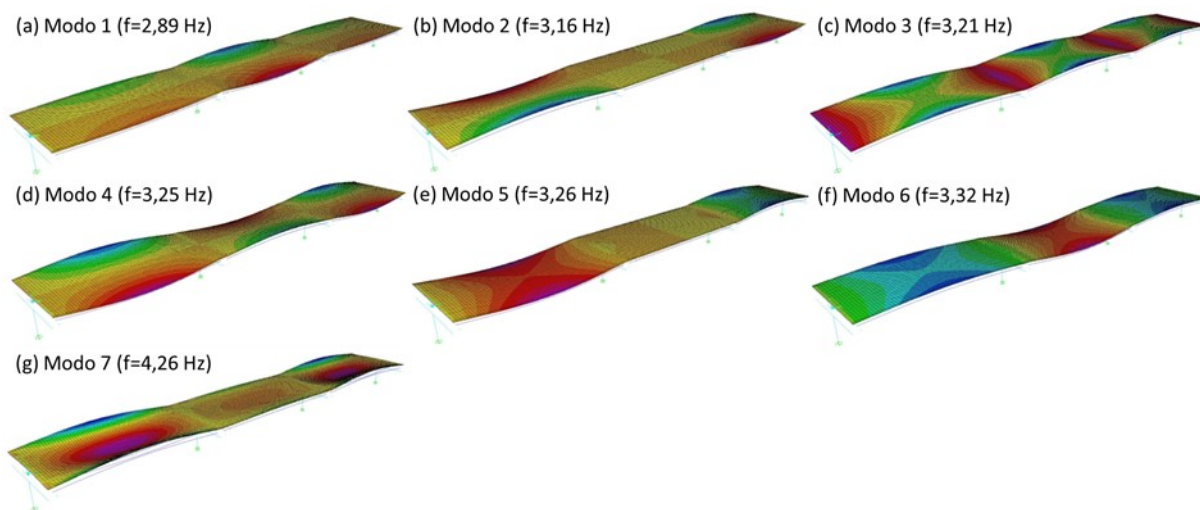
Figura 25 - Detalhes do modelo gerado. (a) Detalhe do apoio central com travessa, longarinas e transversinas; (b) Vista; (c) Detalhe de um apoio central.



Fonte: Dersa (2017, p. 9 e 10)

Os parâmetros dinâmicos do modelo de vibração livre estão expostos na Figura 26 e Tabela 6, já os dados do modelo de vibração por passagem de comboio, estão na apresentados na Figura 27 e Tabela 7.

Figura 26 - Resultados gráficos do modelo.



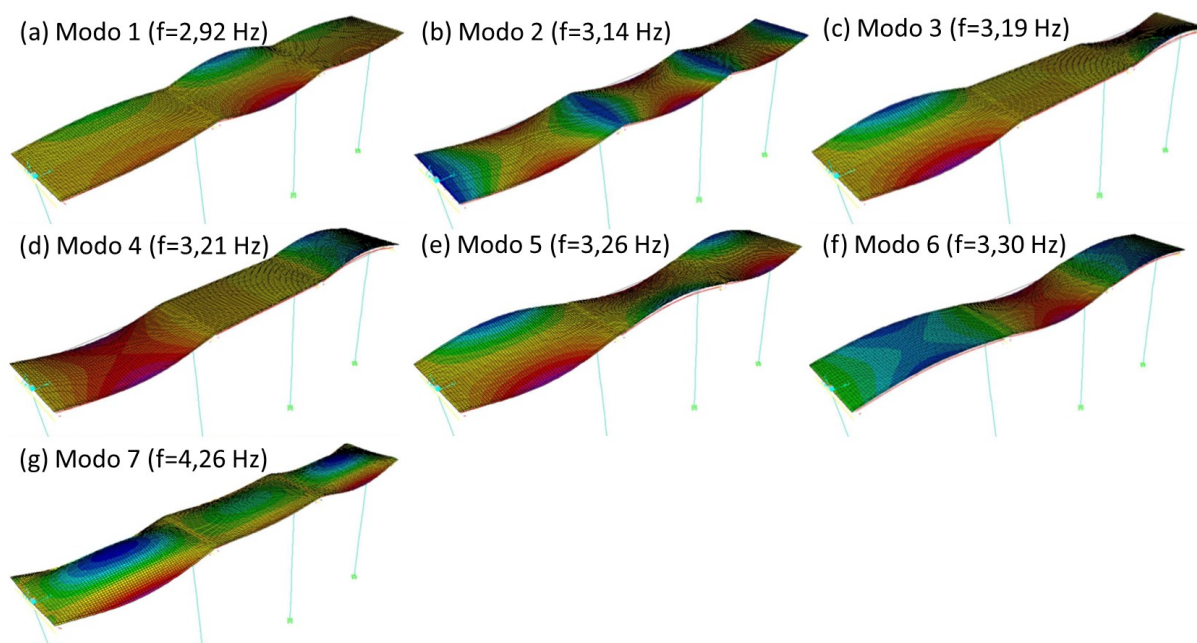
Fonte: Dersa (2017, p. 19 a 21)

Tabela 6 - Resumo dos modos de vibração do modelo.

Modo	f(Hz)	T(s)	Descrição do modo
1	2,882	0,347	Torção
2	3,155	0,317	Torção
3	3,205	0,312	Flexão Longitudinal
4	3,253	0,307	Torção
5	3,257	0,307	Flexão Longitudinal
6	3,322	0,301	Flexão Longitudinal
7	4,255	0,235	Flexão Transversal

Fonte: Dersa (2017, p. 18)

Figura 27 - Resultados gráficos do modelo com comboios.



Fonte: Dersa (2017, p. 28 a 30)

Tabela 7 - Resumo dos modos de vibração do modelo com comboios.

Modo	f(Hz)	T(s)	Descrição do modo
1	2,915	0,343	Torção
2	3,139	0,319	Flexão Longitudinal
3	3,190	0,313	Torção
4	3,209	0,312	Flexão Longitudinal
5	3,264	0,306	Torção
6	3,300	0,303	Flexão Longitudinal
7	4,255	0,235	Flexão Transversal

Fonte: Dersa (2017, p. 28)

2.2.5. Considerações

Analisando os resultados obtidos pelas referências apresentados nos itens 2.1.1 e 2.2, compilados e apresentados na Tabela 8, observou-se que, seria desaconselhável a utilização de uma taxa de aquisição de dados de 10 Hz. Isto se deve ao fato que, segundo o teorema de amostragem de Shannon, a frequência de amostragem (f_s), deve ser maior ou igual ao dobro da frequência máxima ($f_{\text{máx}}$), que se pretende analisar, conhecida como frequência de Nyquist (f_N).

$$f_s \geq \frac{f_{\text{máx}}}{2} = f_N \quad (5)$$

Considerando os valores observados na Tabela 8, considerou-se que, com a utilização de uma frequência de amostragem de 20 Hz, seria possível realizar a identificação do primeiro modo de vibração da estrutura analisada, entretanto, optou-se pela utilização de 30 Hz para o protótipo, dado a instabilidades apresentadas por ele a taxas maiores, e de 100 Hz para o smartphone, para ampliar a largura da faixa de análise.

Tabela 8 - Compilação dos resultados obtidos pelos estudos de referência.

Referência	Método	Modo	F _n (Hz)	
			Experimental	Numérica
Carvalho Neto e Veloso (2016)	OMA, CMA	1	6,17	5,63
		2	7,72	7,10
		3	11,75	12,82
Zwolski e Bien (2011)	OMA e CMA	1	4,29 ¹	-
		1	4,60 ²	-
		1	4,68 ³	-
Brownjohn et al. (2003)	CMA	1 ⁴	5,55	5,84
		2	6,26	6,1
		3	7,53	7,22
		1 ⁵	8,31	9,08
		2	9,34	9,16
		3	10,71	10,00

Referência	Método	Modo	F _n (Hz)	
			Experimental	Numérica
Castellanos-Toro et al. (2018) ⁶	OMA	1	1,00	-
		1	4,00	-
		1	3,20	-
		1	3,20	-
		1	5,50	-
		1	4,90	-
		1	2,00	-
		1	2,90	-
		1	4,00	-
		1	4,30	-
		1	3,50	-
Dersa (2017)	CMA	1	-	2,88
		2	-	3,16
		3	-	3,20
	OMA	1	-	2,92
		2	-	3,14
		3	-	3,19
F _n mínima		1	1,00	
F _n média		1	4,42	
F _n máxima		1	9,08	

¹ OMA Veículo trafegando sobre a ponte.

² OMA Vibração livre pós passagem.

³ CMA Vibração por excitador de massa excêntrica.

⁴ Análise da estrutura original.

⁵ Análise da estrutura modernizada.

⁶ Apresenta o primeiro modo de vibração de 12 OAEs respectivamente.

Para a determinação do tempo de aquisição, considerou-se a regra prática normalmente aplicada, para minimizar os erros de vazamento (“leakage errors”)¹⁵, que consiste na adoção de um tempo de aquisição (t), mil vezes superior ao período esperado (T), do modo de vibração com frequência mais baixa.

$$t \geq 1000 \times T \quad (6)$$

Sendo assim, considerando que a frequência natural média foi de 4,42 Hz, teríamos que $T = 0,23$ s e $t = 226,27$ s = 3,77 min. Portanto optou-se por manter a aquisição de 10 minutos na estrutura. Entretanto, como a menor frequência observada foi de 1 Hz, portanto $T = 1,00$ s e $t = 1000,00$ s = 16,67 min, optou-se também pela realização de uma tomada de dados de 16 min na Ponte Cidade Universitária – Ponto C, dado que representava o meio do vão central da estrutura. Tais parâmetros foram baseados informações sobre a aquisição de dados, apresentados por Pimentel, R. M. C. M. (2008).

¹⁵ Distorção do sinal, assumidamente infinito no domínio do tempo, para realização dos cálculos da FFT, quando o mesmo não possui um número inteiro de ciclos.

3. PESQUISA DE CAMPO

3.1. PROTOTIPAGEM DE SISTEMA DE BAIXO CUSTO DE MONITORAMENTO

Para a realização da prototipação de um equipamento confiável e de menor custo, quando comparado ao convencional, será necessário que cumpra certos pré-requisitos, para que se atinja um desempenho adequado. Os principais requisitos podem ser resumidos por:

- i. Autonomia do protótipo;
- ii. Possibilidade de aquisição e transmissão dos dados coletados em tempo real;
- iii. Confiabilidade dos dados;
- iv. Baixo custo.

Será avaliado se os dados obtidos através dele, possibilitarão a avaliação da saúde estrutural da OAE, assim como a frequência de obtenção, a resolução do aparelho e sua precisão. Baseado nas lições aprendidas, através da análise do método convencional, propôs-se a utilização do Arduino UNO, como plataforma para o desenvolvimento do protótipo, dado a sua grande flexibilidade, além de seu preço acessível. Partindo-se disto, optou-se pela utilização de apenas um sensor, sendo que o que foi escolhido foi o sensor MPU-6050, que realiza as funções de três tipos de sensores: acelerômetro, giroscópio e termômetro. Para realizar a comunicação, utilizou-se inicialmente o módulo Bluetooth HC-05. O protótipo realizado está apresentado na Figura 28 e esquematizado na Figura 29.

As explicações das conexões realizadas, no sensor MPU-6050 e no módulo Bluetooth HC-05, respectivamente, estão indicadas nas tabelas Tabela 9 e Tabela 10.

Figura 28 - Fotografia do protótipo elaborado.

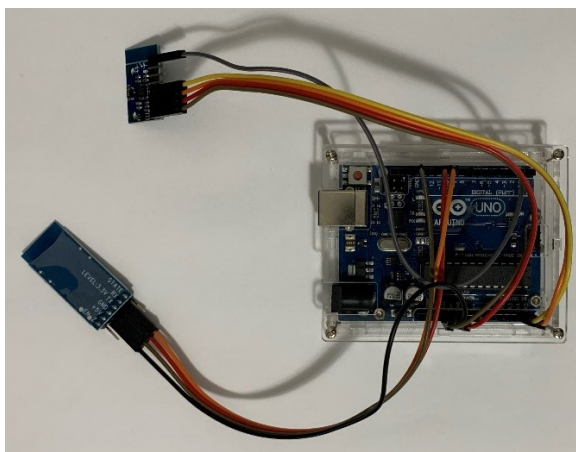
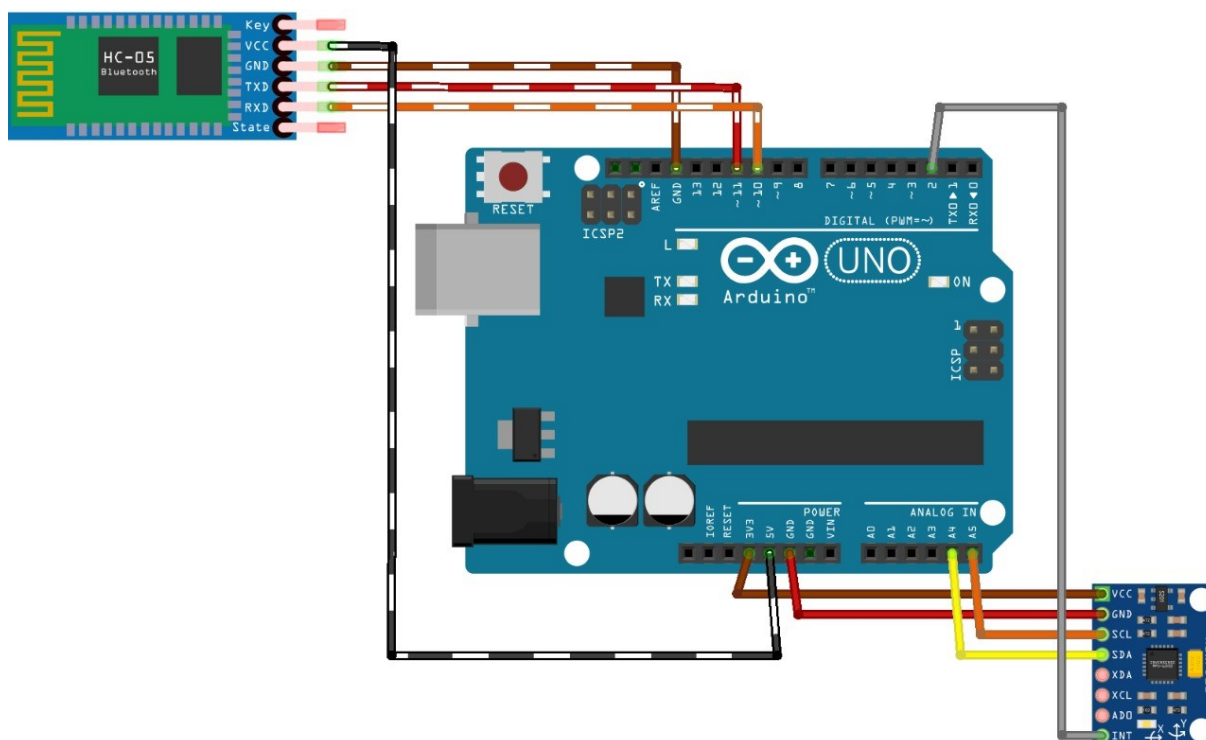


Figura 29 - Protótipo idealizado para a realização do monitoramento remoto.



Fonte: Própria autoria (2019)

Tabela 9 - Configuração das conexões do sensor MPU-6050.

MPU-6050	
Conexão	Explicação
VCC	Pino responsável pela alimentação do sensor, o qual pode ser alimentado tanto pela saída de 5V, quanto pela saída de 3,3V. Dado que o módulo Bluetooth pode, unicamente, ser alimentado pela saída de 5V, o sensor foi conectado à de 3,3V;
GND	Pino responsável por realizar o aterramento do sensor e que deve ser conectado à entrada GND do Arduino;
SCL e SDA	Pinos responsáveis pelo envio e recebimento, de forma analógica, das informações transmitidas entre o sensor e o Arduino. Devem ser conectadas as entradas A5 e A4, respectivamente;
XDA, XCL e AD0	Pinos utilizados para a mudança de endereço I2C, do sensor, de 0x68 para 0x69, a fim de evitar conflito, caso haja mais de um sensor com o endereço padrão (0x68). Não utilizados;
INT	Tem a função de interromper o sinal, deve ser colocado na entrada digital D2 do Arduino, de modo que o programa possa interpretar corretamente, se o sensor se encontra ligado ou desligado.

Fonte: Própria autoria (2019)

Tabela 10 - Configuração das conexões do módulo Bluetooth HC-05.

HC-05	
Conexão	Explicação
VCC	Responsável pela alimentação do módulo, deve ser conectado à saída de alimentação de 5V do Arduino;
GND	Pino responsável por realizar o aterramento do módulo e que deve ser conectado à entrada GND do Arduino;
TXD e RXD	Do mesmo modo que os pinos SCL e SDA do sensor, estes são os canais de comunicação do módulo com o Arduino, porém, comunicam-se de modo digital. Devem ser conectados respectivamente às entradas D11 e D10.
Key e State	Habilitam o modo de comando AT do módulo. Não foi necessária sua utilização.

Fonte: Própria autoria (2019)

O código utilizado para a obtenção dos dados adquiridos pelo sensor MPU-6050 e transmitidos pelo módulo Bluetooth HC-05 está apresentado no APÊNDICE I – CÓDIGO PARA OBTENÇÃO DOS DADOS DO ARDUINO. Tal código se baseia nos trabalhos de Simon (2015), Thonsen (2014a) e Thonsen (2014b).

Para analisar se o protótipo seria capaz de realizar a obtenção de dados desejada, realizou-se, na primeira ida à campo, a tomada de dados de 4 OAEs, sendo elas:

- i. Passarela de pedestres, localizada na Escola Politécnica (EP);
- ii. Ponte de carros, localizada no estacionamento da EP;
- iii. Ponte, localizada na Avenida Almeida Prado – USP;
- iv. Ponte Cidade Universitária.

Em cada uma das OAEs, realizou-se uma tomada de dados, com duração de dez minutos, a uma frequência de 10 Hz, exceto na Ponte Cidade Universitária, na qual foi realizado a medição em três diferentes pontos da estrutura. Para parâmetro de comparação, utilizou-se também um smartphone, também configurado para realizar a medição, a uma frequência de 10Hz.

Posteriormente, em uma segunda ida à campo para obtenção de dados, optou-se pela taxa de aquisição de dados de 30Hz, por limitações técnicas do protótipo e de 100Hz no smartphone, dado aos aprendizados obtidos na primeira. Entretanto, concentrou-

se na Ponte Cidade Universitária, dado avaliação dos dados obtidos das outras três OAEs.

Conjuntamente à obtenção dos dados da aceleração, anotou-se quais veículos estavam trafegando durante a medição, a fim de, em uma análise futura, determinar qual intensidade pertence a qual veículo. Tais dados estão presentes no APÊNDICE K – FICHAS DE MEDIÇÃO DE TRÁFEGO deste relatório.

3.2. DADOS OBTIDOS PELO SMARTPHONE

3.2.1. Levantamento de Campo ($f=10\text{Hz}$)

Para tal, foi utilizado o aplicativo Accelerometer (iOS). Uma amostra dos dados exportados pelo aplicativo está exposto na Tabela 11.

Tabela 11 - Dados exportados pelo aplicativo.

APP ACCELEROMETER (10Hz)			
index	x (G)	y (G)	z (G)
0	0.008469	0.019943	-0.98262
1	0.007217	0.020432	-0.98158
2	0.008408	0.020706	-0.9809
3	0.00824	0.020248	-0.98248
4	0.008163	0.020523	-0.98192
5	0.008179	0.020462	-0.98088
6	0.007065	0.019897	-0.98406
7	0.008331	0.020294	-0.98247
8	0.007614	0.020355	-0.981
9	0.00827	0.020569	-0.98023
10	0.007706	0.020004	-0.98166

Fonte: Própria autoria (2019)

Para a análise realizada, foi necessário anotar o horário inicial da medida com o aplicativo e a conversão dos valores de G para m/s^2 , sendo que, dado à configuração do aparelho:

$$1G \rightarrow 10 \text{ m/s}^2 \quad (2)$$

Outros cálculos feitos foram: a obtenção do módulo da aceleração e o índice de amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, já que este indica a variação da aceleração vertical do ponto.

$$|a| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (3)$$

No caso a seguir, a coleta de dados teve início às 11 horas e 19 minutos da manhã. Realizando as devidas conversões, obteve-se:

Tabela 12 - Dados obtidos pelo aplicativo, após tratamento.

tempo (mm:ss.ms)	x (m/s²)	y (m/s²)	z (m/s²)	 a (m/s²)	Z_n - Z_{n-1} (m/s²)
19:00.0	0.08469	0.19943	-9.8262	9.828588	0
19:00.1	0.07217	0.20432	-9.81583	9.818222	0.01037
19:00.2	0.08408	0.20706	-9.80896	9.811505	0.00687
19:00.3	0.0824	0.20248	-9.82483	9.827262	-0.01587
19:00.4	0.08163	0.20523	-9.81918	9.821664	0.00565
19:00.5	0.08179	0.20462	-9.80881	9.811285	0.01037
19:00.6	0.07065	0.19897	-9.84055	9.842815	-0.03174
19:00.7	0.08331	0.20294	-9.82468	9.827129	0.01587
19:00.8	0.07614	0.20355	-9.81003	9.812437	0.01465
19:00.9	0.0827	0.20569	-9.80225	9.804757	0.00778
19:01.0	0.07706	0.20004	-9.81659	9.81893	-0.01434

Fonte: Própria autoria (2019)

3.2.2. Levantamento de Campo (f=100Hz)

Dado a limitações presente no aplicativo Accelerometer (iOS), o qual apresentava instabilidades em obtenções a taxas superiores a 20 Hz, buscou-se um aplicativo capaz de atingir uma frequência de aquisição maior, para tal, utilizou-se o software iJishin (iOS), é um sismômetro e analisador de vibrações e foi desenvolvido em um esforço colaborativo entre o Instituto Nacional de Pesquisa em Ciências da Terra e Resiliência a Desastres¹⁶ e a empresa Hakusan Corporation, ambos Japoneses.

Os dados de saída do aplicativo, são na unidade Galileo (gal), cuja conversão se dá da seguinte forma:

$$1gal \rightarrow 0,01 m/s^2 \quad (4)$$

Optou-se então na utilização do cm/s^2 , dado que 1 Galileo corresponde a 1 cm/s^2 .

Tabela 13 - Dados obtidos pelo aplicativo, após tratamento.

tempo (mm:ss.ms)	x (cm/s^2)	y (cm/s^2)	z (cm/s^2)	 a (cm/s^2)	Z_n - Z_{n-1} (cm/s^2)
26:21,0	0,83	2,1	-2,04	3,043107	0
26:21,0	0,08	2,21	-0,39	2,2455734	1,65
26:21,0	0,28	2,23	0,63	2,334138	1,02
26:21,0	0,42	1,28	1	1,6777366	0,37
26:21,0	-0,24	0,43	-0,43	0,6537584	-1,43
26:21,0	-0,82	-0,07	0,35	0,8943154	0,78
26:21,1	-0,42	-0,67	1,62	1,8026924	1,27
26:21,1	-0,1	-0,99	1,66	1,9353811	0,04
26:21,1	0,31	-1,89	0,98	2,1514181	-0,68
26:21,1	0,88	-2,8	0,28	2,9483555	-0,7
26:21,0	0,83	2,1	-2,04	3,043107	0

Fonte: Própria autoria (2019)

¹⁶ NIED: National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience.

3.3. DADOS OBTIDOS PELO PROTÓTIPO

Como abordado no item 3.1, no primeiro levantamento de campo, utilizou-se o módulo Bluetooth e configurou-se uma taxa de aquisição de 10 Hz. No segundo levantamento, utilizou-se uma ligação a cabo com o protótipo e configurou-se uma taxa de aquisição de 30 Hz. Amostra dos dados obtidos, sem tratamento, pelo Arduino:

Tabela 14 - Dados exportados pelo protótipo.

ARDUINO MPU6050 (10Hz)			
tempo (mm:ss.ms)	x (bits)	y (bits)	z (bits)
18:59.9	764	-368	16548
19:00.1	800	-440	16404
19:00.2	920	-448	16436
19:00.3	768	-368	16440
19:00.4	732	-476	16440
19:00.5	820	-316	16604
19:00.7	732	-352	16332
19:00.8	816	-384	16492
19:00.9	808	-364	16612
19:01.0	808	-332	16396
19:01.2	732	-376	16448

Fonte: Própria autoria (2019)

Para a análise realizada, não foi necessário anotar o horário inicial da medida, pois ele exporta os dados com o horário atual. A conversão dos valores de bits para m/s^2 é dada por:

$$a[m/s^2] = \frac{a [bits] \times 2 \times 9.81}{32768} \quad (5)$$

Após a realização das devidas conversões e análises, tais como módulo da aceleração e do índice $Z_{an} - Z_{an-1}$, obtemos a Tabela 15, apresentada a seguir.

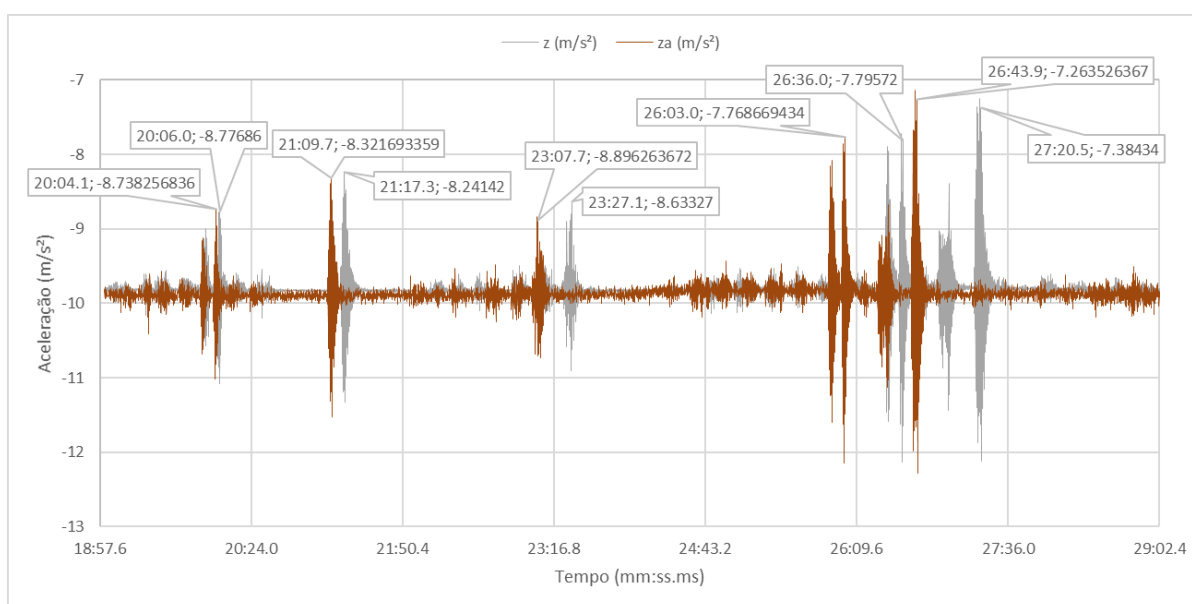
Tabela 15 - Dados obtidos pelo protótipo, após tratamento.

ARDUINO					
tempo (mm:ss.ms)	x_a (m/s ²)	y_a (m/s ²)	z_a (m/s ²)	$ a_a $ (m/s ²)	$Z_{an} - Z_{an-1}$ (m/s ²)
19:00.1	0.478809	0.263345	-9.81797	9.833166	0
19:00.2	0.55063	0.268133	-9.83712	9.856169	-0.01915234
19:00.3	0.459656	0.220252	-9.83952	9.852709	-0.00239404
19:00.4	0.43811	0.284891	-9.83952	9.853385	0
19:00.5	0.490779	0.189129	-9.93767	9.951581	-0.09815576
19:00.7	0.43811	0.210676	-9.77488	9.786958	0.162794922
19:00.8	0.488385	0.229828	-9.87064	9.885386	-0.09576172
19:00.9	0.483597	0.217858	-9.94246	9.956598	-0.07182129
19:01.0	0.483597	0.198706	-9.81318	9.8271	0.12927832
19:01.2	0.43811	0.22504	-9.8443	9.856618	-0.03112256
19:01.3	0.488385	0.234616	-9.90894	9.923746	-0.06463916

Fonte: Própria autoria (2019)

3.3.1. Sincronização do Sinal

Gráfico 10 - Comparação entre os dados de Z, obtidos pelo celular e pelo protótipo



Fonte: Própria autoria (2019)

Nota-se a partir do gráfico apresentado anteriormente, que os resultados obtidos pelo Arduino, vão se defasando dos dados obtidos pelo celular, no decorrer do tempo. Entretanto, a magnitude dos dados obtidos se assemelha. Sendo assim, utilizando-se dos pontos de pico obtidos, pode-se realizar a sincronização dos dados, aplicando um fator multiplicador ao Δt do protótipo. Para a sincronização dos dados, o sinal foi dividido em três trechos.

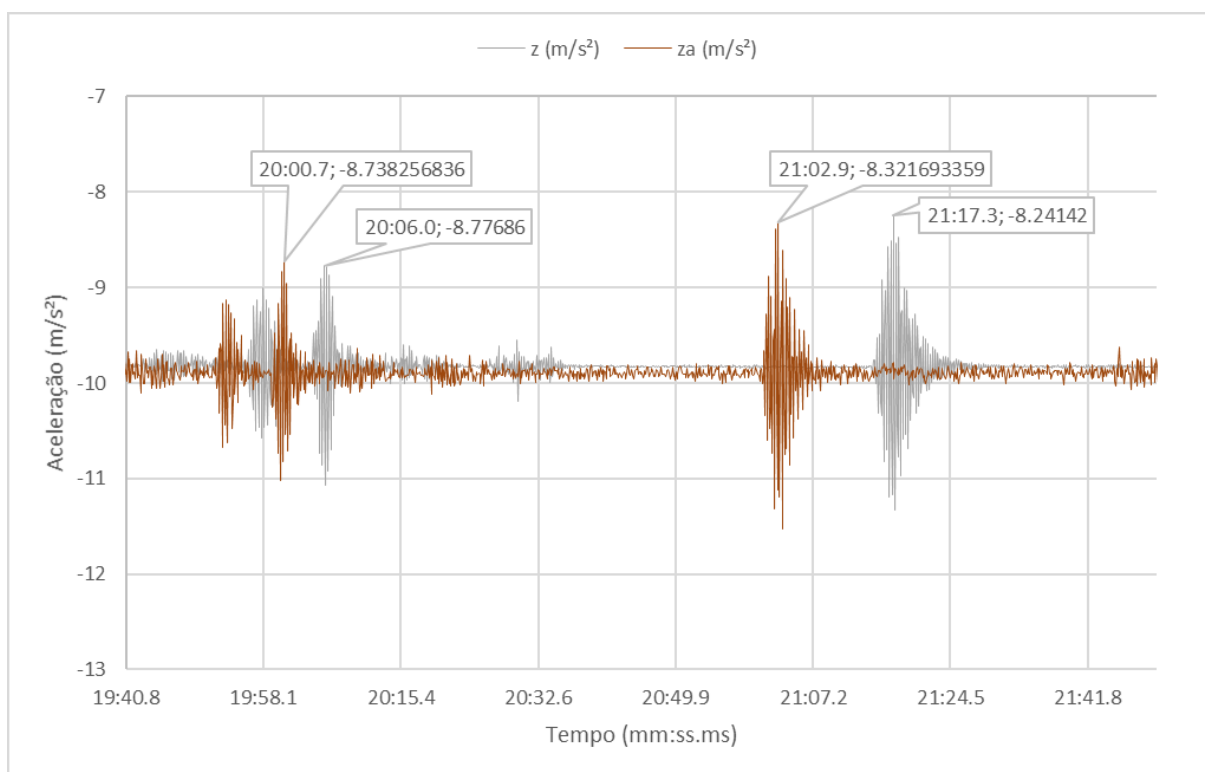
Tabela 16 - Fatores de sincronização aplicados.

Trecho	t_i (mm:ss.ms)	t_f (mm:ss.ms)	f_{dt}
1	19:40.8	21:41.8	1,090
2	21:41.8	26:09.6	1,150
3	26:09.6	28:19.2	1,135

Fonte: Própria autoria (2019)

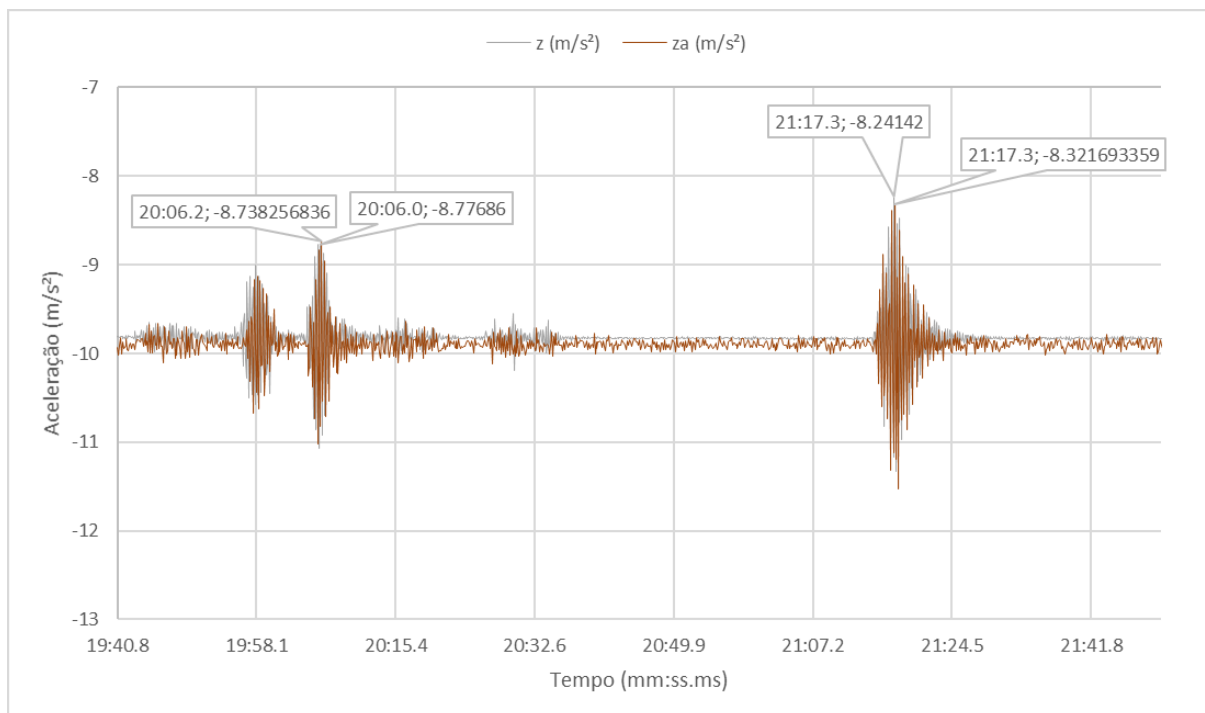
A execução da sincronização dos sinais, está ilustrada nos gráficos Gráfico 11, Gráfico 12, Gráfico 13 e Gráfico 14. Já os dados processados e sincronizados do módulo da aceleração e da diferença de Z, estão apresentados no Gráfico 16 e Gráfico 17.

Gráfico 11 - Detalhe da defasagem de tempo entre os picos, do trecho 1.



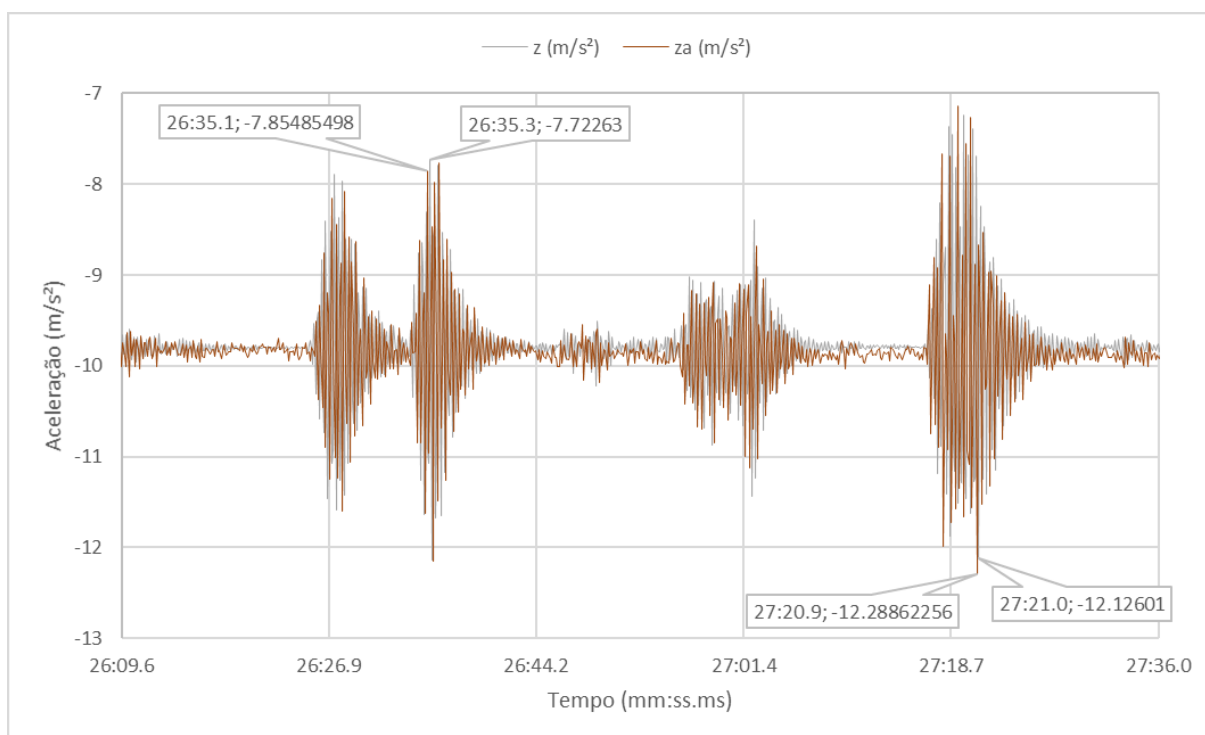
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 12 - Detalhe pós sincronização do trecho 1.



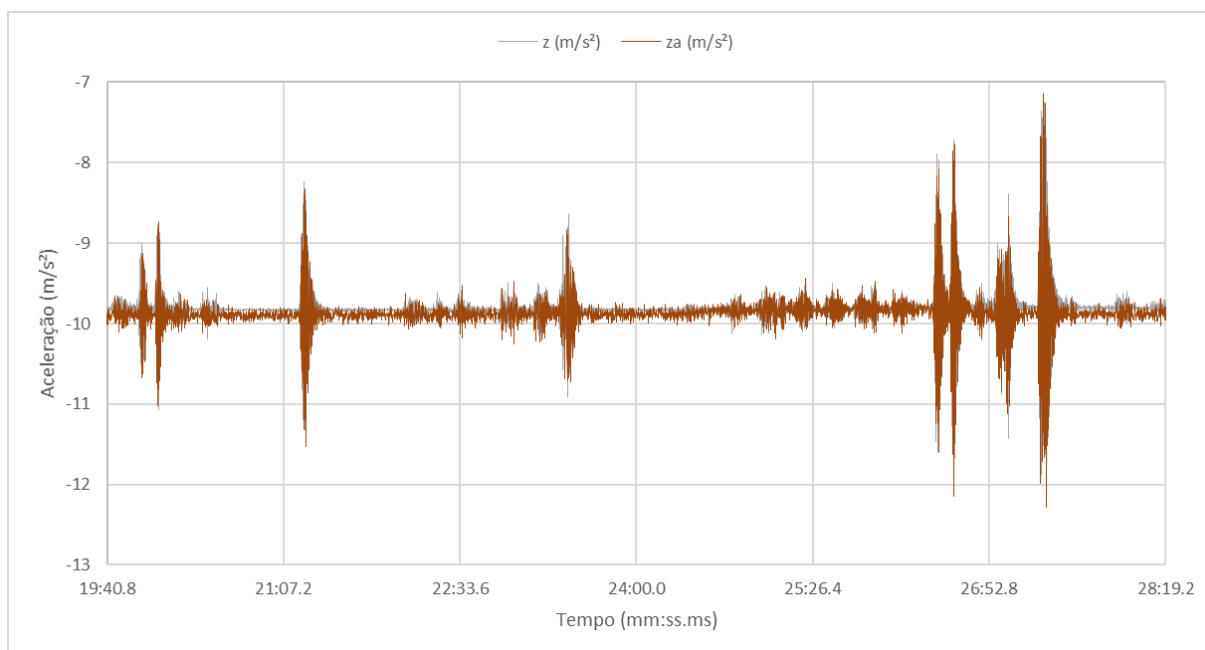
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 13 - Detalhe pós sincronização do trecho 3.



Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 14 - Resultado final, de Z, após a sincronização dos dados.



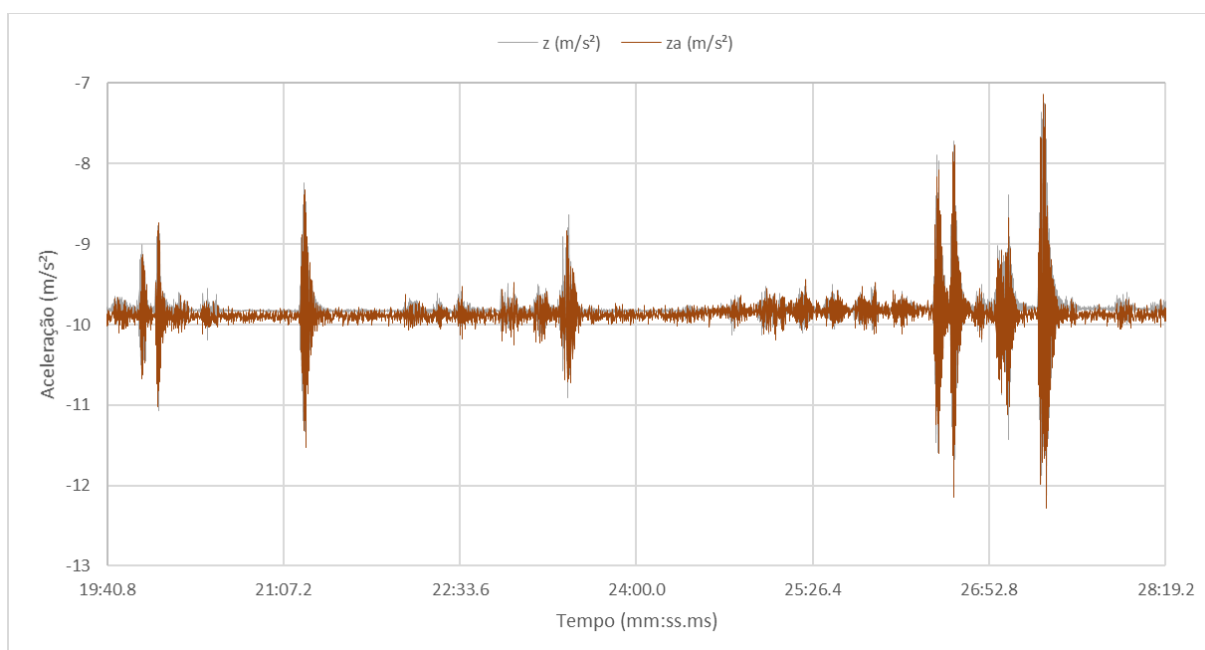
Fonte: Própria autoria (2019)

4. APRESENTAÇÃO DOS DADOS

Neste capítulo, estão apresentados apenas os gráficos mais relevantes para o estudo, os demais gráficos elaborados, estão presentes nos apêndices.

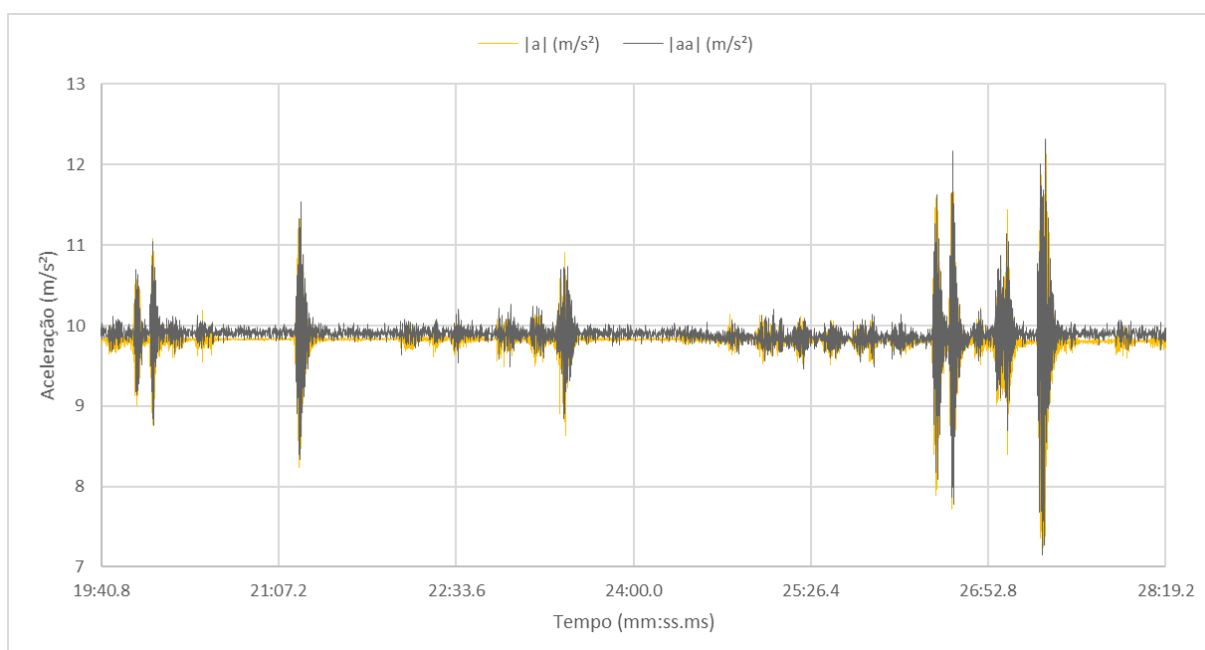
4.1. PASSARELA DE PEDESTRE DA EP

Gráfico 15 - Comparação entre Z, obtido pelo celular e pelo Arduino.



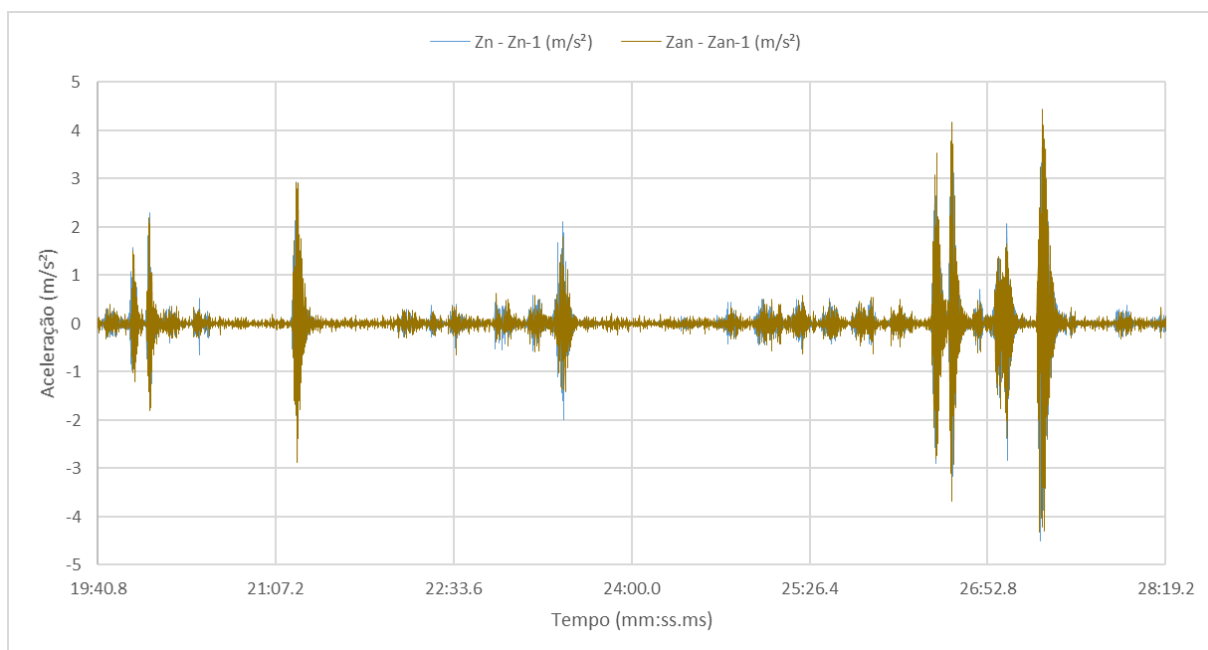
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 16 - Comparação entre o módulo da aceleração obtido pelo celular e pelo Arduino.



Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 17 - Comparação entre $Z_n - Z_{n-1}$, obtido pelo celular e pelo Arduino.

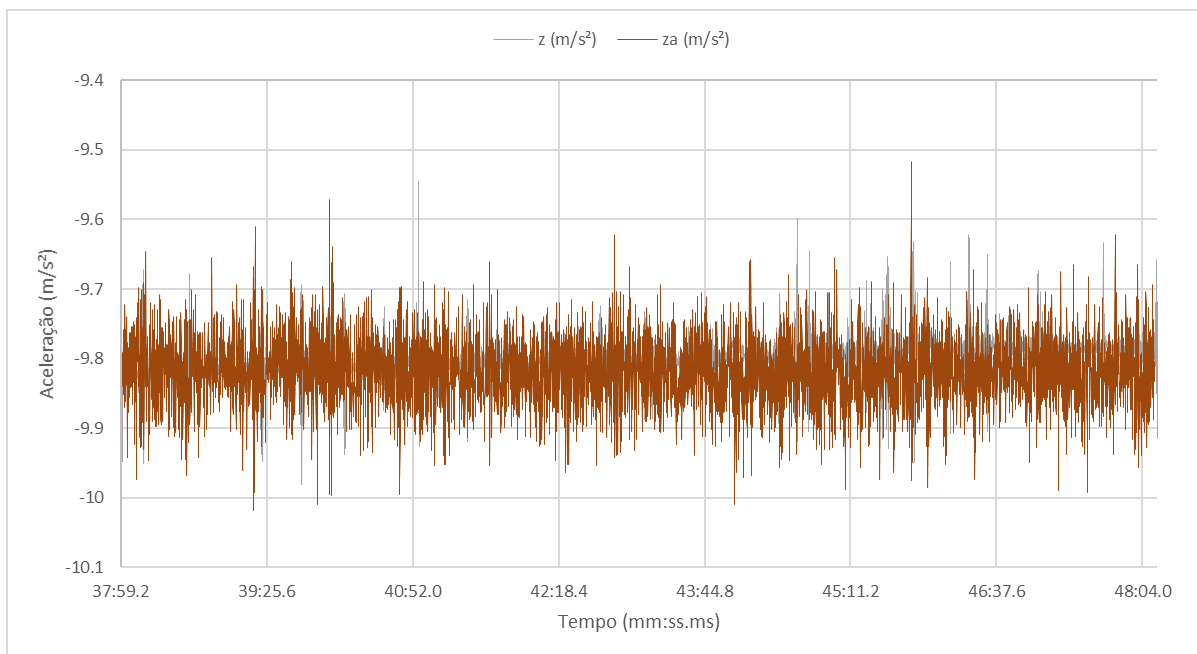


Fonte: Própria autoria (2019)

4.2. PONTE DO ESTACIONAMENTO DA EP

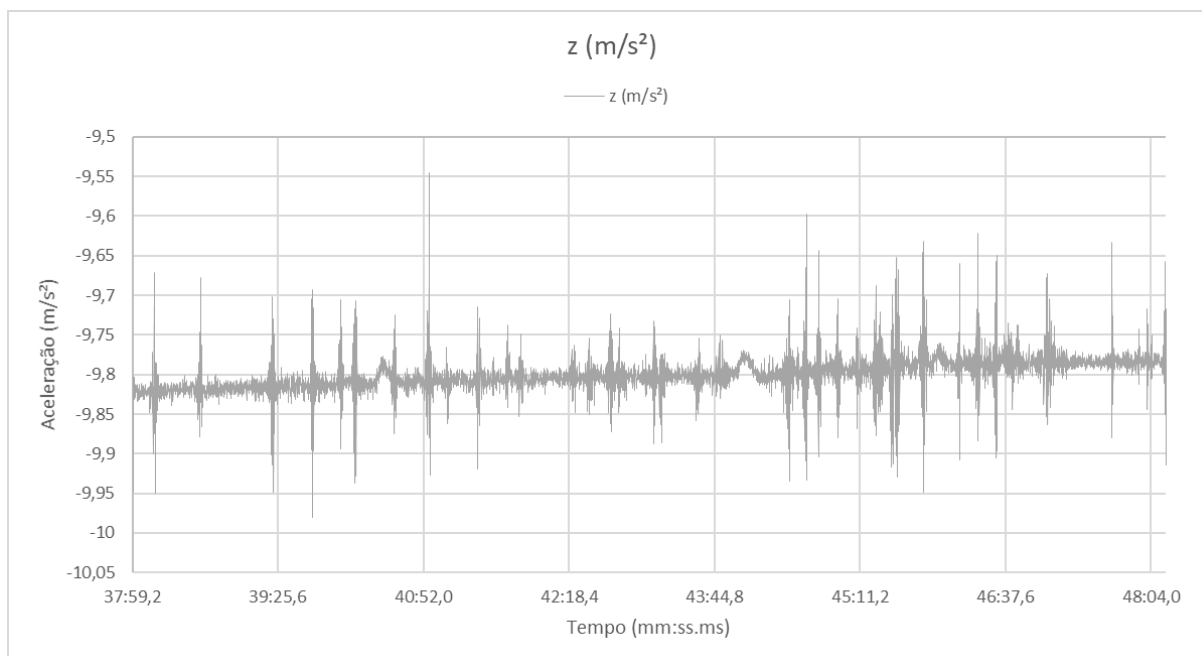
A análise dos dados da ponte do estacionamento da Escola Politécnica, mostrou que, devido a seu módulo de rigidez e reduzido vão, o ruído apresentado pelo Arduino, impossibilita a coleta de dados aproveitáveis. No Gráfico 18, compara-se os dados obtidos por ambos, já no Gráfico 19, Gráfico 20 e Gráfico 21, apenas do celular.

Gráfico 18 - Comparação entre Z, obtido pelo celular e pelo Arduino.

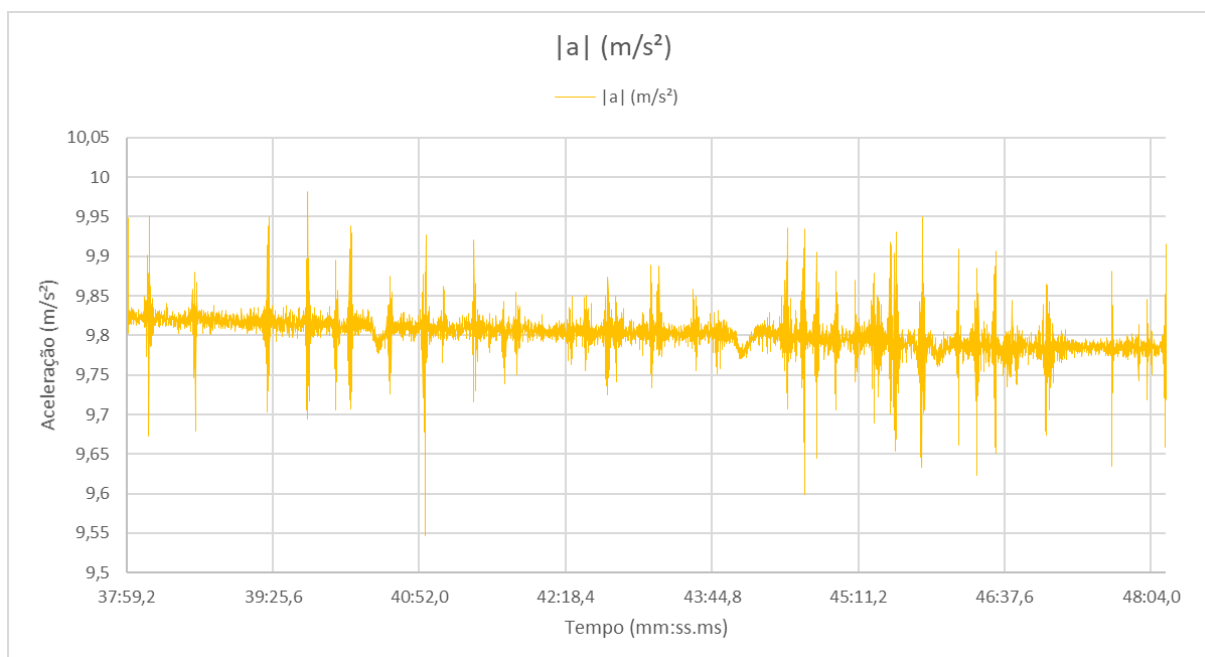


Fonte: Própria autoria (2019)

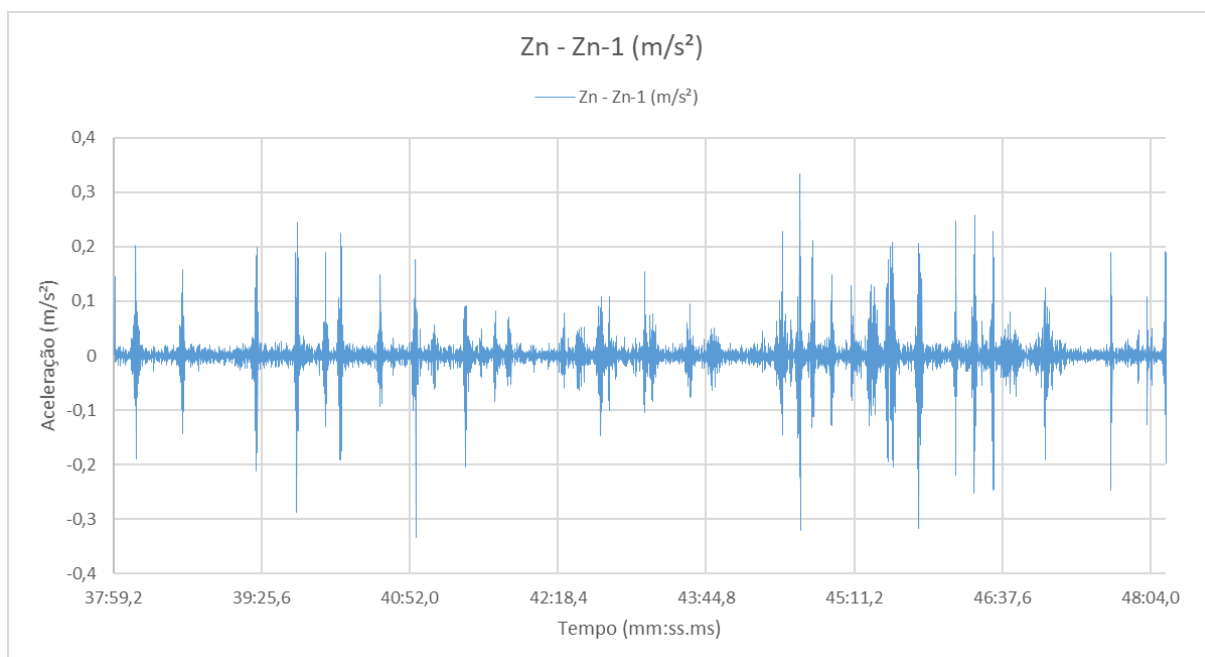
Gráfico 19 – Componente de aceleração vertical (Z), obtido pelo celular.



Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 20 – Módulo de aceleração ($|a|$), obtido pelo celular.

Fonte: Própria autoria (2019)

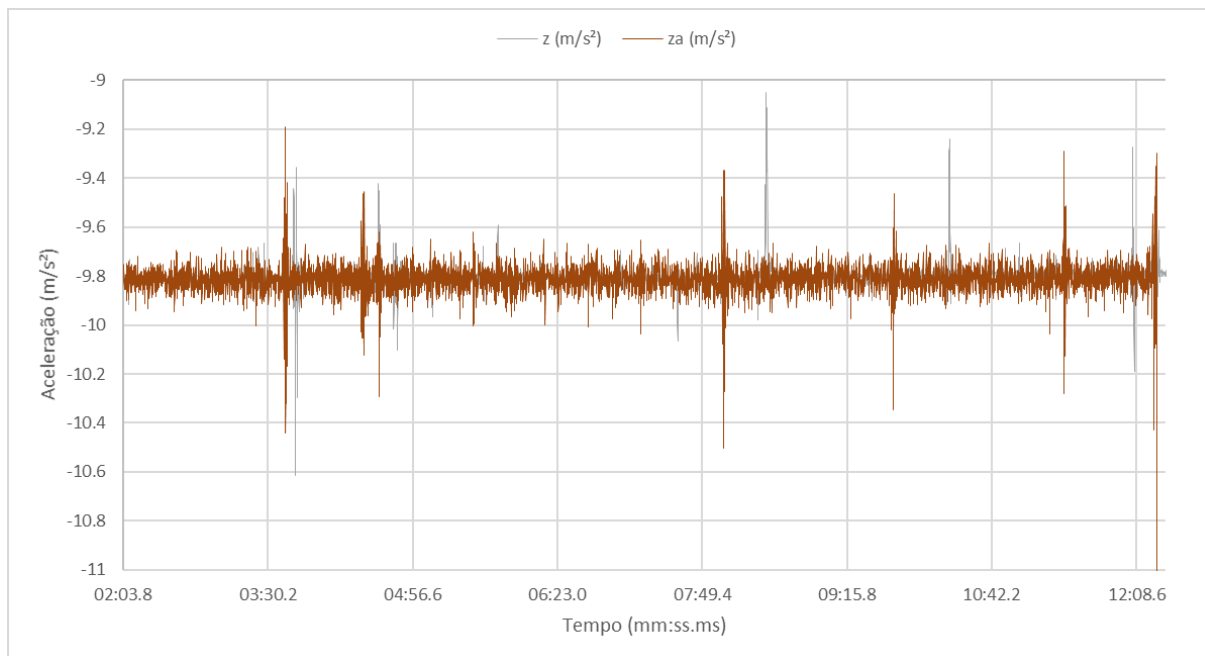
Gráfico 21 – Parâmetro $Z_n - Z_{n-1}$, obtido pelo celular.

Fonte: Própria autoria (2019)

4.3. PONTE DA AVENIDA ALMEIDA PRADO

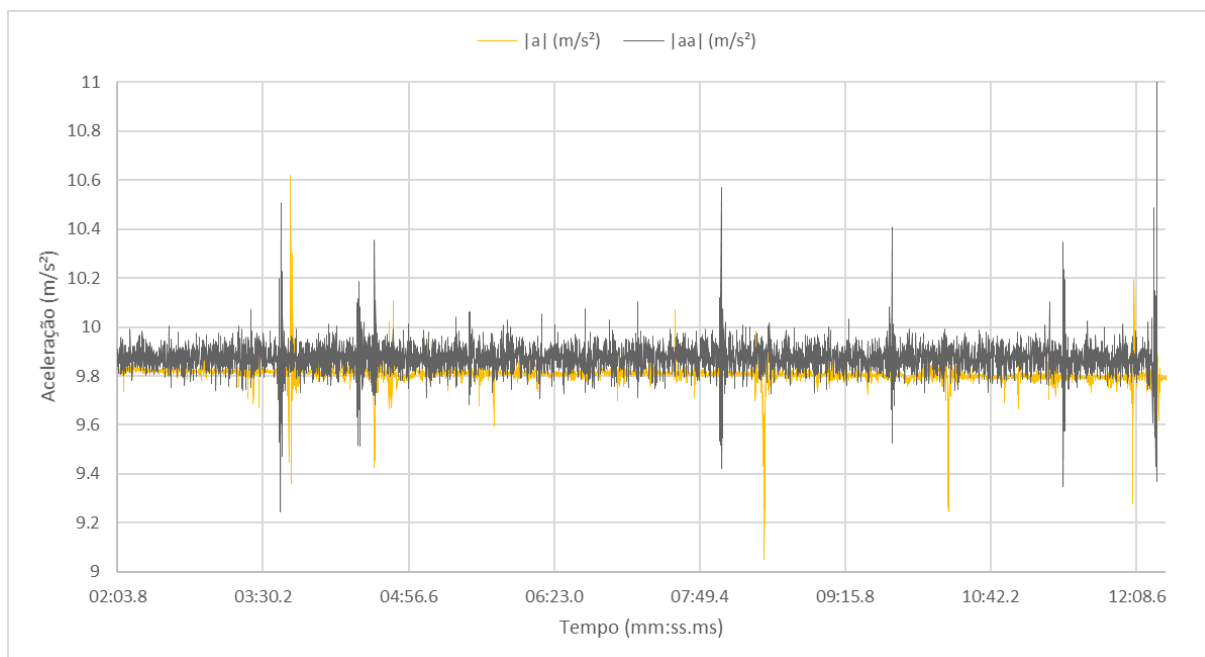
Para a ponte da Avenida Almeida Prado, embora o ruído esteja presente, é possível identificar claramente os picos de aceleração.

Gráfico 22 - Comparação entre Z, obtido pelo celular e pelo Arduino.



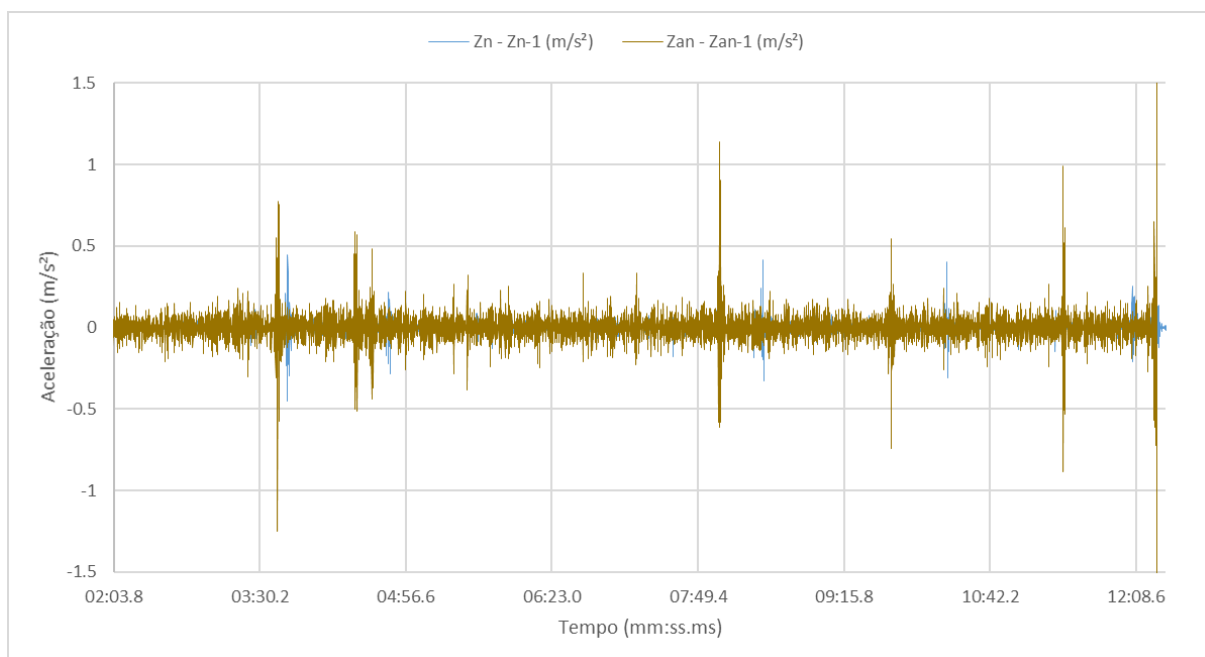
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 23 - Comparação entre |a|, obtido pelo celular e pelo Arduino.



Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 24 - Comparação entre Zn-Zn-1, obtido pelo celular e pelo Arduino.



Fonte: Própria autoria (2019)

4.4. PONTE CIDADE UNIVERSITÁRIA – PONTO A

Figura 30 - Localização do Ponto A da Ponte Cidade Universitária.

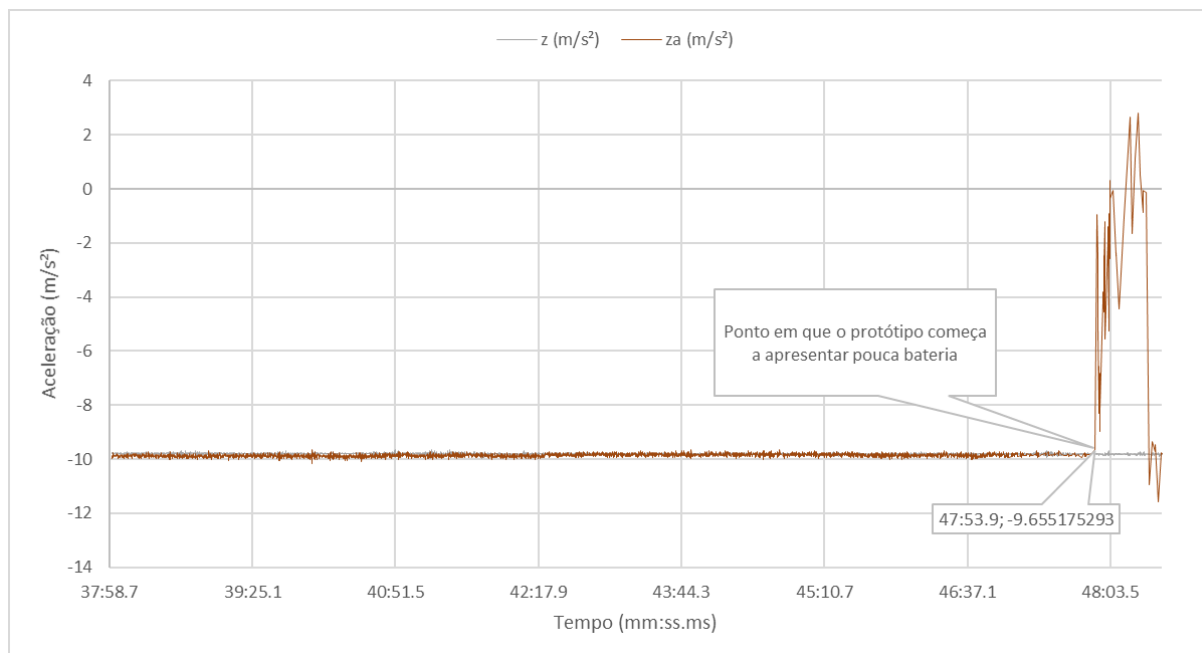


Fonte: Google Maps (2019)

A localização do Ponto A foi escolhida por se tratar do meio do vão, de um dos trechos do tabuleiro e pela facilidade em instalar um equipamento no local, devido a área localizada sob a ponte. Sendo assim, esta localização seria propícia para uma próxima etapa de execução deste trabalho.

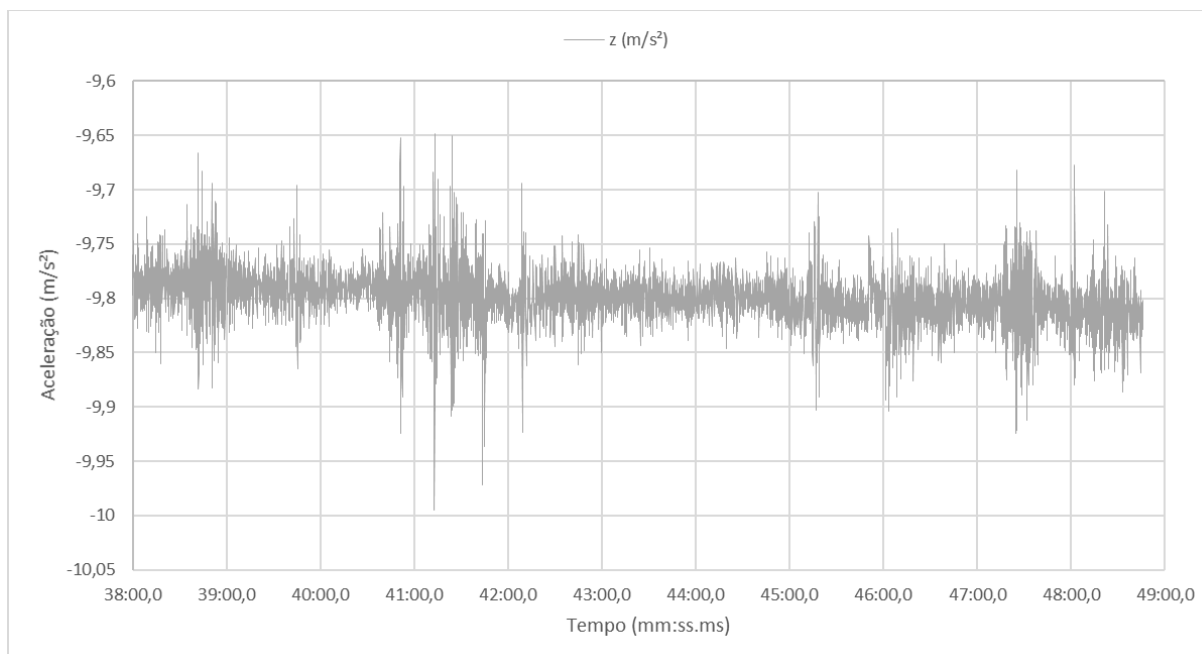
Entretanto, a bateria do protótipo começa a falhar, levando a obtenção de dados aleatórios, como se pode notar no Gráfico 25. Sendo assim, analisaremos, o Ponto A, utilizando-se apenas dos dados emitidos pelo celular.

Gráfico 25 - Ponto em que a bateria começa a falhar.

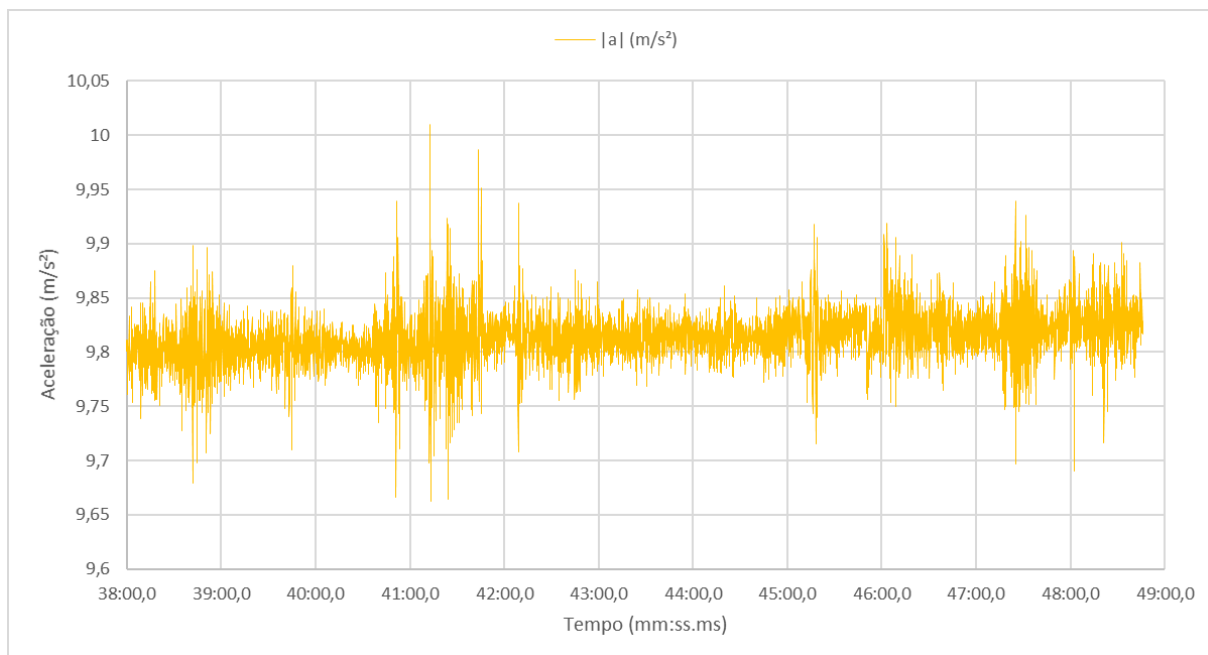


Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 26 - Aceleração Z, obtida pelo celular.

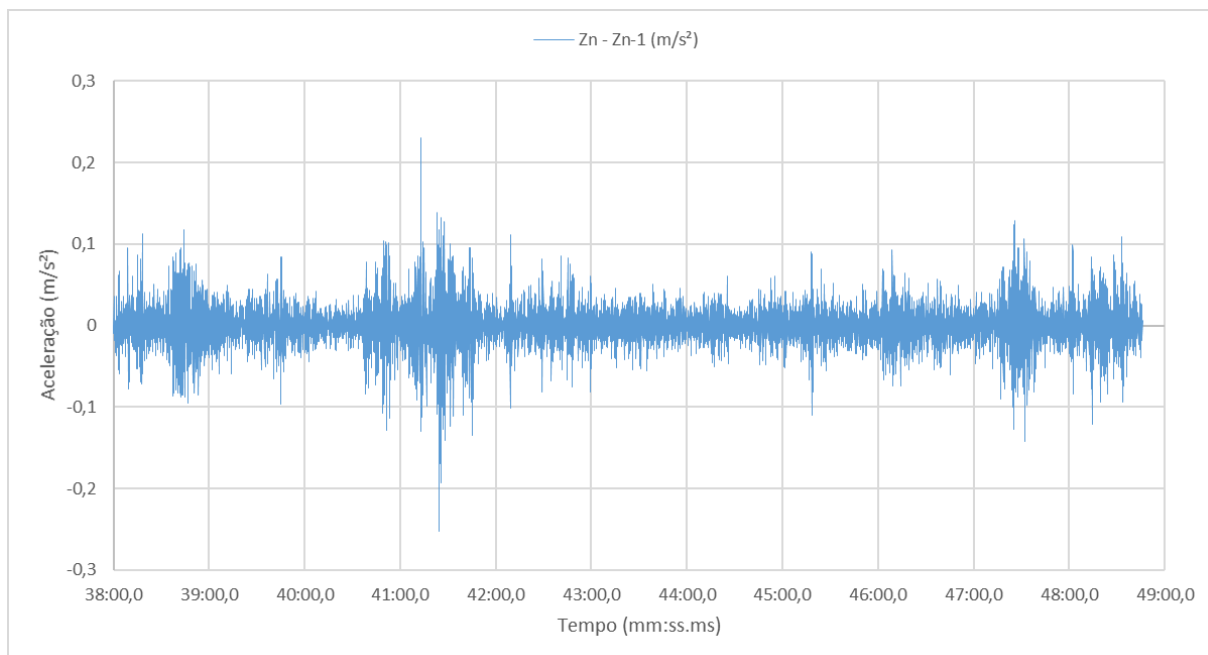


Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 27 - Módulo da aceleração $|a|$, obtida pelo celular.

Fonte: Própria autoria (2019)

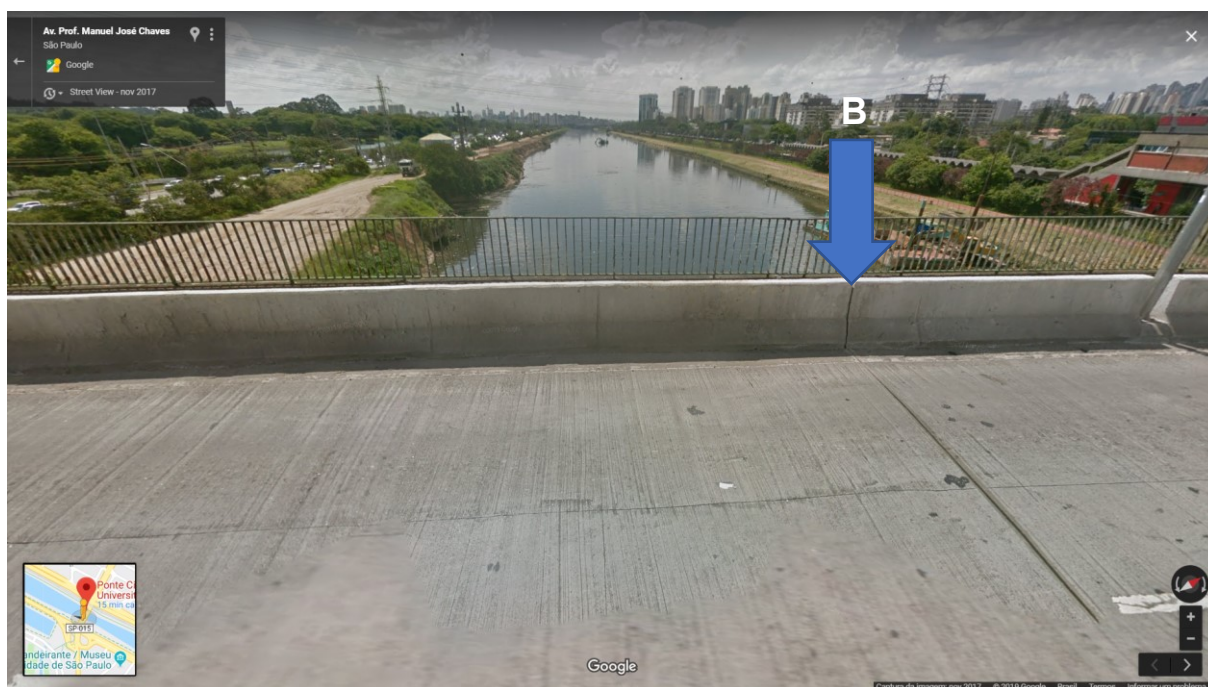
Gráfico 28 - Amplitude Zn-Zn-1, obtida pelo celular.



Fonte: Própria autoria (2019)

4.5. PONTE CIDADE UNIVERSITÁRIA – PONTO B

Figura 31 - Localização do Ponto B da Ponte Cidade Universitária.

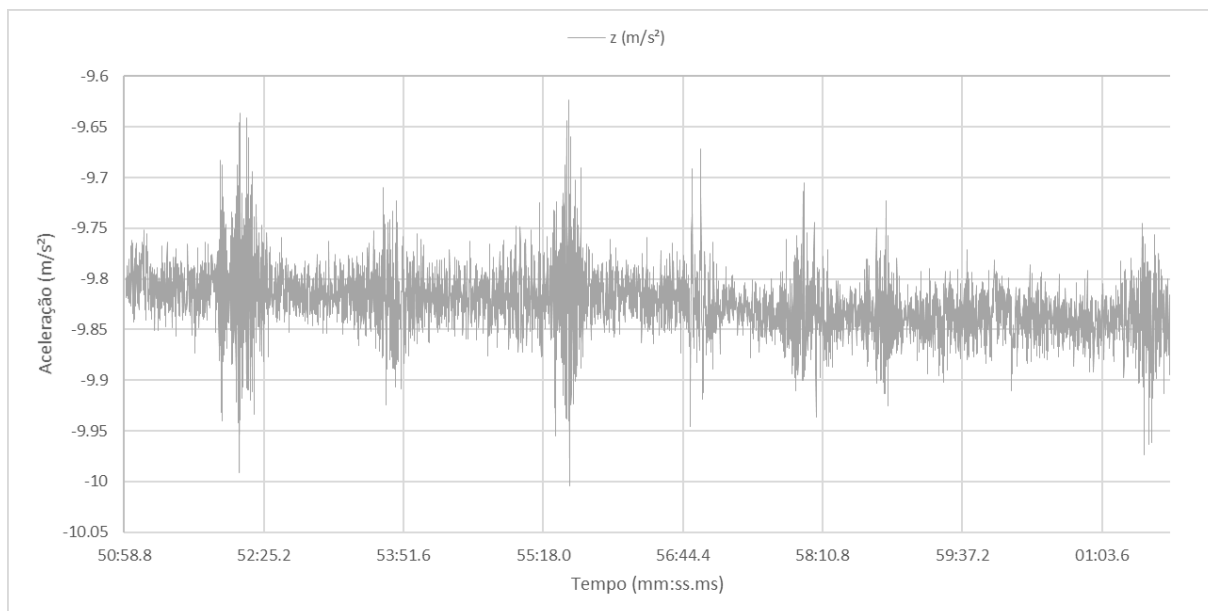


Fonte: Google Maps (2019)

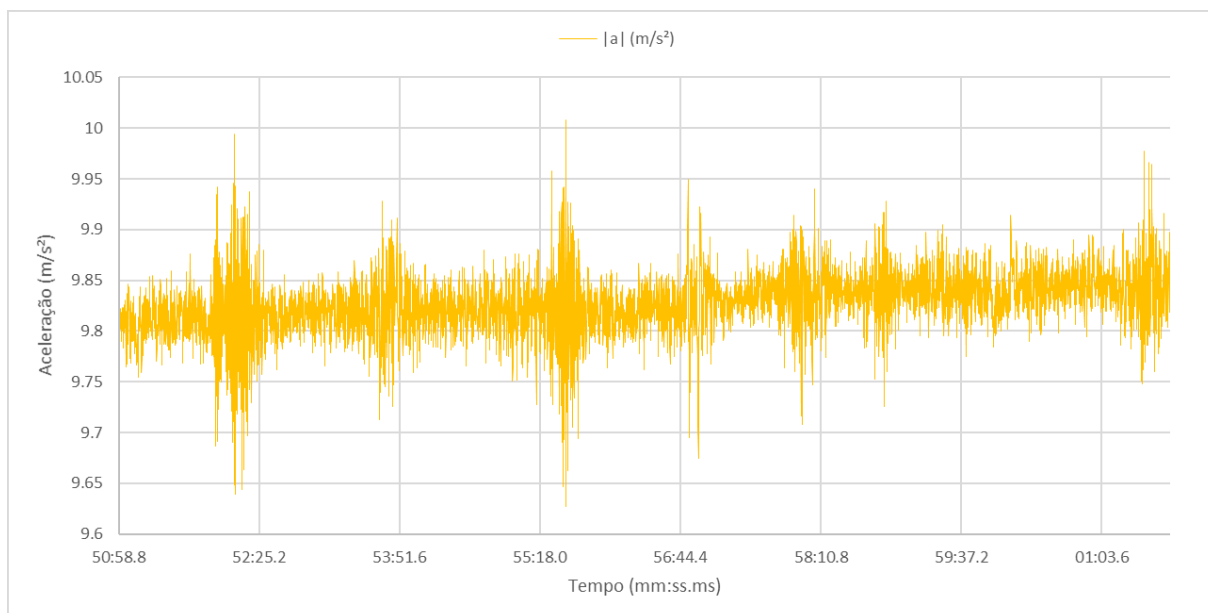
O Ponto B foi escolhido por estar localizado sobre uma junta de dilatação da superestrutura da ponte. Permitindo assim, a obtenção de dados, sobre uma parte da estrutura, que tem características diferentes das demais.

Como mencionado no item anterior, este ponto só será analisado pelos dados obtidos pelo celular.

Gráfico 29 - Aceleração Z, obtida pelo celular.

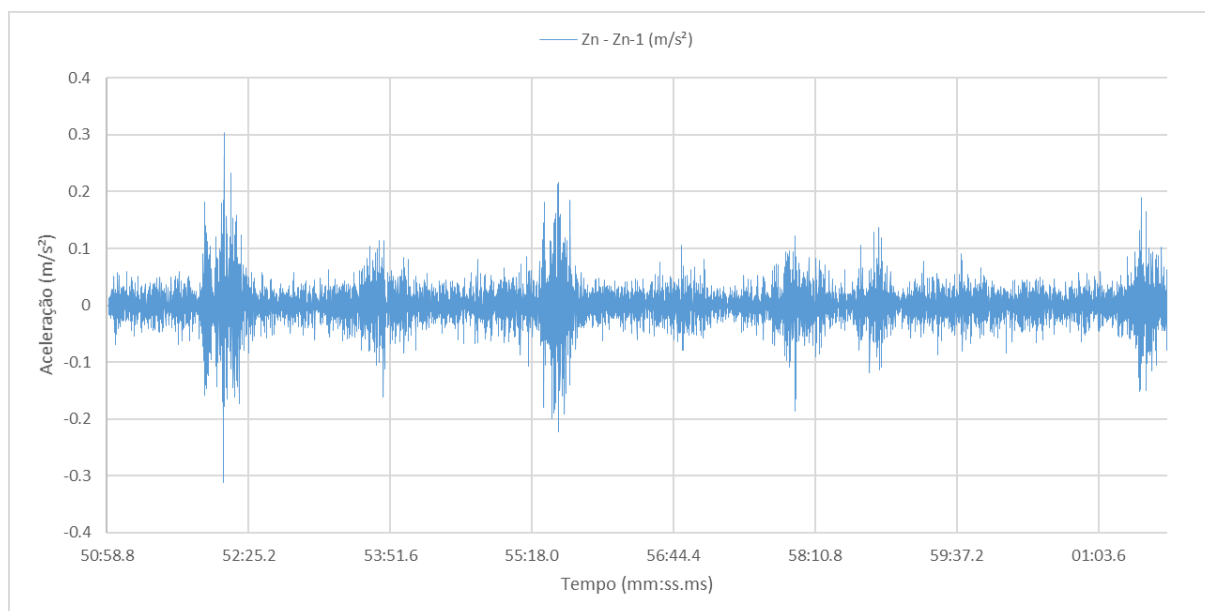


Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 30 - Módulo da aceleração $|a|$, obtida pelo celular.

Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 31 - Amplitude Zn-Zn-1, obtida pelo celular.



Fonte: Própria autoria (2019)

4.6. PONTE CIDADE UNIVERSITÁRIA – PONTO C

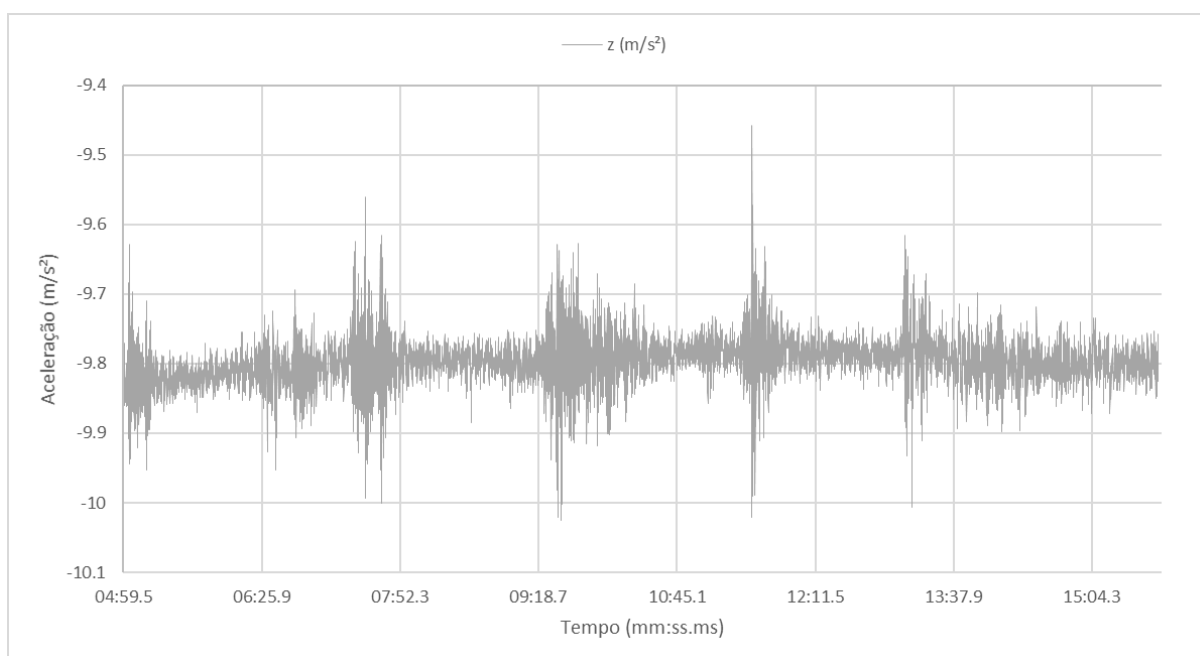
Figura 32 - Localização do Ponto C da Ponte Cidade Universitária.



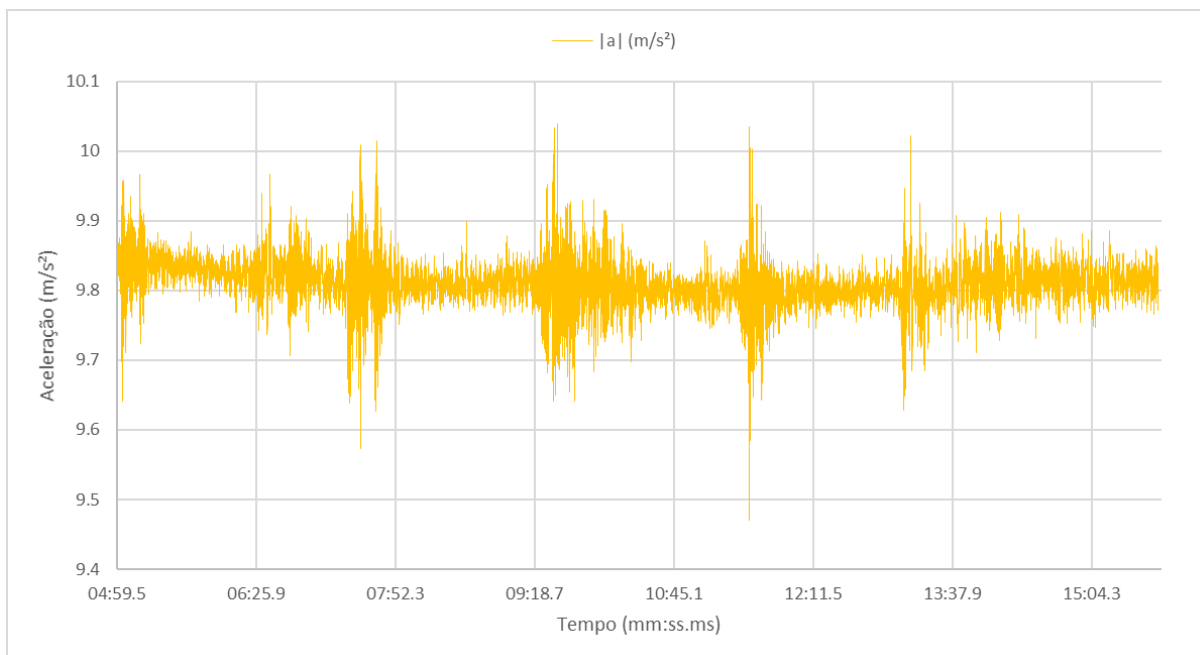
Fonte: Google Maps (2019)

O Ponto C foi escolhido por se tratar do meio do vão central da Ponte Cidade Universitária. Tratando-se desta posição, espera-se que apresente as maiores amplitudes de aceleração.

Gráfico 32 - Aceleração Z, obtida pelo celular.

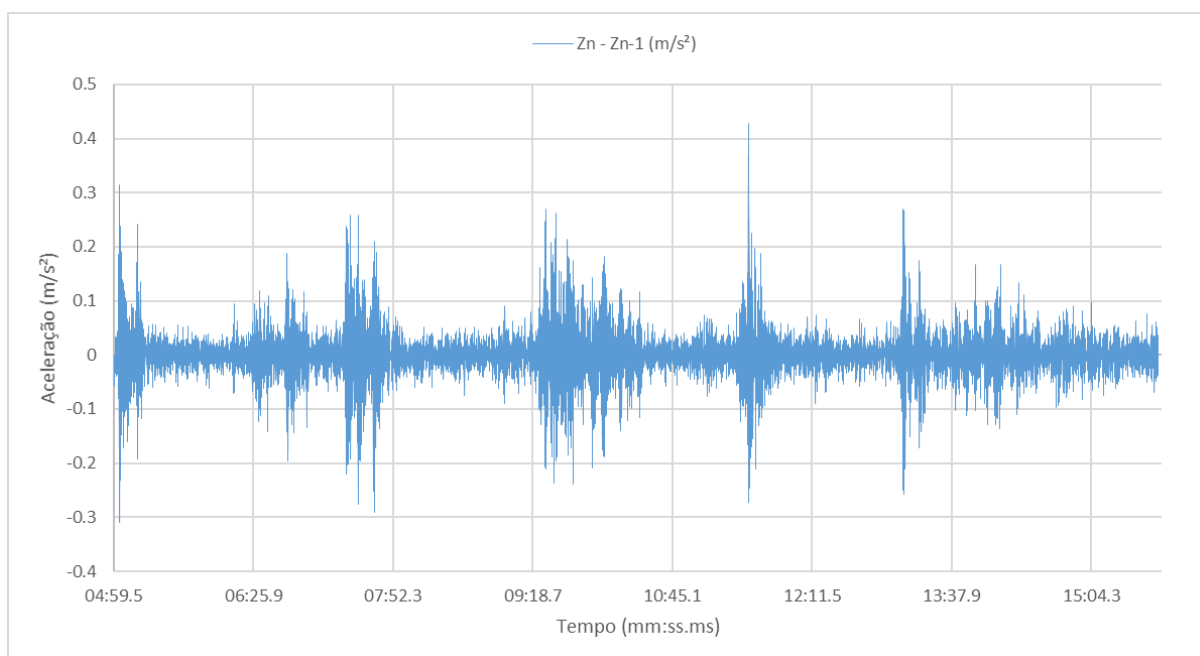


Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 33 - Módulo da aceleração $|a|$, obtida pelo celular.

Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 34 - Amplitude Zn-Zn-1, obtida pelo celular.



Fonte: Própria autoria (2019)

4.7. INTERAÇÃO COM O TRÁFEGO

Neste item, será apresentado os gráficos do Ponto C da Ponte Cidade Universitária, conjuntamente aos gráficos de medição de tráfego, que foi feita a partir de uma ficha de medição, presente no APÊNDICE K – FICHAS DE MEDIÇÃO DE TRÁFEGO, pois apresenta picos de medição bem definidos.

No trecho da ficha de medição de tráfego, apresentado na Tabela 17, nota-se que a discretização da tomada de dados ocorreu em intervalos de 15 segundos, possibilitando a correlação entre os picos de aceleração medidos e o veículo característico.

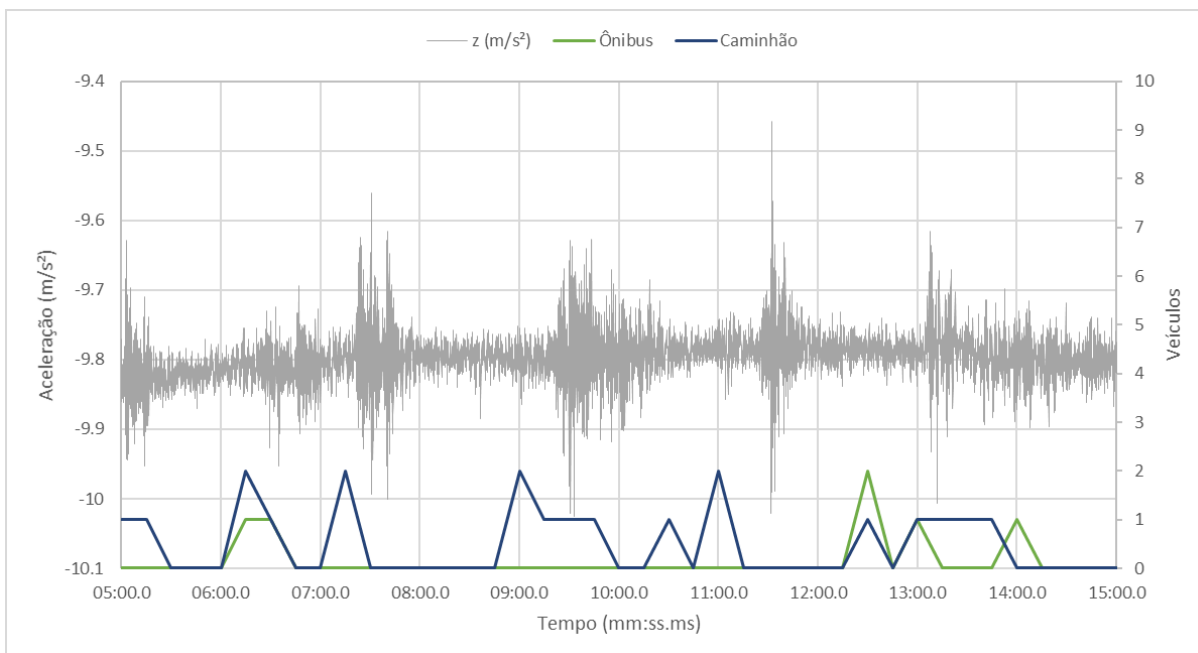
Os demais gráficos, correlacionando a aceleração medida com o tráfego no instante da medição, estão apresentados nos APÊNDICES A, B, C e D.

Tabela 17 - Trecho da ficha de medição de tráfego do Ponto C da Ponte Cidade Universitária.

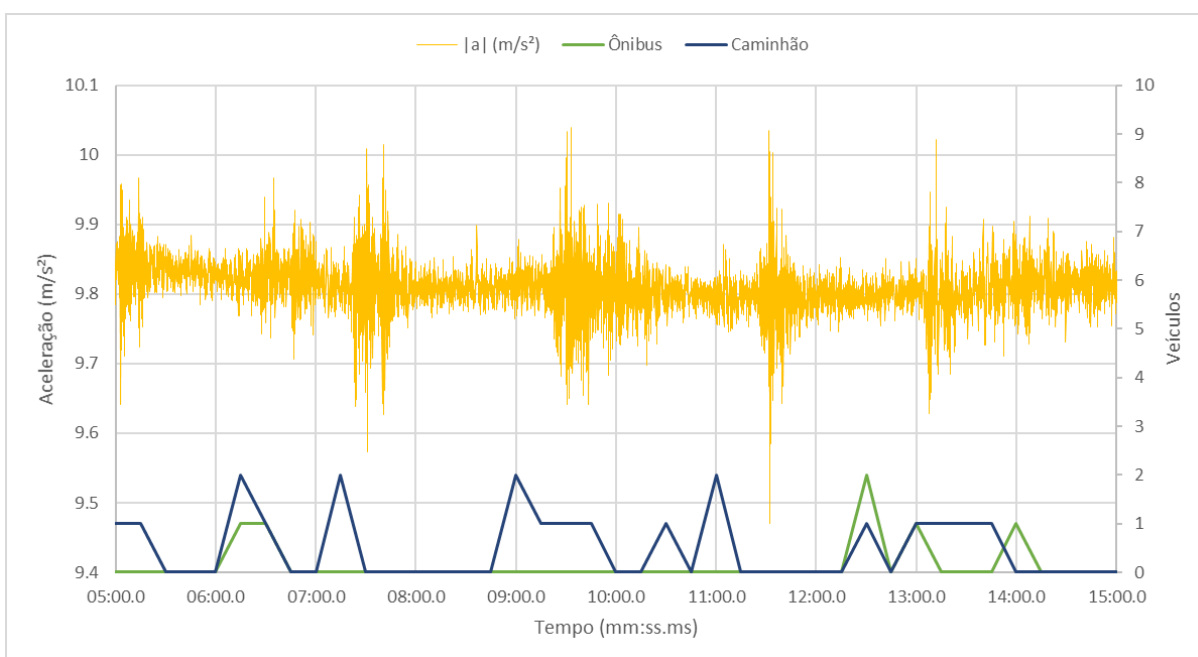
LOCAL:	Ponte Cidade Universitária - Ponto C			Data:	27/05/2019
				Hora:	14:05:00
Tempo	Ônibus	Caminhão			
14:05:00	0	1	0	0	0
14:05:15	0	1	0	0	0
14:05:30	0	0	0	0	0
14:05:45	0	0	0	0	0
14:06:00	0	0	0	0	0
14:06:15	1	2	0	0	0
14:06:30	1	1	0	0	0
14:06:45	0	0	0	0	0
14:07:00	0	0	0	0	0
14:07:15	0	2	0	0	0
14:07:30	0	0	0	0	0
14:07:45	0	0	0	0	0
14:08:00	0	0	0	0	0
14:08:15	0	0	0	0	0
14:08:30	0	0	0	0	0
14:08:45	0	0	0	0	0
14:09:00	0	2	0	0	0
14:09:15	0	1	0	0	0
14:09:30	0	1	0	0	0
14:09:45	0	1	0	0	0
14:10:00	0	0	0	0	0

Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 35 - Interação entre o tráfego e a Aceleração Z, obtida pelo celular.

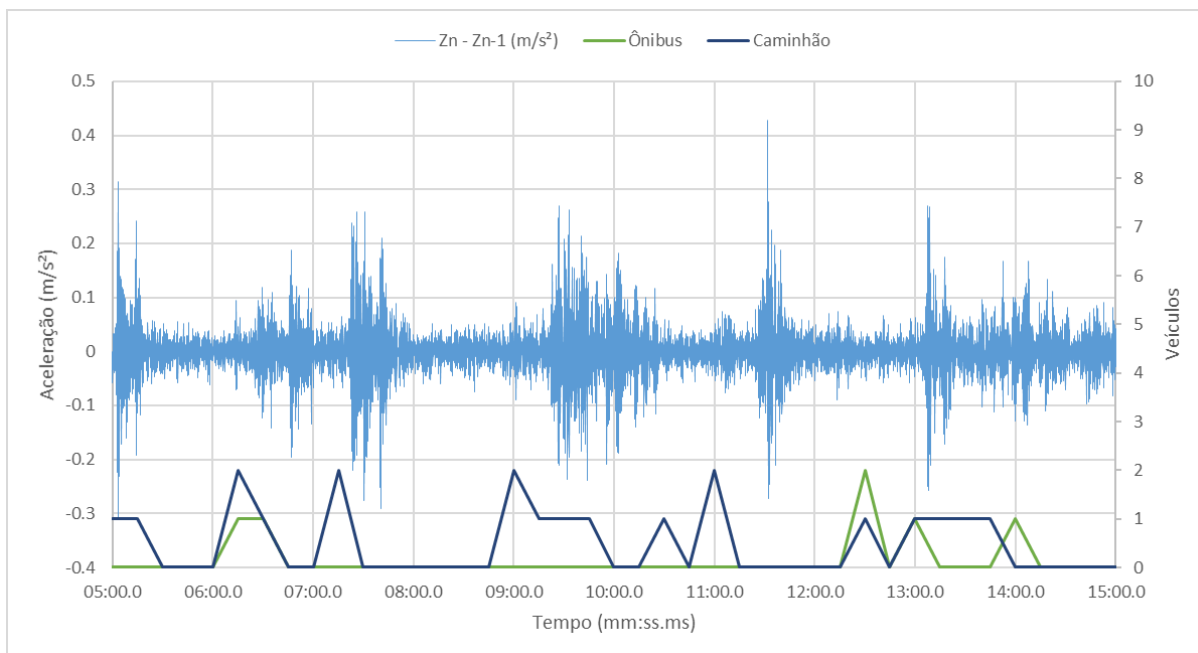


Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 36 - Interação entre o tráfego e o módulo de aceleração $|a|$, obtida pelo celular.

Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 37 - Interação entre o tráfego e a Amplitude Zn-Zn-1, obtida pelo celular.



Fonte: Própria autoria (2019)

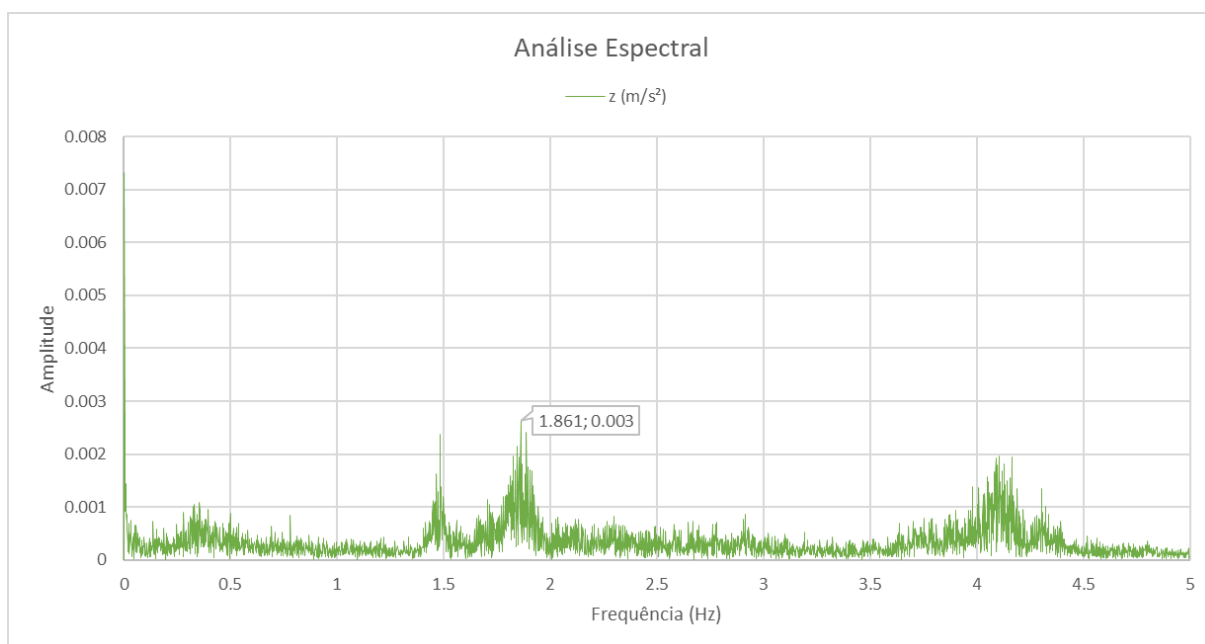
5. ANÁLISE MODAL OPERACIONAL

Para a realização da análise espectral do sinal, optou-se pelo uso do GNU Octave, que é uma linguagem computacional, desenvolvida para computação matemática, o código desenvolvido está apresentado no APÊNDICE J – CÓDIGO PARA REALIZAÇÃO DA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER. O método empregado foi a Transformada Discreta de Fourier (DFT), através do emprego do algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (FFT). Foi adotado pois se trata de um método simplificado, que independe das características estruturais, entretanto, diferentemente dos métodos NExT-ERA e SSI, mencionados anteriormente, não fornece o parâmetro dinâmico da taxa de amortecimento, apenas a frequência natural.

5.1. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

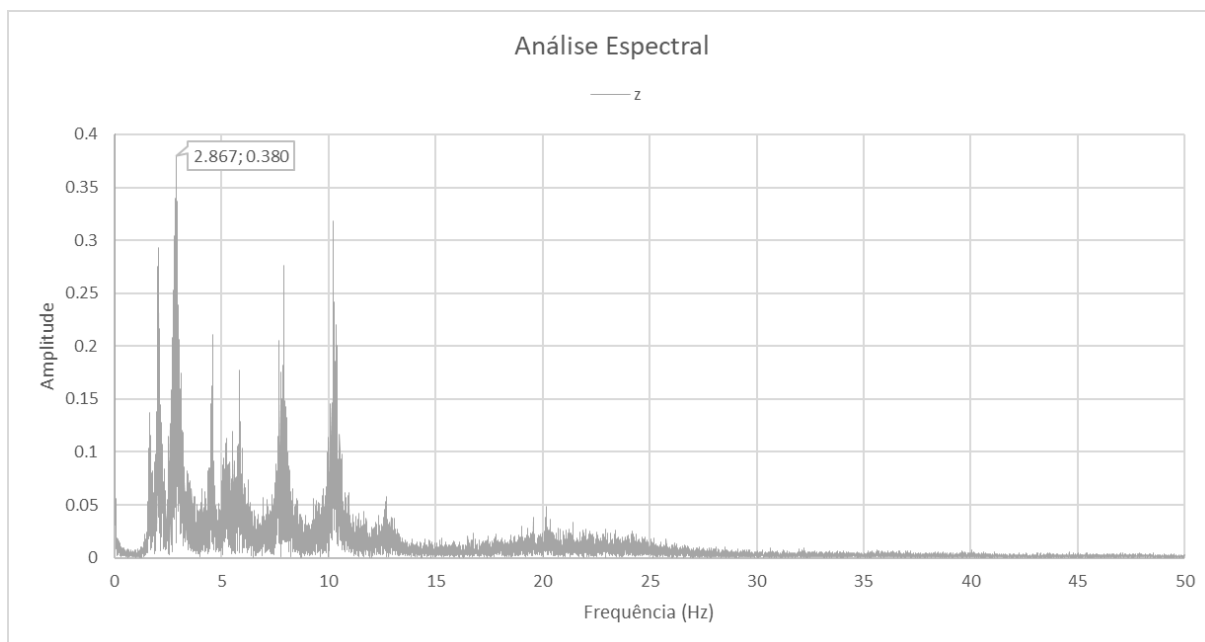
A seguir estão apresentados os gráficos gerados a partir da análise espectral do sinal, para a Ponte Cidade universitária – Ponto C. Os demais estão presentes nos APÊNDICES E, F, G e H.

Gráfico 38 - Análise espectral do sinal da componente z, da ponte da Ponte Cidade Universitária - Ponto C, obtido pelo celular ($f=10\text{Hz}$).



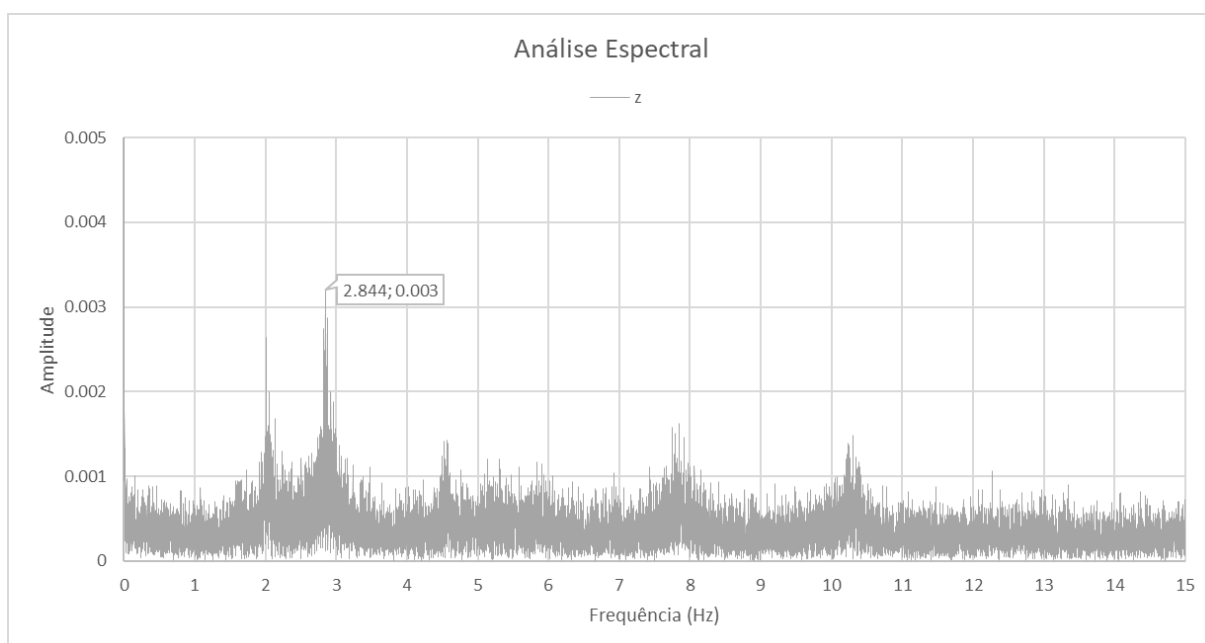
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 39 - Análise espectral do sinal da componente z, da ponte da Ponte Cidade Universitária - Ponto C, obtido pelo celular ($f=100\text{Hz}$).



Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 40 - Análise espectral do sinal da componente z, da ponte da Ponte Cidade Universitária - Ponto C, obtido pelo protótipo ($f=30\text{Hz}$).



Fonte: Própria autoria (2019)

Analisando os gráficos 38, 39 e 40, observa-se que o valor, referente a frequência natural, obtida na primeira visita em campo, difere da obtida posteriormente. Entretanto, os valores obtidos para a segunda visita, assemelham-se, sendo eles $f_{n,\text{celular}} = 2,867 \text{ Hz}$ e $f_{n,\text{protótipo}} = 2,844 \text{ Hz}$, apresentando uma variação de 0,80%.

Na Tabela 18, apresenta-se o compilado dos parâmetros dinâmicos obtidos, para as diferentes OAEs e para as diferentes configurações de coleta de dados realizadas. Analisando tais dados, nota-se que a variância, entre os dados da Passarela da EP e da Ponte de Veículos da EP, é de 0,396 e 0,375, respectivamente. Já os parâmetros da Ponte Av. Almeida Prado diferem muito.

Entretanto, para a Ponte Cidade universitária – Pontos A, os dados obtidos pelo celular a taxa de aquisição de 100 Hz são consistentes, assim como os dados do celular a 100 Hz, nas amostras 2 e 3, quando comparados ao do protótipo a 30 Hz. Agora, para o Ponto C, temos que os dados apresentados pelo celular e pelo protótipo, apresentam uma variação amostral de $8,5 \times 10^{-5}$.

Tabela 18 - Tabela resumo das frequências naturais calculadas, a partir da componente z da aceleração.

OAE	Frequência Natural (Hz)			
	Celular		Protótipo	
	10 Hz	100 Hz	10 Hz	30 Hz
Passarela Pedestres – EP	3,006	-	3,896	-
Ponte Veículos – EP	4,006	-	4,872	-
Ponte Av. Almeida Prado	0,293	-	4,080	-
Ponte Cidade Universitária – Ponto A	-	9,513	-	6,505
		10,983		
		9,258		
Ponte Cidade Universitária – Ponto B	-	4,503	-	2,798
		2,817		
		2,882		
Ponte Cidade Universitária – Ponto C	-	2,867	-	2,844
		2,867		
		2,883		

Fonte: Própria autoria (2019)

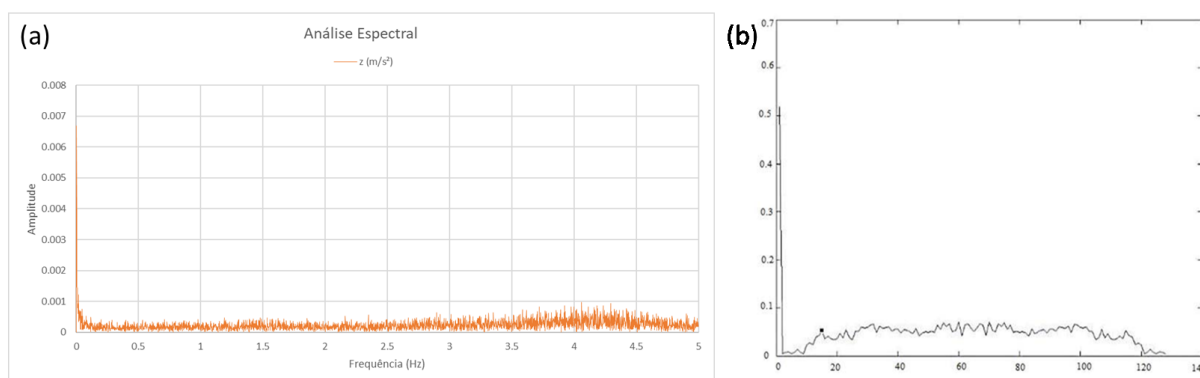
5.2. RUÍDO OBSERVADO

Nas várias análises modais realizadas, notou-se que alguns gráficos de análise espectral do sinal, retornaram em um formato, semelhante ao apresentado no Gráfico 41a. Tal gráfico, assemelha-se ao apresentado por Valinejadshoubi, Bagchi e Meselhi (2016) (Gráfico 41b). Segundo análise dos pesquisadores, pode haver diversos fatores que o causam, dentre eles:

- i. Erros de precisão;
- ii. Efeitos de temperatura;
- iii. Ambientais;
- iv. Elétricos;
- v. Magnéticos.

Classificam então o trecho, como ruído branco, que consistem em iguais quantidades de frequências e são resultantes do ruído do sinal, no domínio do tempo.

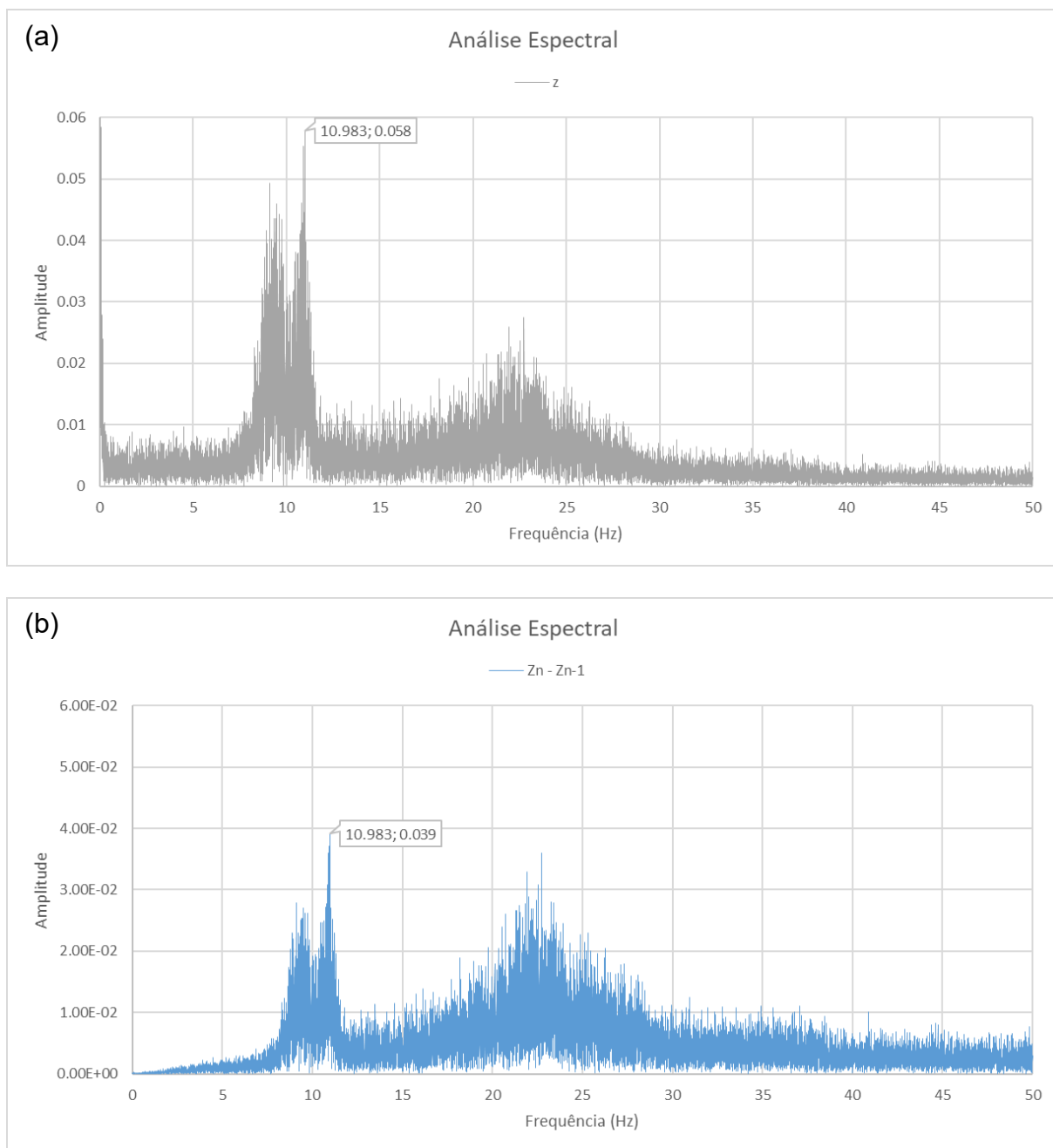
Gráfico 41 - Espectro de frequência não usual da aceleração. (a) Gerado pelo sinal da componente z; (b) Apresentado por Valinejadshoubi, Bagchi e Meselhi (2016).



Fonte: Própria autoria (2019)

Entretanto, realizando a análise espectral do parâmetro $Z_n - Z_{n-1}$, que embora não apresente um significado físico, poderia apresentar alguma informação relevante, observou-se alguns casos onde, ambas análises, apresentaram a mesma frequência natural de excitação, como pode ser observado no Gráfico 42. Não se pode afirmar tal correlação para todas as situações e casos, mas para esse estudo se mostrou útil como forma de filtrar o ruído presente no sinal.

Gráfico 42 - Comparação da obtenção da F_n através de: (a) Análise espectral da componente z da aceleração; (b) Análise espectral do parâmetro $Z_n - Z_{n-1}$.



Fonte: Própria autoria (2019)

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia adotada neste trabalho, envolvendo a pesquisa por referência bibliográficas relativas ao método convencional, à novas propostas de monitoramento e acerca da análise modal, conjuntamente à pesquisa de campo, mostrou-se eficaz, dado sua complementação, das informações retiradas de referências, com aquelas obtidas em campo. Embora a análise modal, através da análise espectral de sinais, tenha sido abordada no decorrer do curso, sua real relevância no panorama da avaliação de integridade estrutural não foi enfatizada.

Observando-se os gráficos comparativos, entre os dados obtidos pelo protótipo apresentado e pelo celular, observa-se que se pode obter os dados necessários através de sua utilização.

Voltando a premissa deste projeto, que é apresentar uma solução de menor custo, quando comparado ao sistema tradicional, mas que apresente resultados, nota-se que o protótipo apresentou resultados próximos aos apresentados pelo celular. Sendo assim, pode-se considerar que tal premissa foi seguida, dado que o protótipo teve um custo aproximado de duzentos reais, muito menor que os custos do sistema convencional.

Vale ressaltar que a resolução do acelerômetro do smartphone era de $3 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$, enquanto que a resolução do acelerômetro MPU-6050 era de $6 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$.

Entretanto, deve-se mencionar que, com pouco mais de 5 horas de uso, o aparelho ficou inoperante, dado a falta de energia. Além do fato de o módulo Bluetooth apresentar um alcance pequeno (raio máximo de dez metros).

Quanto aos gráficos de interação entre o tráfego apresentado e os dados obtidos, nota-se que pode se correlacionar os veículos com os picos nos gráficos da aceleração, no eixo Z, do módulo da aceleração $|a|$ e também na amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, como é possível identificar nos gráficos Gráfico 35, Gráfico 36 e Gráfico 37.

A realização da Análise Modal Operacional (OMA), utilizando-se da Transformada Discreta de Fourier (DFT), através do algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (FFT), permitiu a obtenção do parâmetro dinâmico de frequência natural de excitação da estrutura. Comparando com os resultados apresentados pelas referências abordadas neste trabalho e resumidas de forma sintética na Tabela 8, observa-se que

as magnitudes das frequências naturais são próximas às esperadas, assim como as características das curvas obtidas.

Após o estudo das referências e dos resultados obtidos, chegou-se às seguintes conclusões:

- i. A resolução do protótipo ($6 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$), foi insuficiente para alguns casos, como o da ponte do estacionamento da Escola Politécnica;
- ii. A resolução do smartphone ($3 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$), mostrou-se suficiente;
- iii. Pode-se correlacionar o tráfego, com o sinal de aceleração obtido;
- iv. Pode-se obter o parâmetro dinâmico de frequência natural, apenas com o sinal obtido;
- v. Pode-se obter parâmetros dinâmicos, como taxa de amortecimento e fator de amplificação dinâmica (FAD), correlacionando o sinal com características físicas da estrutura, como dimensões, carregamento, deslocamentos e massa;

A partir de tais conhecimentos obtidos, propõem-se as seguintes recomendações mínimas, para a um sistema de monitoramento da saúde estrutura (SHM), através de Análises Modais, de Obras de Artes Especiais:

- i. Resolução do aparelho de $3 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$;
- ii. Frequência de aquisição de dados de 20 Hz, obtida pelo teorema de amostragem de Shannon;
- iii. Tempo de aquisição de dados de 16,67 minutos, para minimizar os erros de vazamento ("leakage errors").

Conclui-se, portanto, que se pode propor um Sistema de Monitoramento da Saúde Estrutural de uma Obra de Arte Especial, de baixo custo, comparado ao Método Tradicional de monitoramento e capaz de fornecer dados precisos sobre os parâmetros estruturais. Entretanto para tal, deve-se embasar decisões de acordo com a necessidade e com a profundidade da análise que se pretende, o que implica na determinação dos tipos de sensores a serem empregados, suas configurações e localizações de instalação, além da determinação do método de análise que será empregada.

REFERÊNCIAS

- Almeida, G. R, de. **Sistema de baixo custo para monitoramento de vibração**. Volta Redonda, 2017. 15 p.
- Andolfato, R. P.; Camacho, J. S.; Brito, G. A. de. **Extensometria básica**. Ilha Solteira, 2004. 46 p.
- Ângelis, R. **TCC: conheça 3 metodologias para projetos de pesquisa mais utilizadas no meio acadêmico**. UNG, Mar. 2018. Disponível em: <<http://www.ung.br/noticias/tcc-conheca-3-metodologias-para-projetos-de-pesquisa-mais-utilizadas-no-meio-academico>>. Acesso em: 28 mai. 2019.
- Arteris. **Desenvolvimento e aplicação de técnicas de “structural health monitoring” para avaliação estrutural de pontes rodoviárias**. São Paulo, 2015. 296 p.
- Battista, R., & Pfeil, M., 2000. **Reduction of vortex-induced oscillations of Rio-Niterói Bridge by dynamic control devices**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 84, n. 3, pp. 273–288.
- Bittencourt, T. N. **Monitoramento “Convencional” de Estruturas: Análise Modal, Modelagem Numérica, Tipos de Equipamentos**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, 2013. 7 p. Slides da apresentação ministrada ao Grupo de Modelagem de Estruturas de Concreto.
- BLUETOOTH HC-05 com Arduino: Comunicando com PC**. RoboCore, set. 2016. Disponível em: <<https://www.robocore.net/tutorials/bluetooth-hc-05-com-arduino-comunicando-com-pc.html>>. Acesso em: 28 mai. 2019.
- Brownjohn et al. **Assessment of Highway Bridge Upgrading by Dynamic Testing and Finite-Elements Model Updating**. Journal of Bridge Engineering, jun., 2003.
- Carvalho Neto, J. A.; Veloso, L. A. C. M. de. **Monitoramento de pontes em concreto armado da estrada de ferro Carajás – Brasil**. Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural, Passo Fundo, v. 13, n. 1, p. 7-25, jan./jun. 2016.
- Castellanos-Touro, S. et al. **Frequencies and damping ratios of bridges through Operational Modal Analysis using smartphones**. Construction and Building Materials. Elsevier Science Publishers B. V., 2018.
- Costa, C. A. O.; Gomes, M. N. **Transformada de Fourier – Uso do Excel para Processamento de Sinais**. Revista Científica Interdisciplinar – Instituto Federal do Paraná – IFPR Paranaguá, v. 2, n. 1, ago., 2017.
- Couto, R. C. **Brasília Kubitschek de Oliveira**. 5. ed. Rio de Janeiro: Record, 2006.
- Cury, A., Borges, C.C.H., & Barbosa, F.S., 2010. **A two-step technique for damage assessment using numerical and experimental vibration data. Structural Health Monitoring**, vol. 10, n. 4, pp. 417-428.
- DERSA. **Memorial de Cálculo – Estudo de Conforto**. São Paulo, 2011.

DESABAMENTO de viaduto no DF reforça importância de políticas permanentes de manutenção. Sinaenco, Fev. 2018. Disponível em: <<http://sinaenco.com.br/noticias/desabamento-de-viaduto-no-df-reforca-importancia-de-politicas-permanentes-de-manutencao/>>. Acesso em: 28 mai. 2019.

Gautier, Y., Moretti, O., & Cremona, C., 2005. **Experimental modal analysis of the Millau Bridge**. Proceedings of Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures.

Gomes, V. **Desabamento do Eixão Sul, no DF, completa um ano.** G1, Fev. 2019. Disponível em: <<https://g1.globo.com/df/distrito-federal/noticia/2019/02/05/desabamento-do-eixao-sul-no-df-completa-um-ano.ghtml>>. Acesso em: 28 mai. 2019.

HISTÓRIA DE BRASÍLIA. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2019. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Hist%C3%B3ria_de_Bras%C3%ADlia&oldid=55086820>. Acesso em: 29 mai. 2019.

Jacobsen, P. **Como escolher o método de pesquisa.** Biblioteca Central UFRGS Blog, Out.2017. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/blogdabc/como-escolher-o-metodo-de-pesquisa-mais-adequado-para-sua-monografia/>>. Acesso em: 28 mai. 2019.

Lara, W.; Giancola, C. **MP quer que Prefeitura de SP pague multa de R\$ 34 milhões por não criar programa para pontes e viadutos.** G1, Nov. 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2018/11/20/prefeitura-de-sp-podera-ter-de-pagar-r-34-milhoes-por-nao-criar-programa-de-manutencao-de-pontes-e-viadutos.ghtml>>. Acesso em: 28 mai. 2019.

Lobel, F.; Seto G. **Pista cede, fecha marginal de SP e deve afetar trânsito mesmo após o feriadão.** Folha de S. Paulo, Nov. 2018. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2018/11/parte-de-viaduto-da-marginal-pinheiros-cede-e-bloqueia-pista-expressa.shtml>>. Acesso em: 28 mai. 2019.

Londoño, N. A.; Desjardins, S. L.; Lau, D. T. **Use of Stochastic Subspace Identification Mehods for Post-Disaster Condiçion assessment of Highway Bridges.** 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, ago 1-6, 2004.

Lu, Z.R., & Law, S.S., 2009. **Dynamic condition assessment of a cracked beam with the composite element model.** Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 23, n. 2.

Lynx Tecnologia, 2019. Disponível em: <<http://www.lynxtec.com.br/>>

Marques, J. **Reforma de pontes e viadutos de SP acumula mais de uma década de atraso.** Folha de S. Paulo, Nov. 2018. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2018/11/reforma-de-pontes-e-viadutos-de-sp-acumula-mais-de-uma-decada-de-atraso.shtml>>. Acesso em: 28 mai. 2019.

Martins, E. **Metodologia do TCC: aprenda como escolher a ideal para seu trabalho**. Mettzer, Fev. 2018. Disponível em: <<https://blog.mettzer.com/metodologia-tcc/>>. Acesso em: 28 mai. 2019.

Michishita, S. P. **Sistema de monitoramento contínuo e automatizado da ponte estaiada da estação Santo Amaro da linha 5 do metrô**. São Paulo, 2012. 37 p.

Moretti, I. **Metodologia de Pesquisa do TCC: conheça os tipos e veja como definir**. Viacarreira, Set. 2018. Disponível em: <<https://viacarreira.com/metodologia-de-pesquisa-do-tcc/>>. Acesso em: 28 mai. 2019.

MP dá 10 dias para Prefeitura de São Paulo explicar plano para viadutos e pontes. G1, Nov. 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2018/11/21/mp-da-10-dias-para-prefeitura-de-sp-explicar-plano-para-viadutos-e-pontes.ghtml>>. Acesso em: 28 mai. 2019.

Paiva, R. **Prefeitura de SP define 33 pontes e viadutos que serão vistoriados; veja lista**. G1, Dez. 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2018/12/07/prefeitura-de-sp-define-33-pontes-e-viadutos-que-serao-vistoriados-veja-lista.ghtml>>. Acesso em: 28 mai. 2019.

Paiva, R. **Prefeitura publica edital para chamar empresas para vistoriar pontes e viadutos de SP**. G1, Dez. 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2018/12/06/prefeitura-publica-edital-para-chamar-empresas-para-vistoriar-pontes-e-viadutos-de-sp.ghtml>>. Acesso em: 28 mai. 2019.

Pimentel, R. M. C. M. (2008). **Caracterização do Tráfego Ferroviário e dos seus Efeitos em Pontes de Pequeno Vão**. Dissertação – Faculdade de Engenharia da universidade do Porto, Porto, 2008.

Pravia, Z. M. C.; Braido, J. D. **Medição de características de vibração de pontes de concreto usando telefonia móvel**. IBRACON Structures and Materials Journal, Passo Fundo, 2015 vol.8 nº 5.

Prefeitura de São Paulo. Secretaria Especial de Comunicação. Prefeitura inicia cronograma de análise técnica em mais 40 pontes, viadutos e passarelas. Prefeitura de SP, Jan. 2019. Disponível em: <<https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/obras/noticias/?p=270620>>. Acesso em: 28 mai. 2019.

PREFEITURA de SP interdita ponte que leva à Dutra pela Marginal Tietê. G1, Jan. 2019. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2019/01/23/prefeitura-de-sp-interdita-ponte-que-leva-a-dutra-pela-marginal-tiete.ghtml>>. Acesso em: 28 mai. 2019.

RELATÓRIO aponta que 9 viadutos e pontes do DF precisam de reparo. G1, Ago. 2011. Disponível em: <<http://g1.globo.com/distrito-federal/noticia/2011/08/relatorio-indica-que-9-viadutos-do-df-precisam-de-reparacao-urgente.html>>. Acesso em: 28 mai. 2019.

Reynders E., 2009. **System identification and modal analysis in structural mechanics**. PhD thesis, Department of Civil Engineering, KU Leuven.

Ribeiro, B. **Prefeitura de SP quer fazer monitoramento eletrônico de pontes.** Estadão, Fev. 2019. Disponível em: <<https://sao-paulo.estadao.com.br/noticias/geral,prefeitura-de-sp-quer-fazer-monitoramento-eletronico-de-pontes,70002736047>>. Acesso em: 28 mai. 2019.

ROMPIMENTO de viga de apoio provocou interdição de ponte que leva à Dutra pela Marginal Tietê, diz Prefeitura. G1, Jan. 2019. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2019/01/23/rompimento-de-viga-de-apoio-provocou-interdicao-de-ponte-que-leva-a-dutra-pela-marginal-tiete-diz-prefeitura.ghtml>>. Acesso em: 28 mai. 2019.

Rune, B.; Palle, A. **Understanding Stochastic Subspace Identification.** Aalborg University, Dinamarca, 2006.

Silva, M. A. da. et al. **Sistema para monitoramento de vibrações utilizando Arduino.** Revista InterAtividade, Andradina, v.2, n. 2, 2o sem. 2014.

Simon, B. **Calibrating & Optimising the MPU6050.** Chillibasket, jan. 2015. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/blog/tutorial-acelerometro-mpu6050-arduino/>>. Acesso em: 28 mai. 2019.

Sinaenco. **Infraestrutura do Distrito Federal Prazo de Validade Vencido.** Brasília. 2011. 18 p.

Sinaenco. **Infraestrutura do Distrito Federal Prazo de Validade Vencido II.** Brasília. 2011. 29 p.

Tavares, L. dos S.; Ferreira, P. H. **Sistema de monitoramento de vibração estrutural baseado em IOT (internet das coisas).** Munhoz, 2018. 20p.

Thomsen, A. **Como usar o Arduino Bluetooth HC-05 em modo mestre.** Filipeflop, jul. 2014. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/blog/tutorial-arduino-bluetooth-hc-05-mestre/>>. Acesso em: 28 mai. 2019.

Thomsen, A. Tutorial: **Acelerômetro MPU6050 com Arduino.** Filipeflop, set. 2014. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/blog/tutorial-acelerometro-mpu6050-arduino/>>. Acesso em: 28 mai. 2019.

Toledo Júnior, E. G. **Acelerômetro sem fio de baixo custo para monitoramento dinâmico estrutural.** 2018. 84p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2018.

Torres, M.A., & Ruiz, S.E., 2007. **Structural reliability evaluation considering capacity degradation over time.** Engineering Structures, vol. 29, n. 9, pp. 2183-2192.

Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Divisão de Biblioteca. **Diretrizes para apresentação de dissertações e teses** / Divisão de Biblioteca da EPUSP. –3. ed. -- São Paulo, 2006.

Universidade de São Paulo. Sistema Integrado de Bibliotecas da USP. **Diretrizes para apresentação de dissertações e teses da USP: parte I (ABNT)** / Sistema Integrado de Bibliotecas da USP; Vânia Martins Bueno de Oliveira Funaro, coordenadora; Vânia

Martins Bueno de Oliveira Funaro... [et al.]. 3.ed. rev. ampl. mod. São Paulo: SIBiUSP, p. 100, 2016.

Valinejadshoubi, M.; Bagchi, A.; Moselhi, O. **Structural Health Monitoring of buildings and Infrastructure**. World Academy of Science, Engineering and technology. International Journal of Civil Environmental Engineering, v. 10, n. 6, 2016.

VIADUTO da Marginal Pinheiros sobre linha da CPTM cede próximo à Ponte do Jaguaré. G1, Nov. 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2018/11/15/elevado-de-acesso-da-marginal-pinheiros-para-a-ponte-do-jaguare-cede.ghtml>>. Acesso em: 28 mai. 2019.

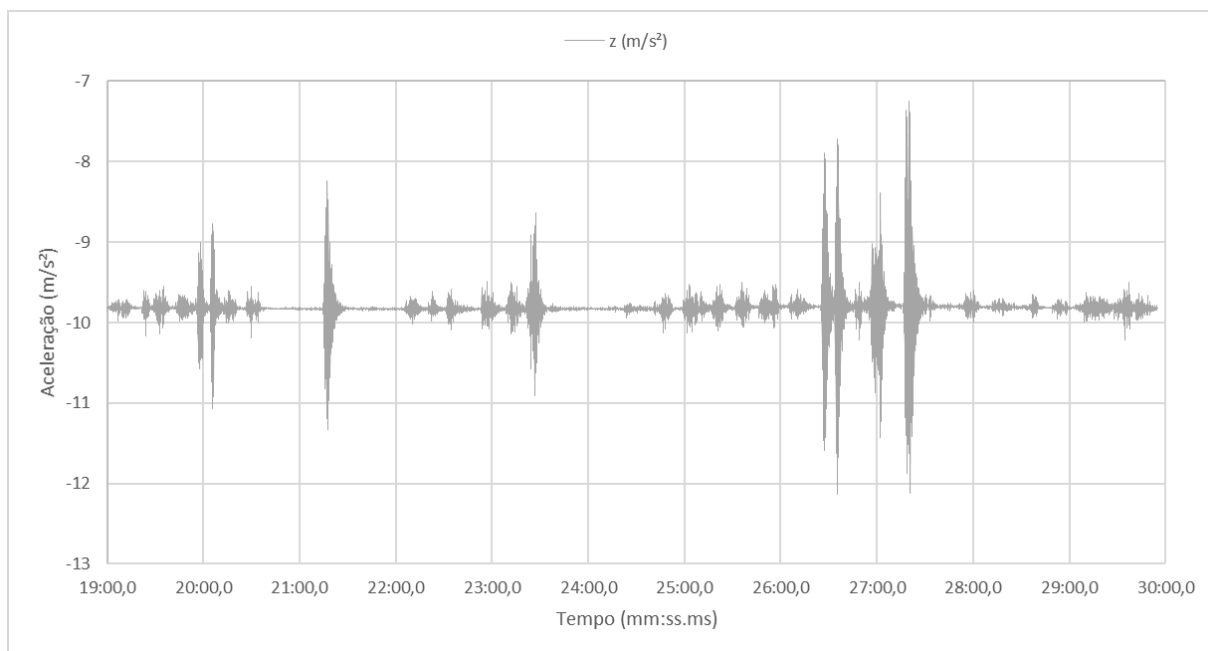
VIADUTO que caiu no DF já precisava de manutenção em 2009, diz relatório. G1, Fev. 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/df/distrito-federal/noticia/viaduto-que-caiu-no-df-ja-precisava-de-manutencao-em-2009-diz-relatorio.ghtml>>. Acesso em: 28 mai. 2019.

Zwolski, J.; Bien, J. **Modal Analysis of Bridge Structures by Means of Forced Vibration Tests**. Journal of Civil Engineering and Management, Vilnius, Lituânia, v. 17, n. 4, p. 590-599, out. 2011.

Zylberkan, M. **Esquecido há 4 décadas, viaduto que cedeu na marginal não tem nem nome**. Folha de S. Paulo, Nov. 2018. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2018/11/esquecido-ha-4-decadas-viaduto-que-cede-na-marginal-nao-tem-nem-nome.shtml>>. Acesso em: 28 mai. 2019.

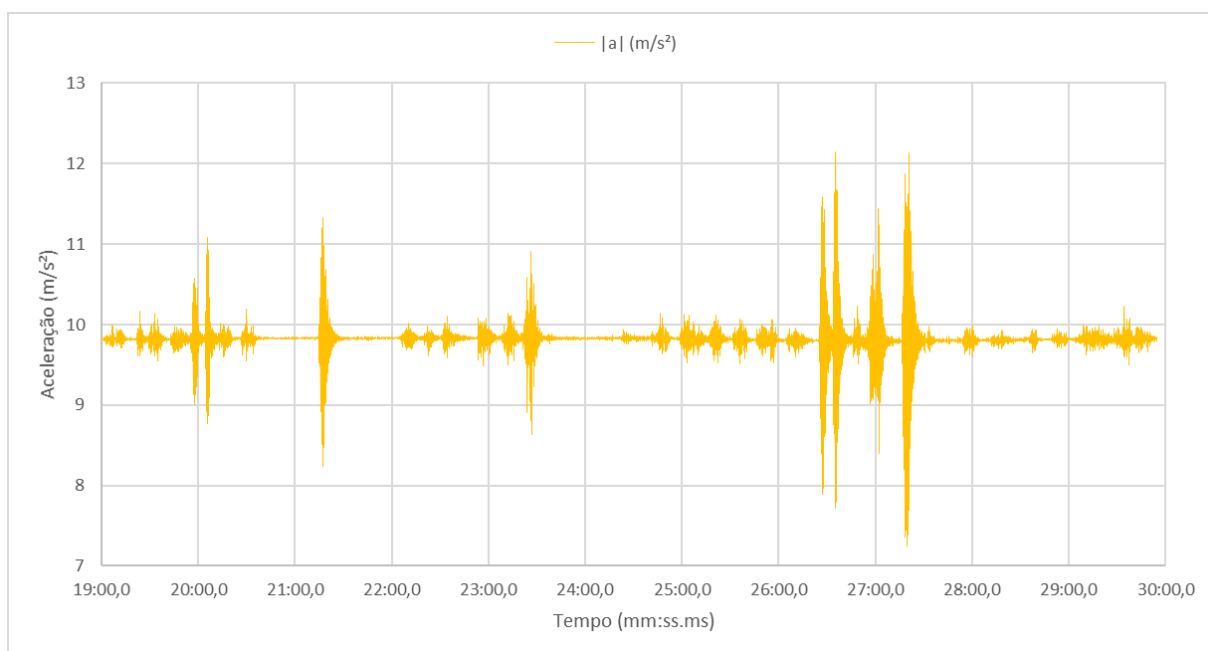
APÊNDICE A – GRÁFICOS ELABORADOS COM OS DADOS DO CELULAR (F=10Hz)

Gráfico 43 - Componente z da aceleração, coletado na passarela de pedestres da Escola Politécnica.



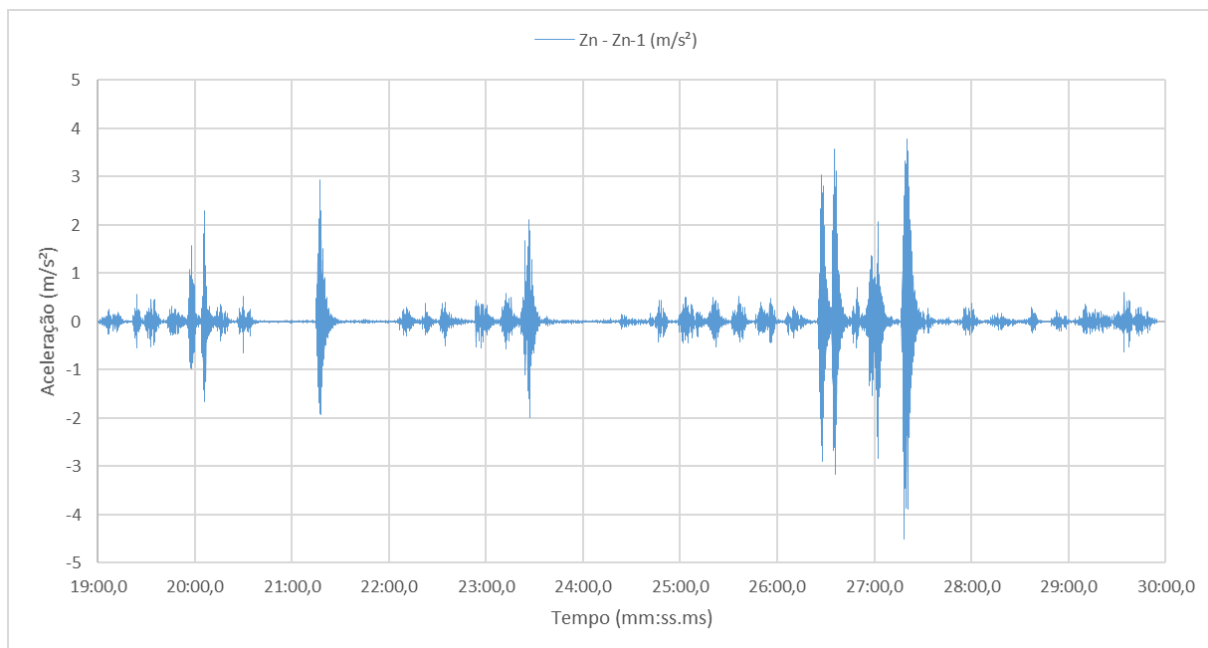
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 44 - Módulo da aceleração, coletado na passarela de pedestres da Escola Politécnica.



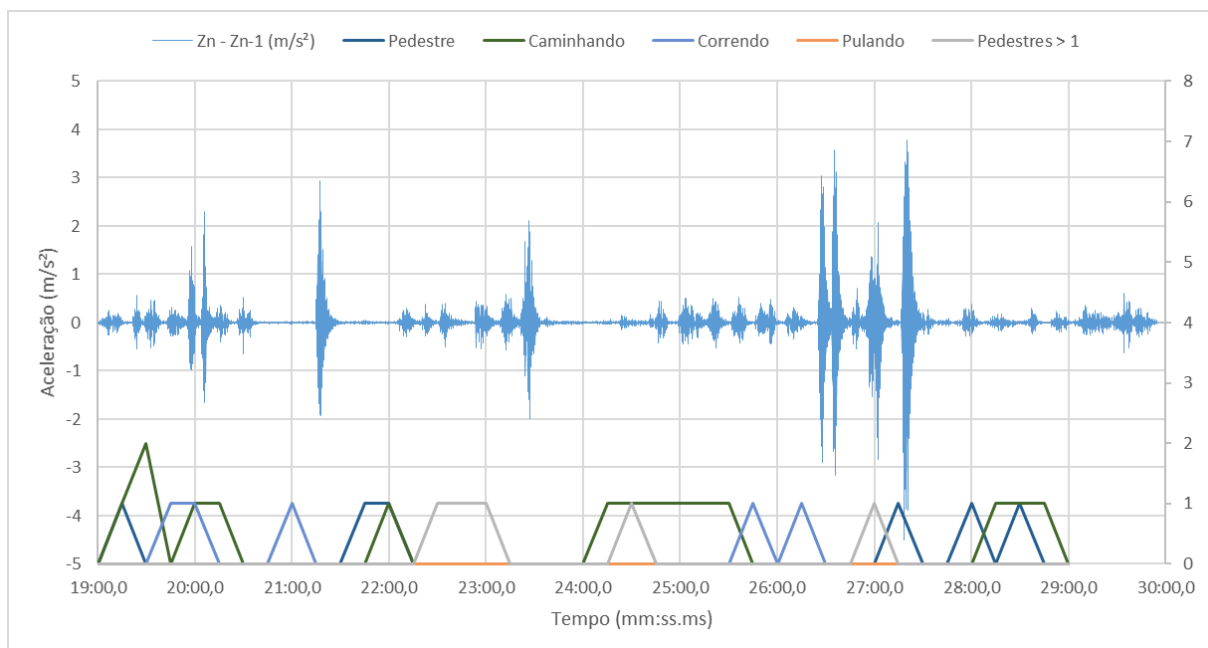
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 45 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na passarela de pedestres da Escola Politécnica.



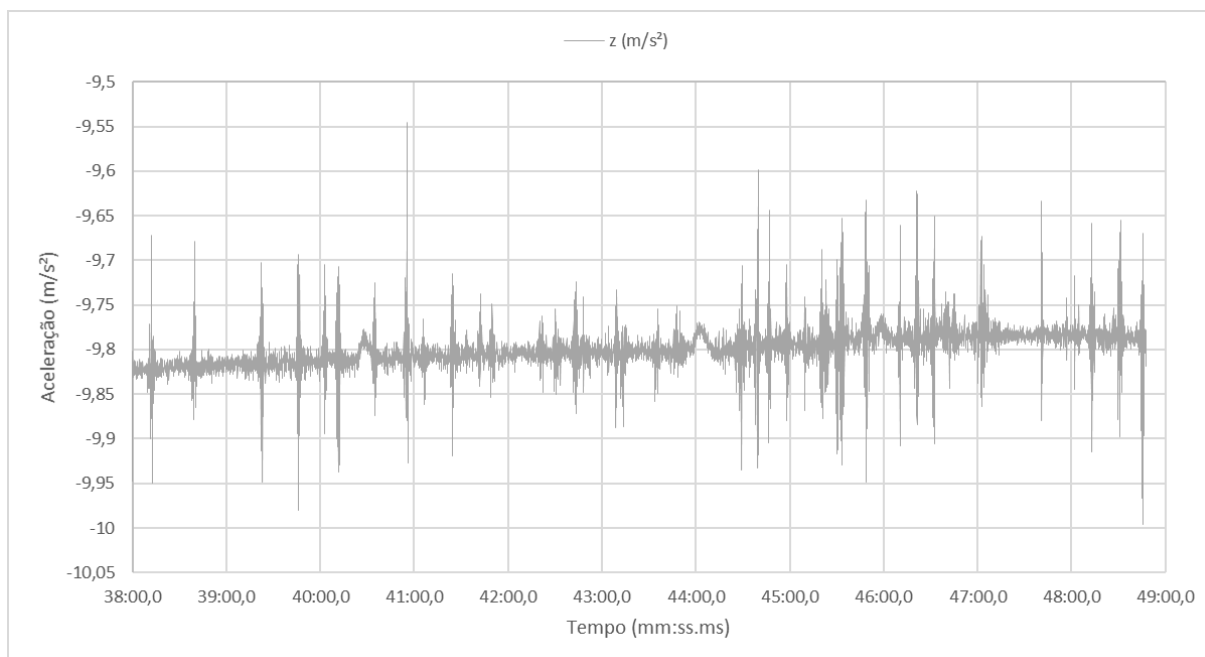
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 46 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na passarela de pedestres da Escola Politécnica.



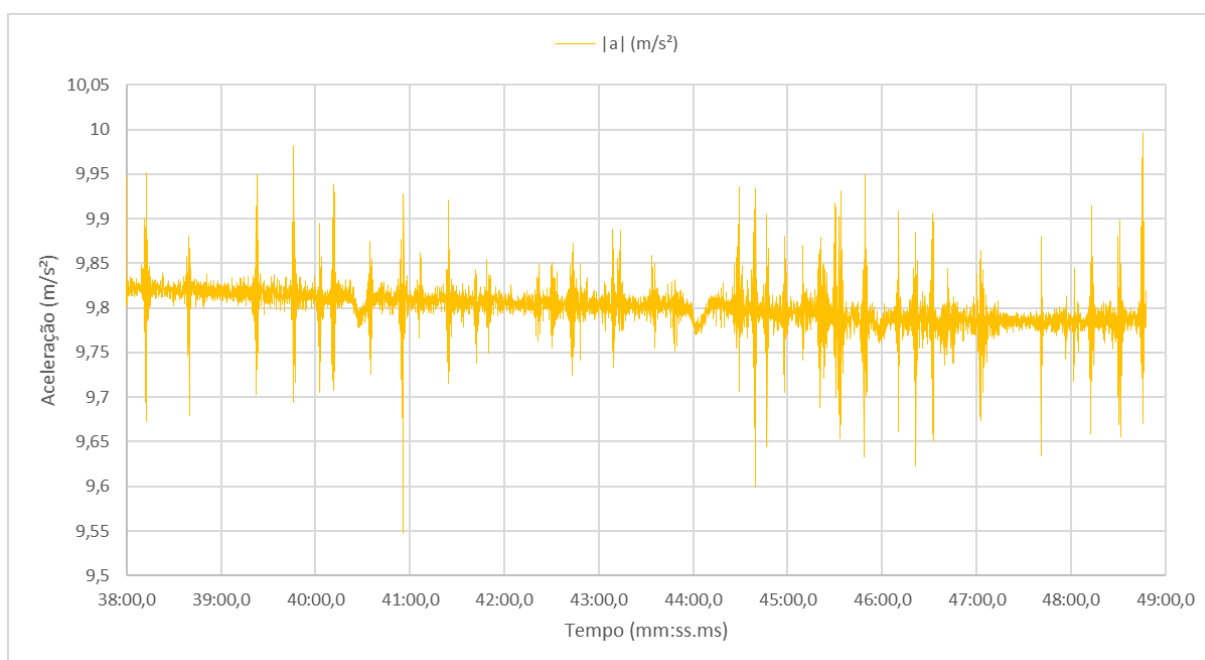
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 47 - Componente z da aceleração, coletado na ponte de veículos do estacionamento da Escola Politécnica.



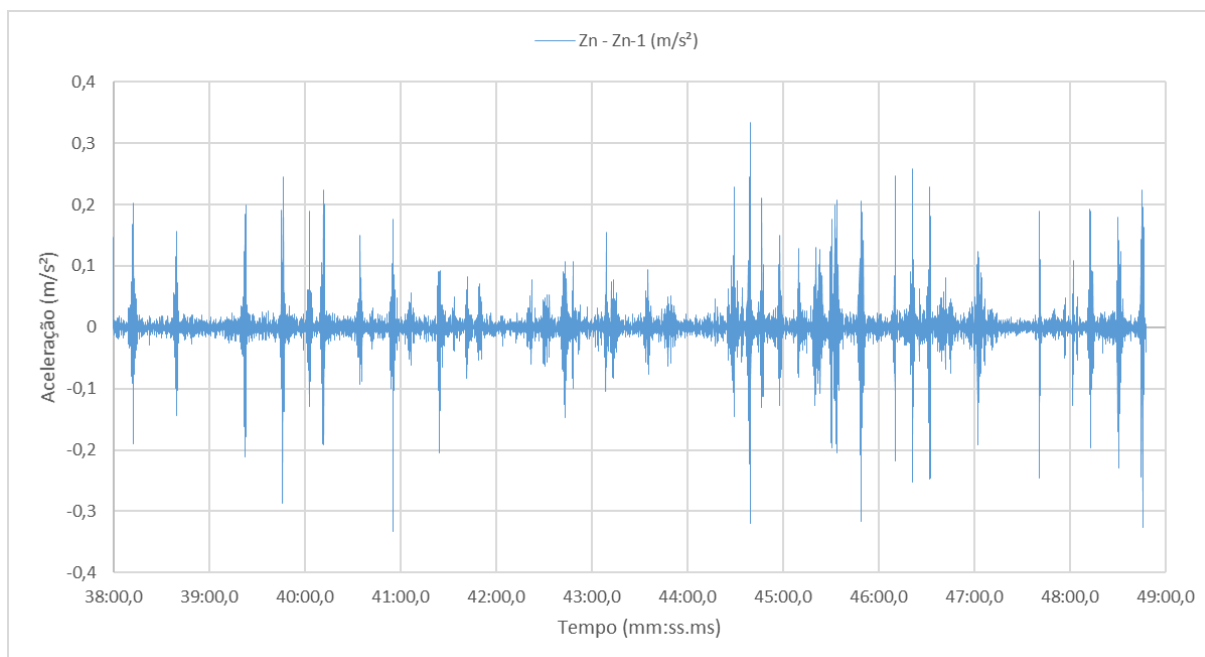
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 48 - Módulo da aceleração, coletado na ponte de veículos do estacionamento da Escola Politécnica.



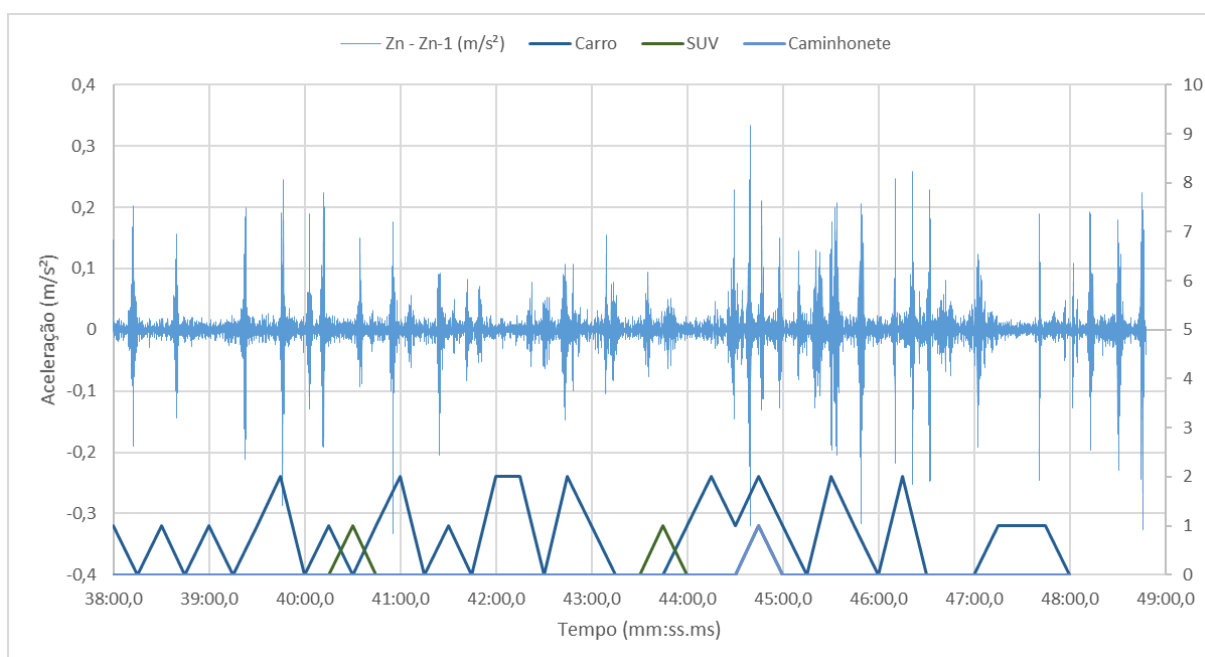
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 49 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na ponte de veículos do estacionamento da Escola Politécnica.



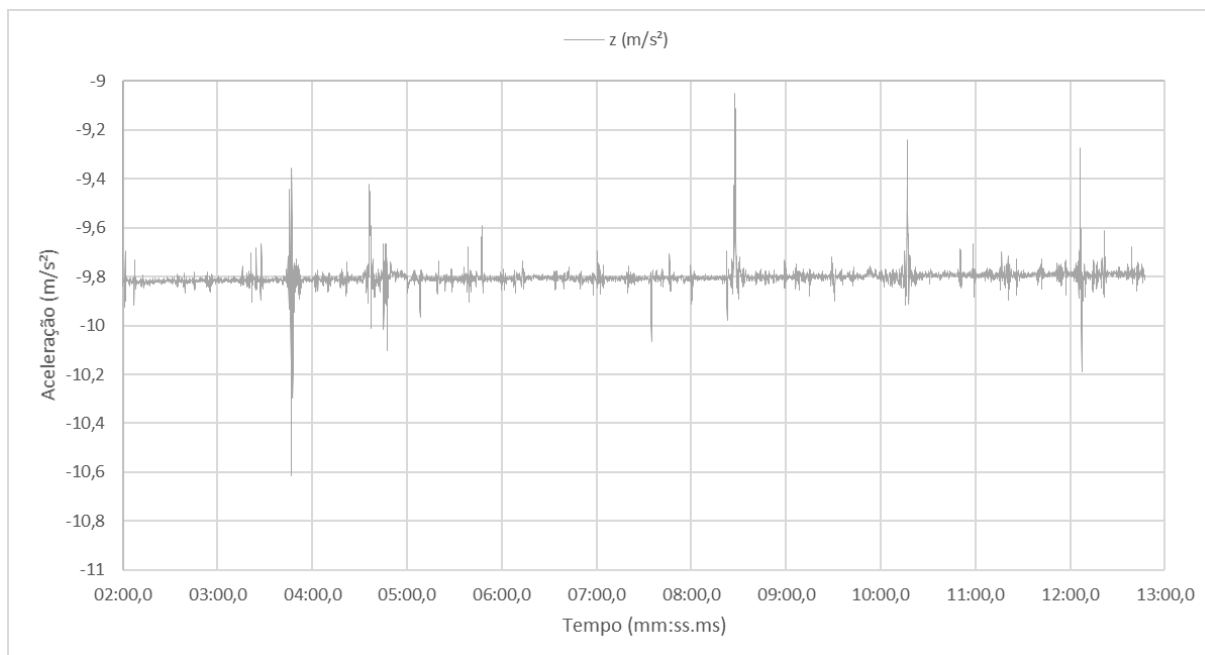
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 50 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na ponte de veículos do estacionamento da Escola Politécnica.



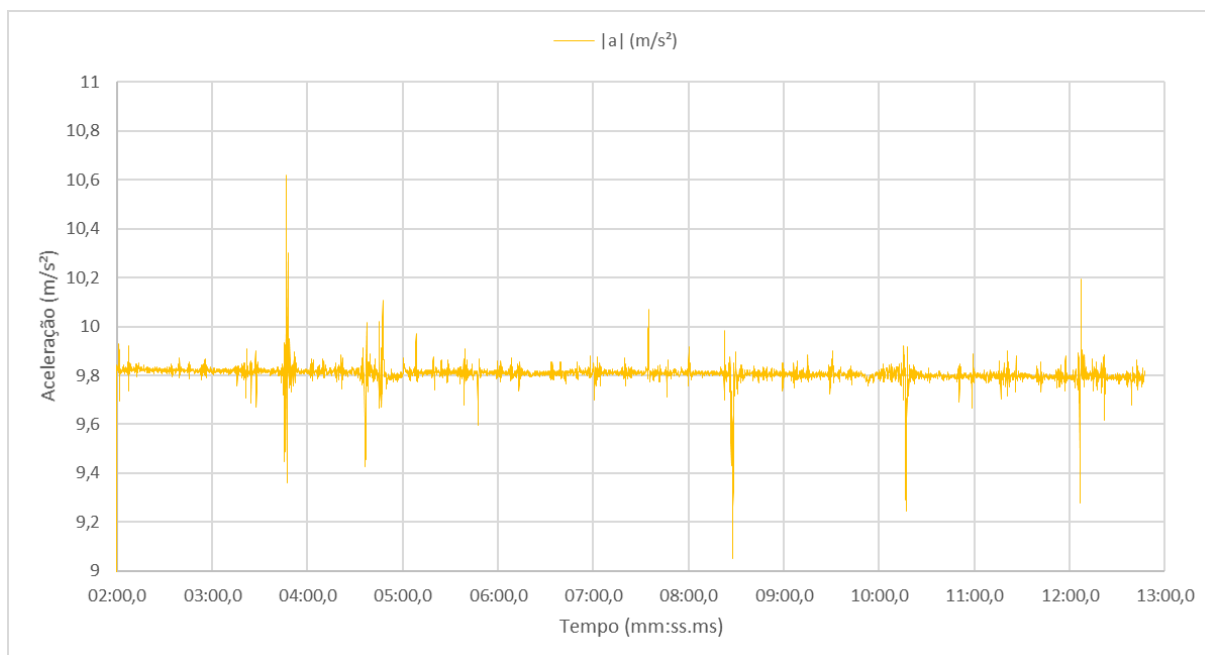
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 51 - Componente z da aceleração, coletado na ponte da Avenida Almeida Prado.

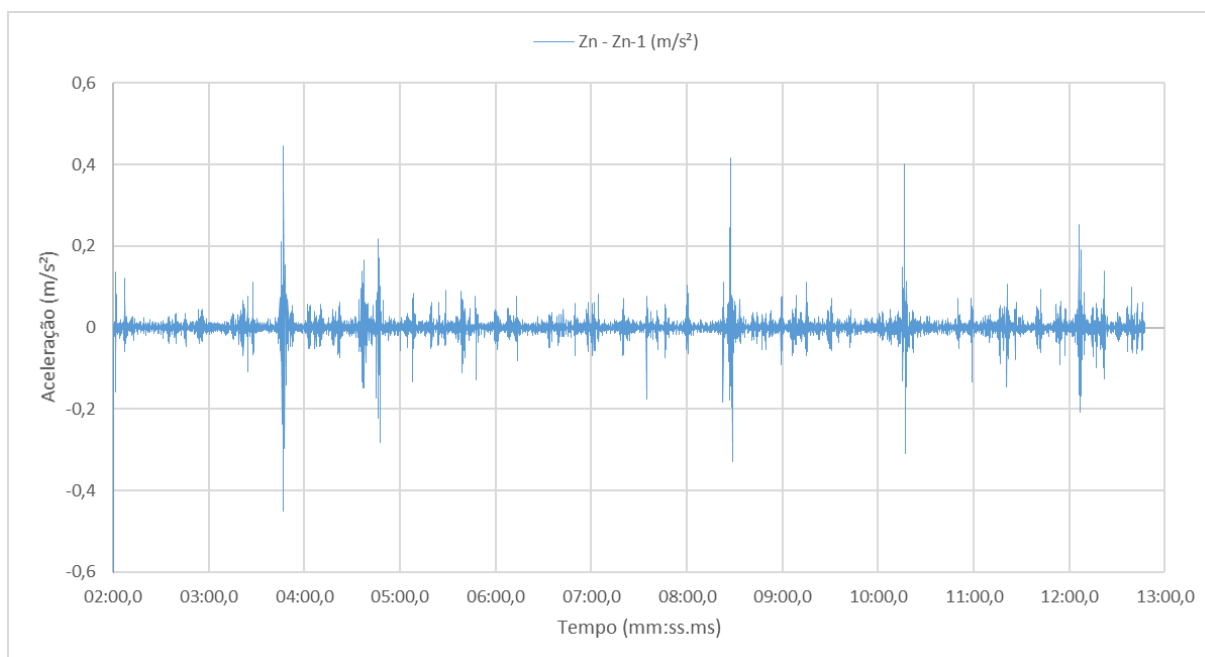


Fonte: Própria autoria (2019)

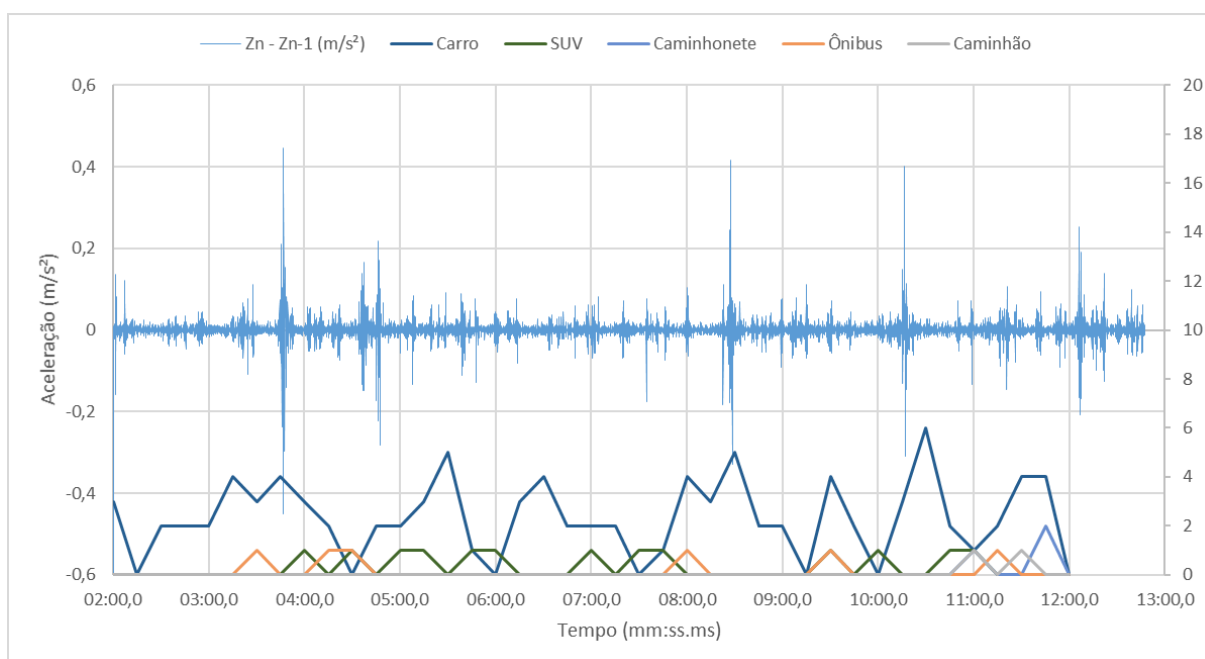
Gráfico 52 - Módulo da aceleração, coletado na ponte da Avenida Almeida Prado.



Fonte: Própria autoria (2019)

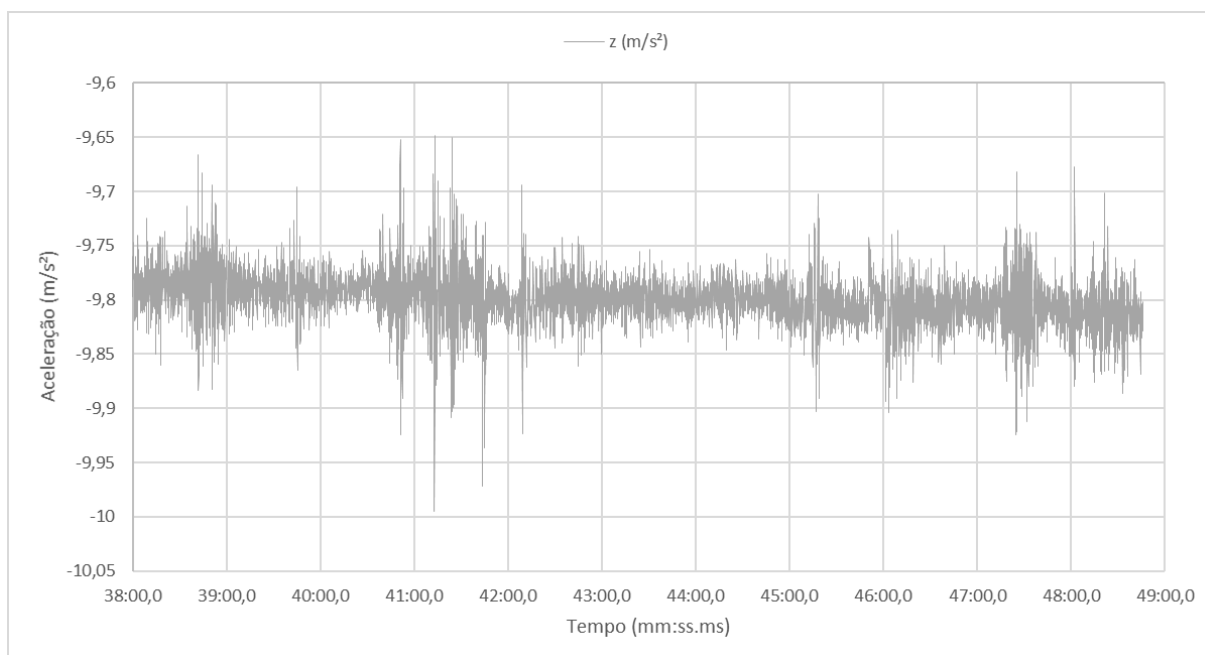
Gráfico 53 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na ponte da Avenida Almeida Prado.

Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 54 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na ponte da Avenida Almeida Prado.

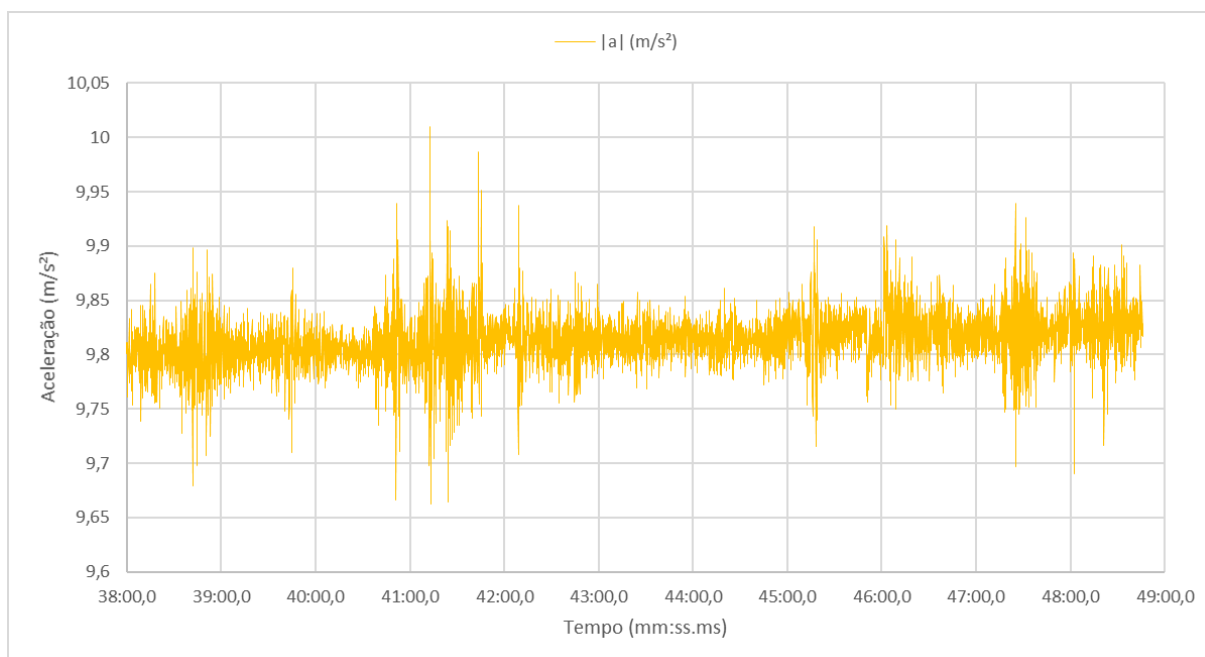
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 55 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A.

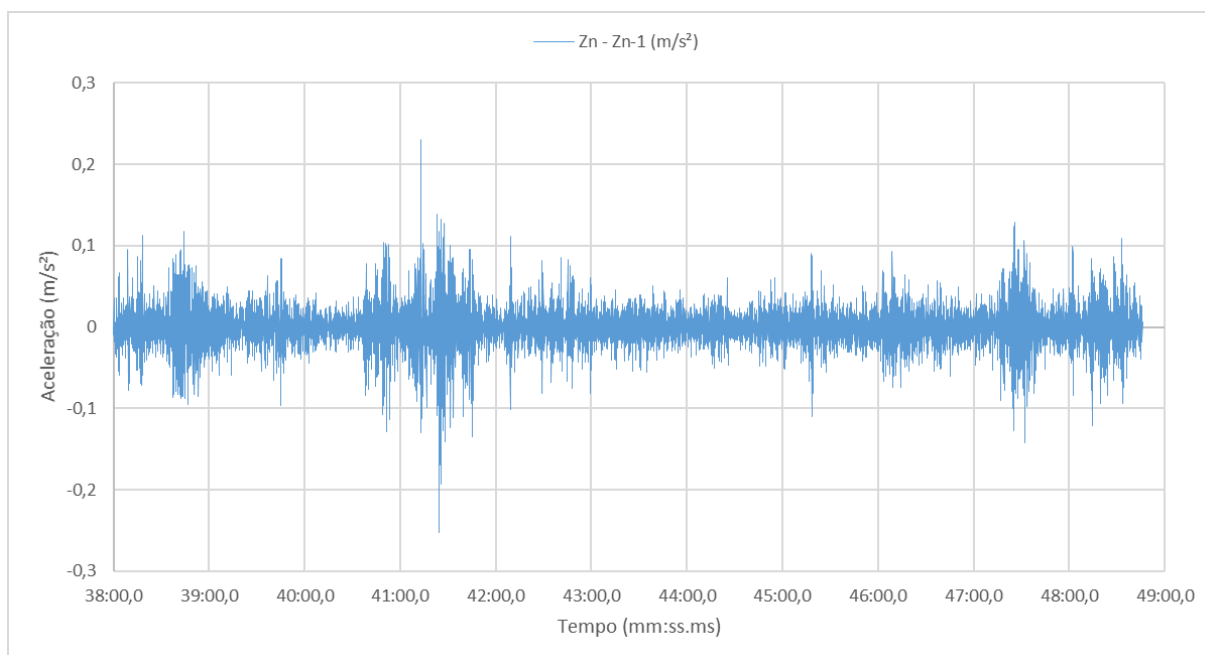


Fonte: Própria autoria (2019)

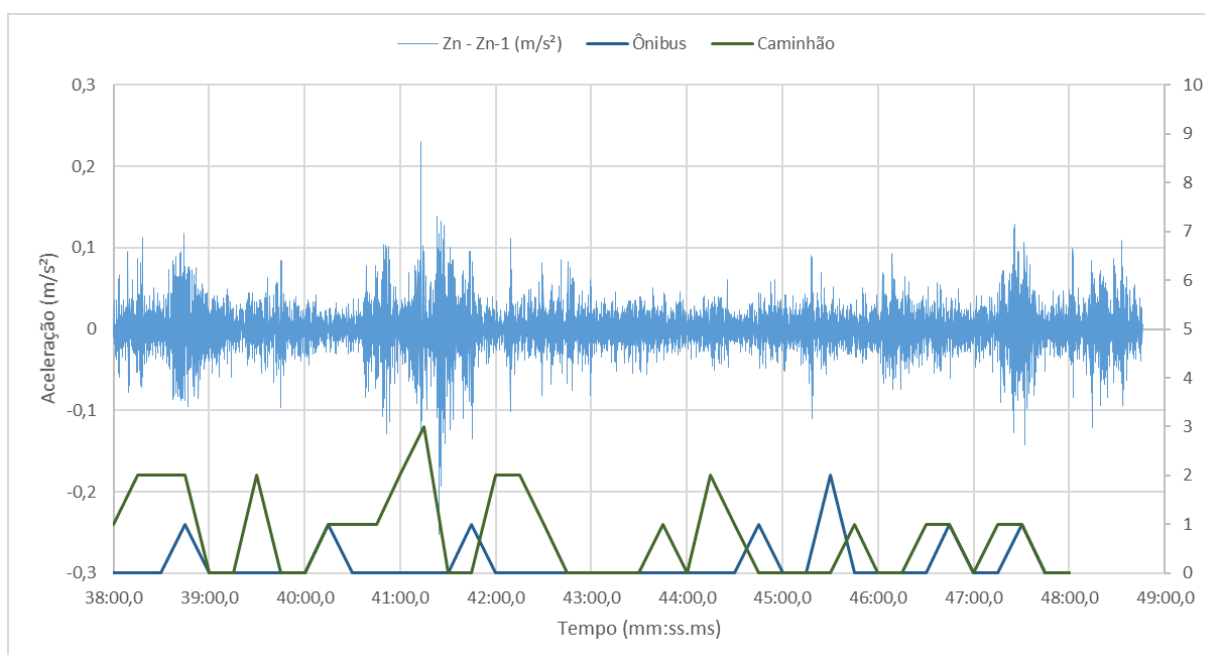
Gráfico 56 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A.



Fonte: Própria autoria (2019)

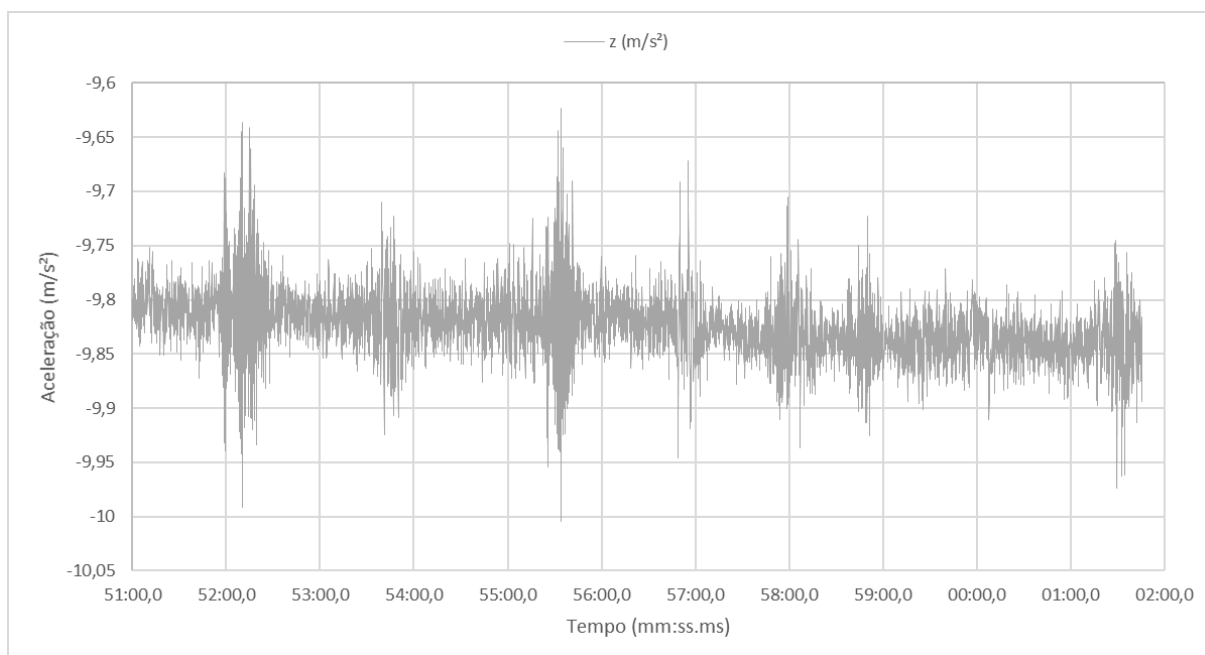
Gráfico 57 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A.

Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 58 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A.

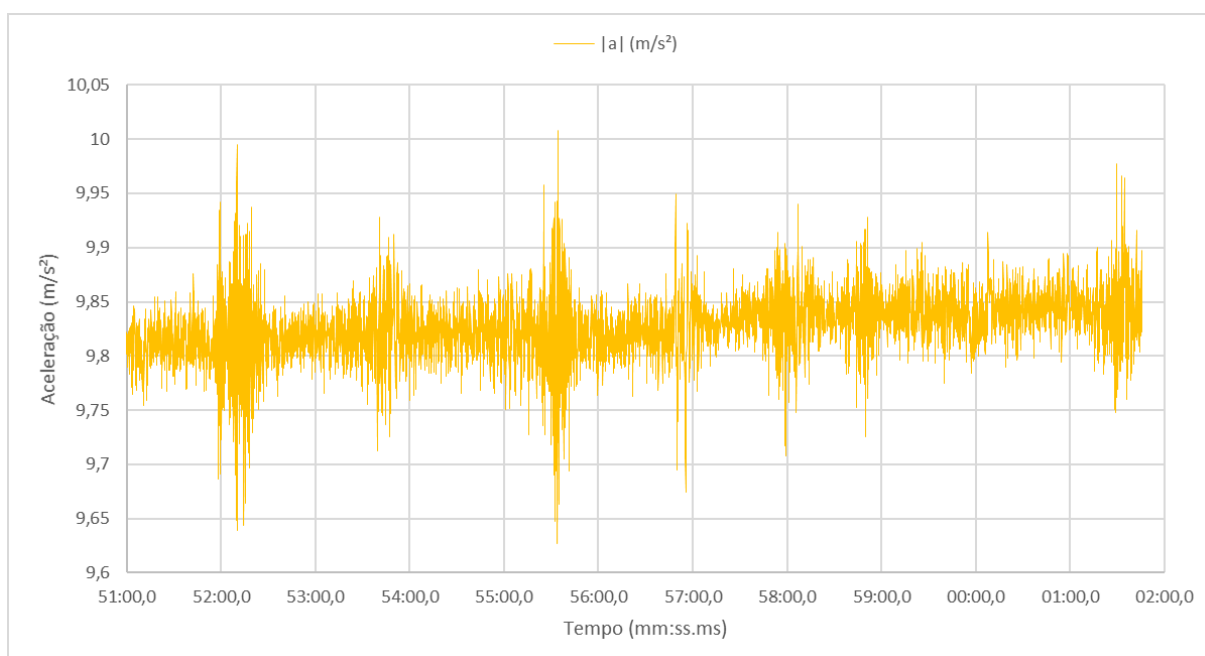
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 59 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B.

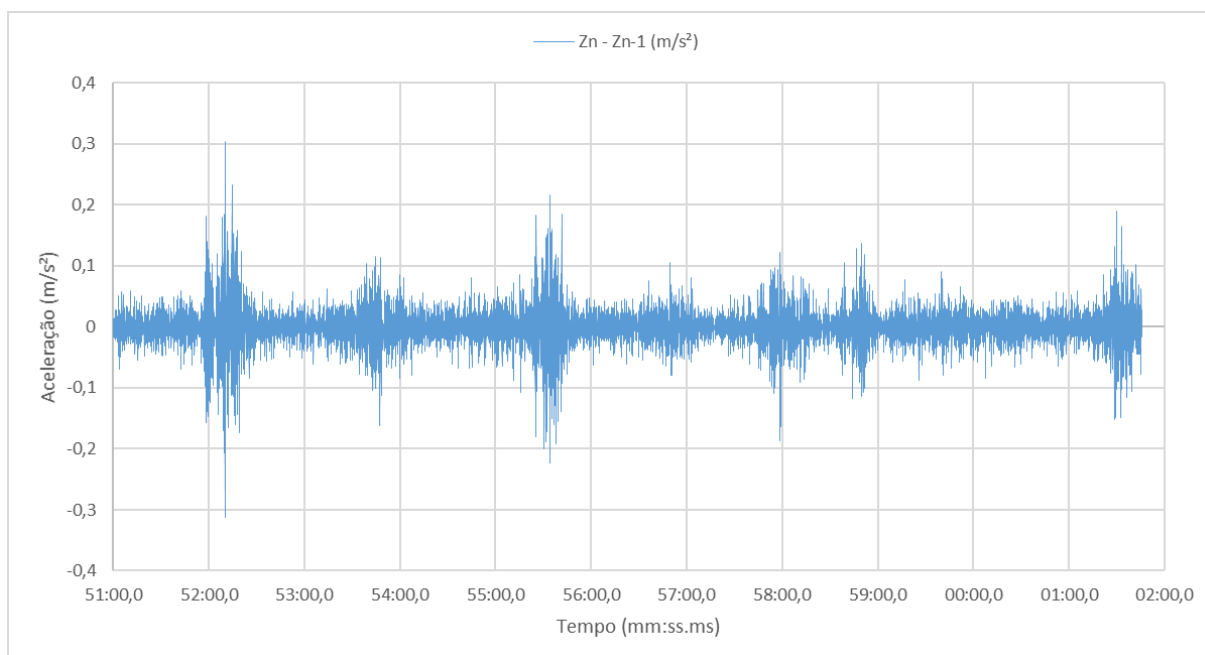


Fonte: Própria autoria (2019)

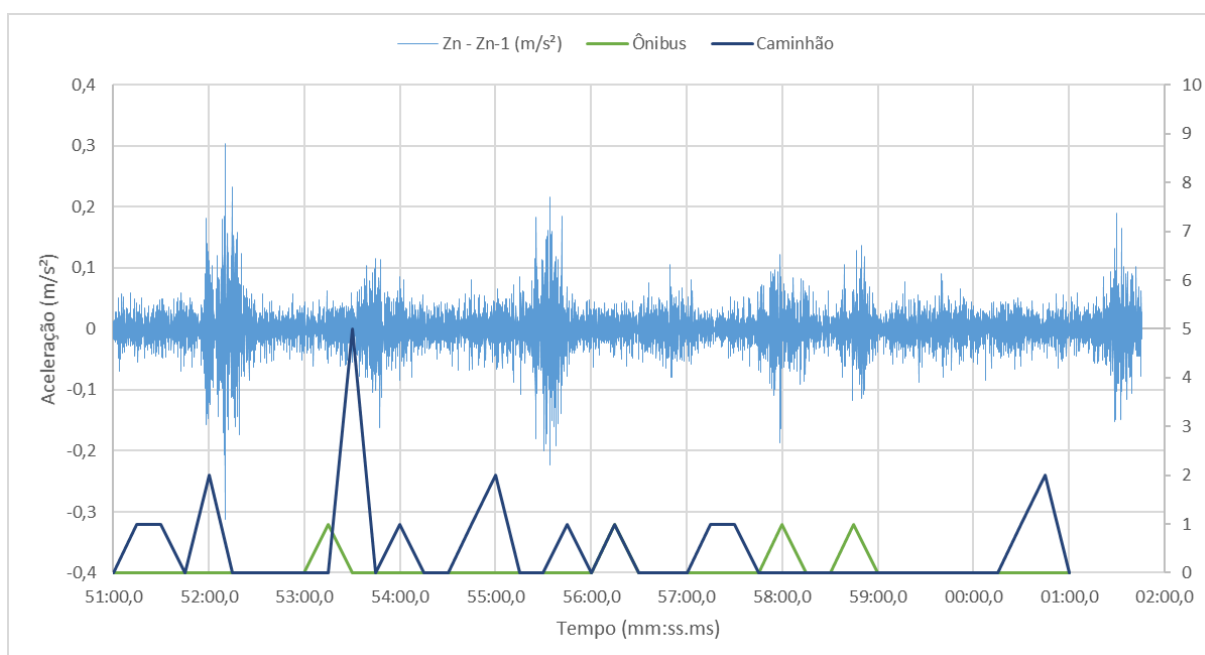
Gráfico 60 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B.



Fonte: Própria autoria (2019)

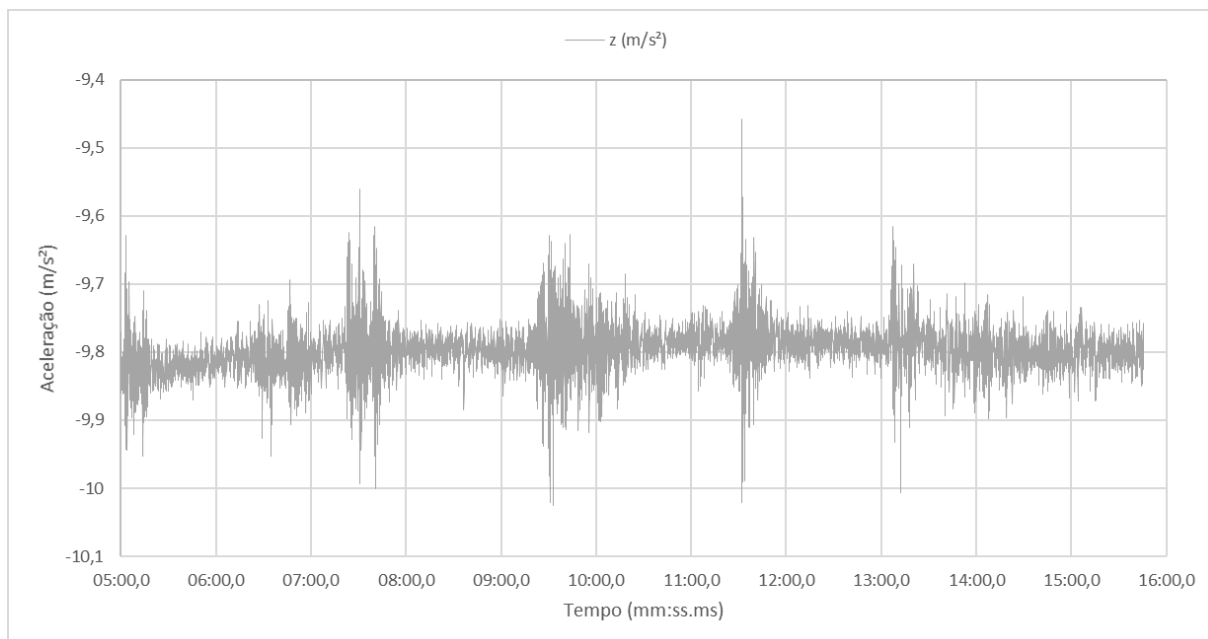
Gráfico 61 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B.

Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 62 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B.

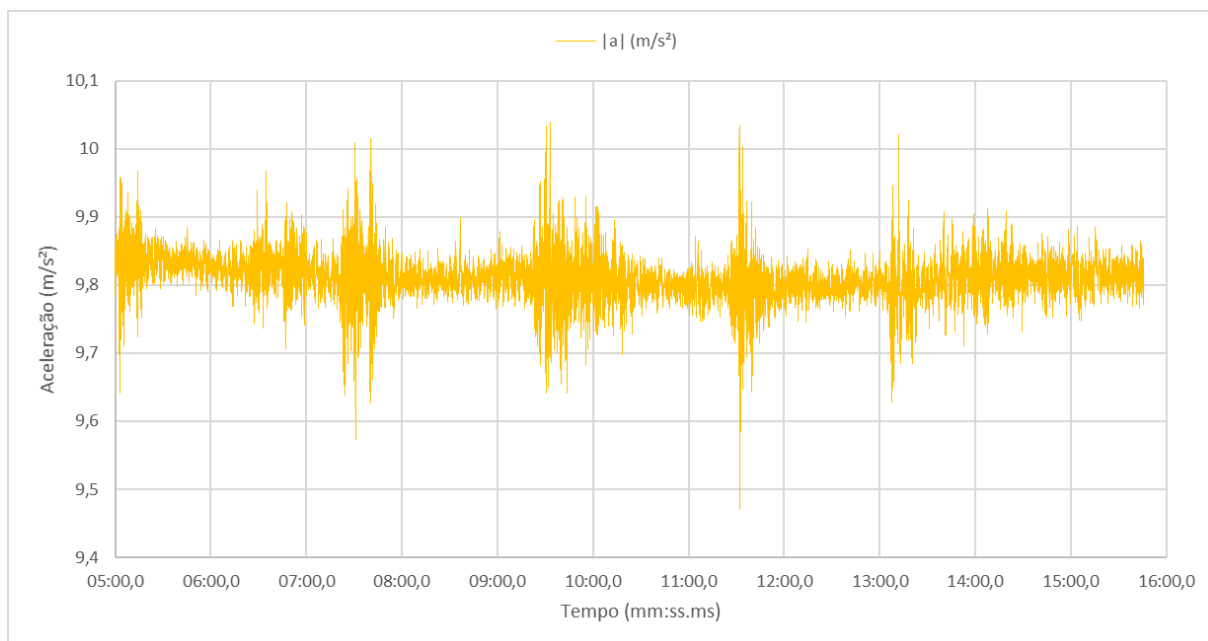
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 63 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C.

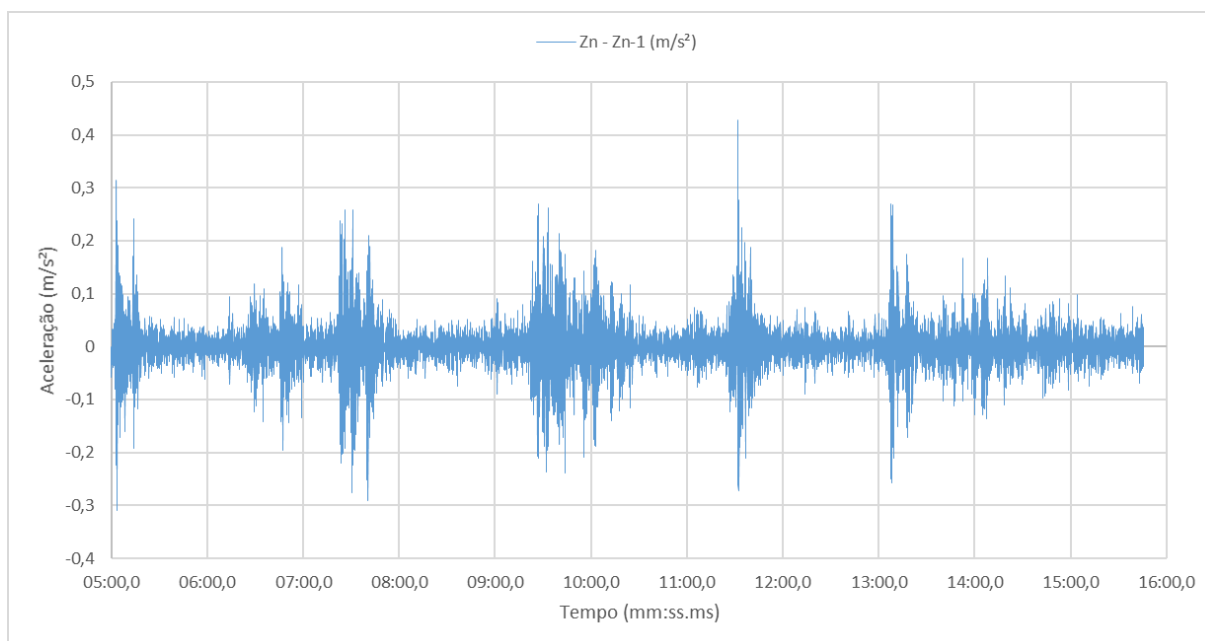


Fonte: Própria autoria (2019)

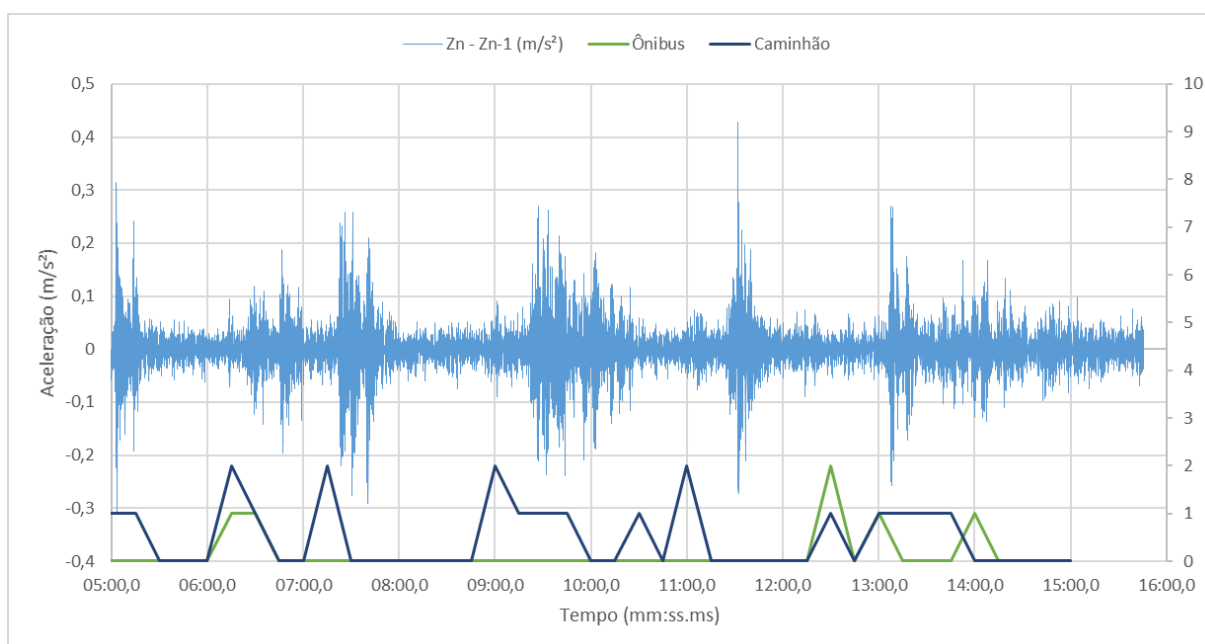
Gráfico 64 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C.



Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 65 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C.

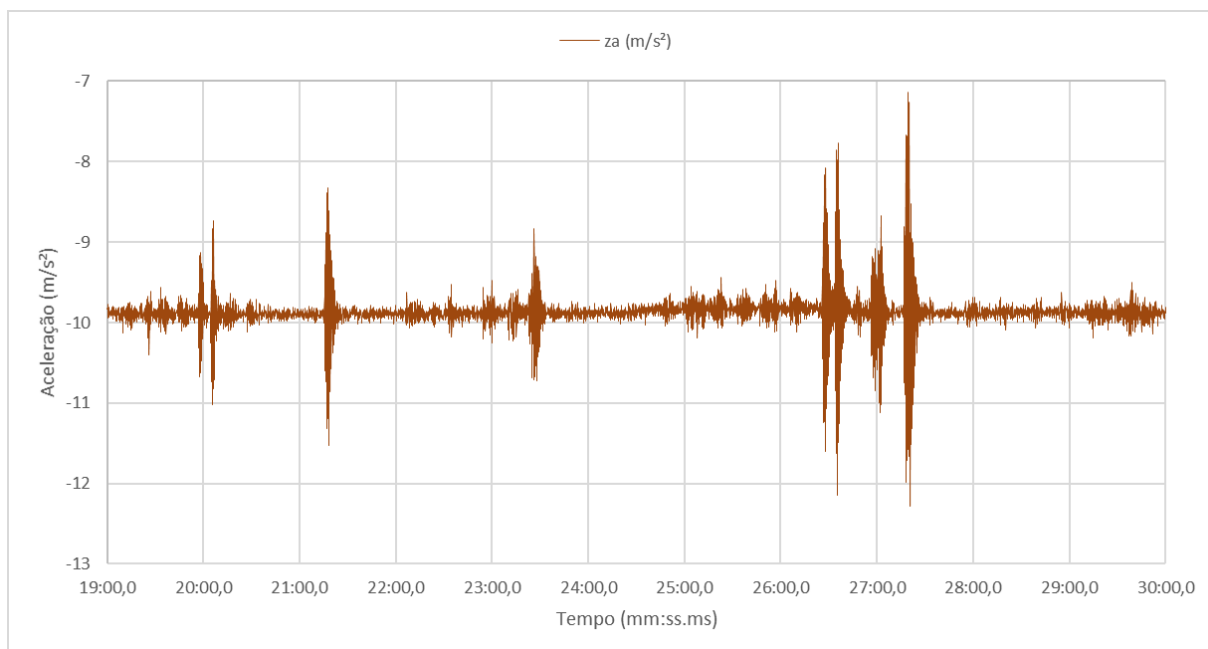
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 66 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C.

Fonte: Própria autoria (2019)

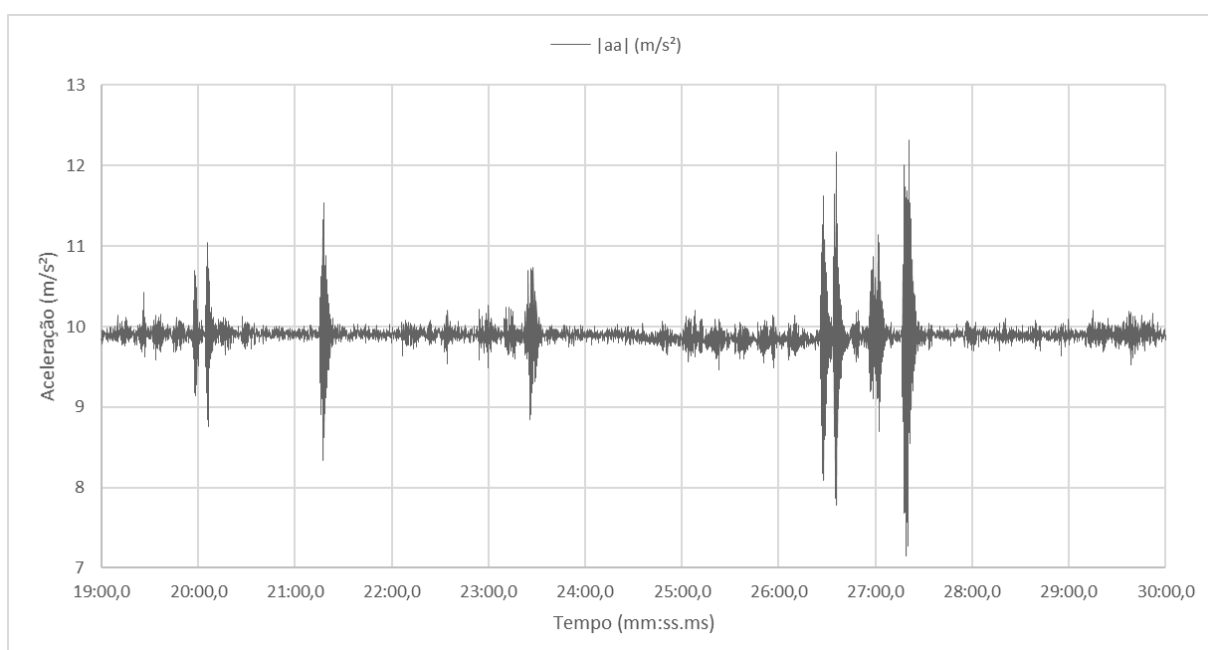
APÊNDICE B – GRÁFICOS ELABORADOS COM OS DADOS DO ARDUINO (F=10Hz)

Gráfico 67 - Componente z da aceleração, coletado na passarela de pedestres da Escola Politécnica.



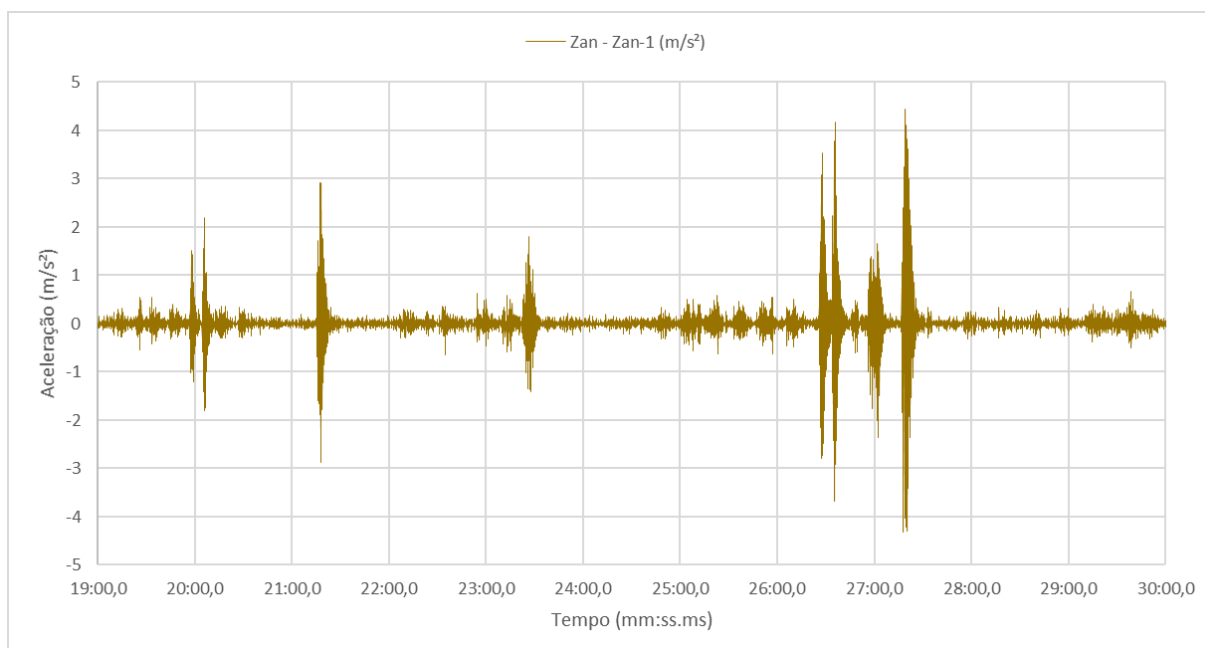
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 68 - Módulo da aceleração, coletado na passarela de pedestres da Escola Politécnica.



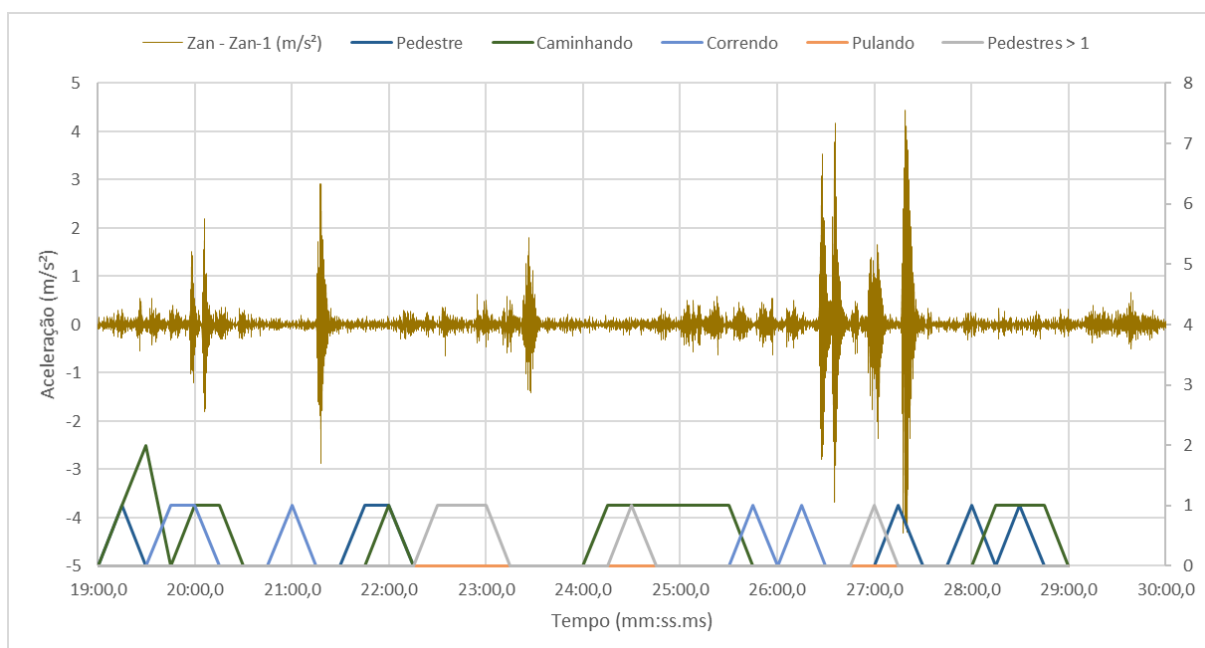
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 69 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na passarela de pedestres da Escola Politécnica.



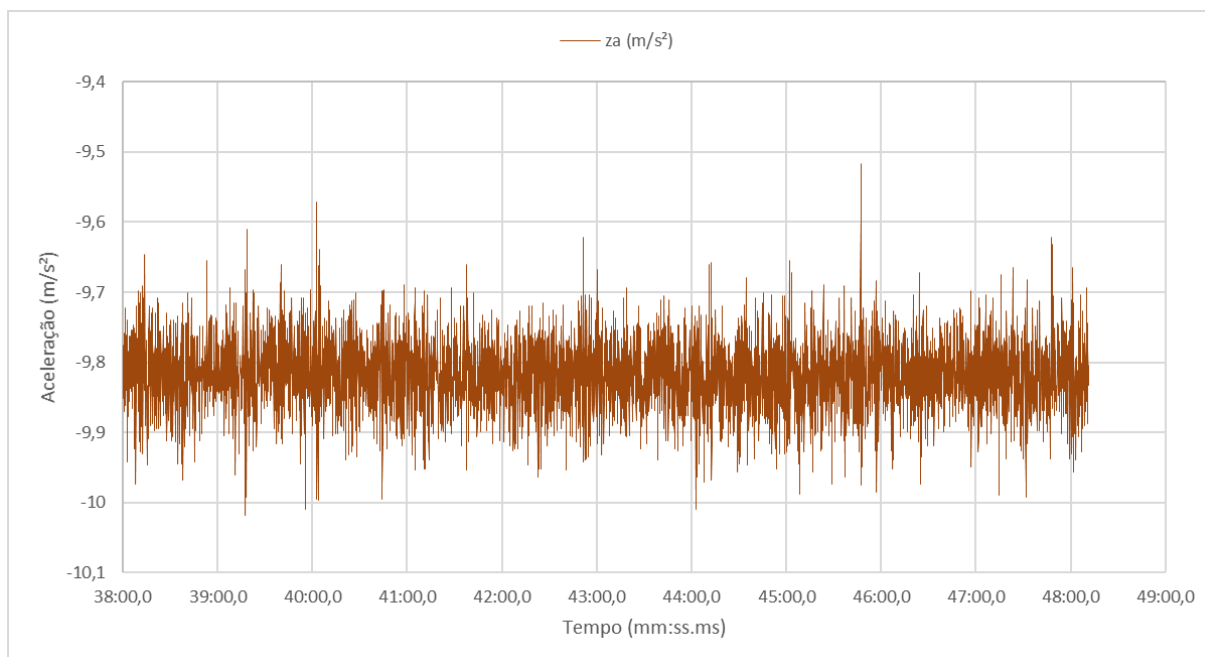
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 70 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na passarela de pedestres da Escola Politécnica.



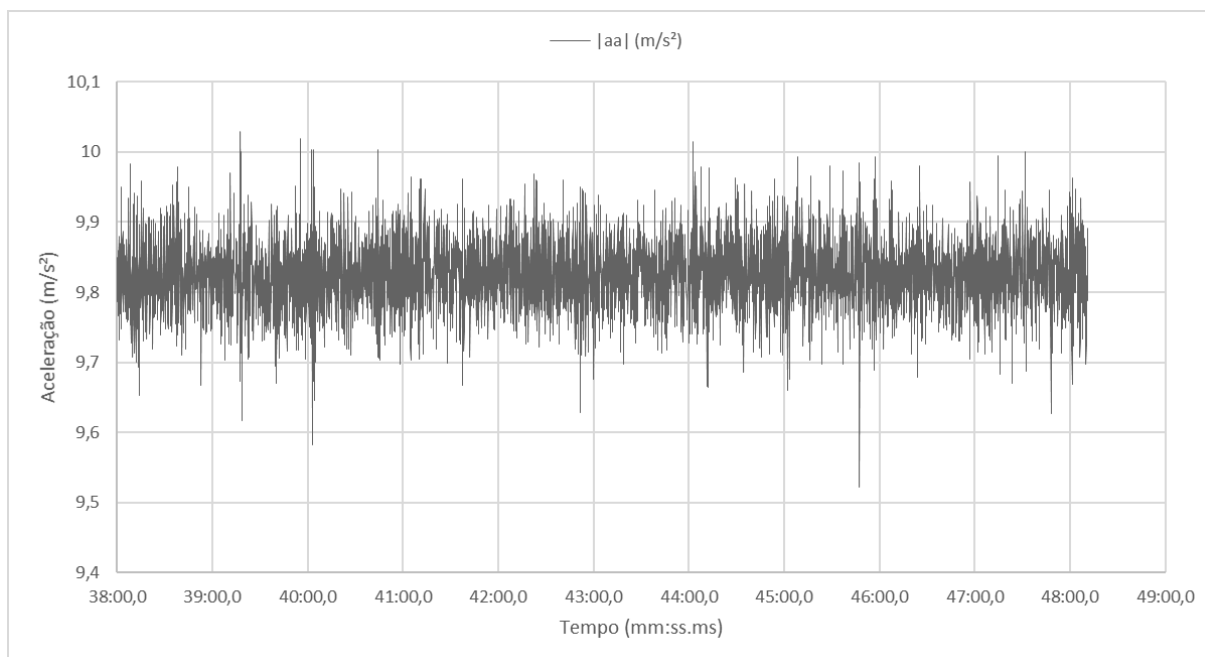
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 71 - Componente z da aceleração, coletado na ponte de veículos do estacionamento da Escola Politécnica.



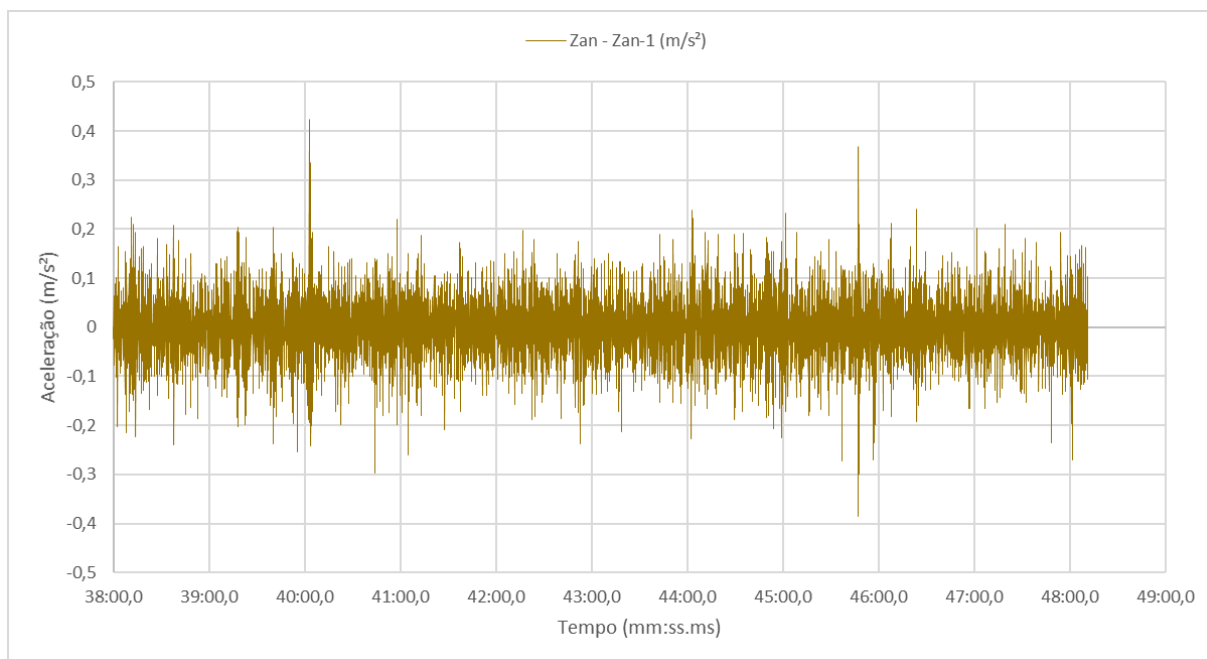
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 72 - Módulo da aceleração, coletado na ponte de veículos do estacionamento da Escola Politécnica.



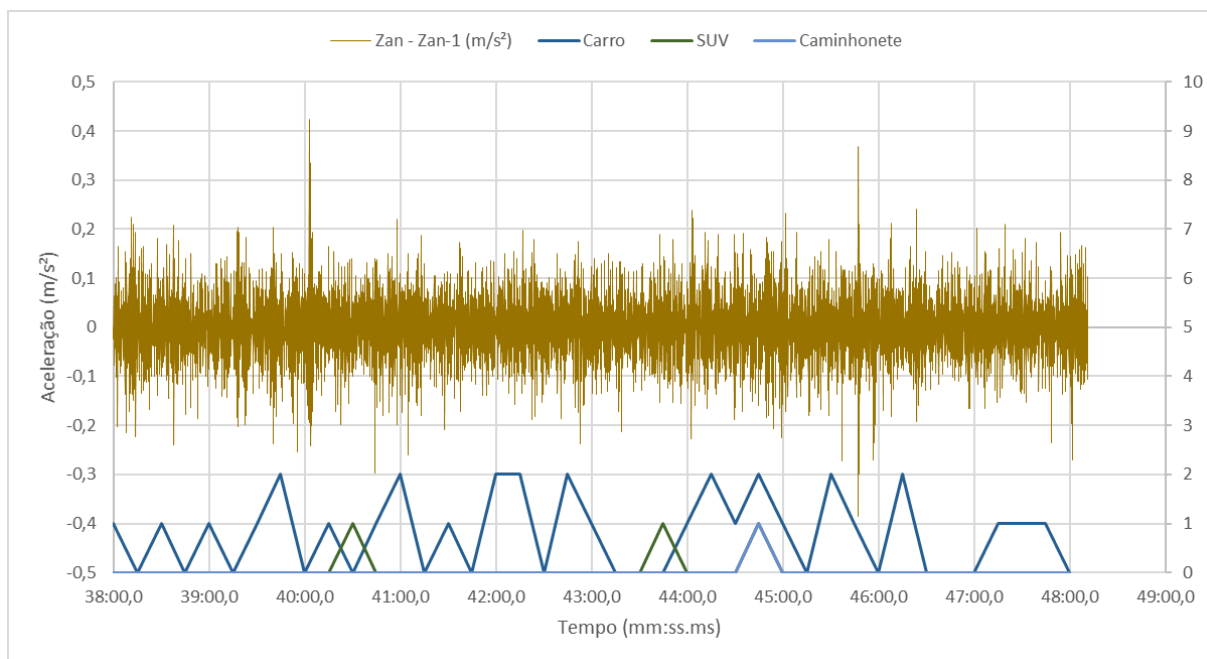
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 73 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na ponte de veículos do estacionamento da Escola Politécnica.



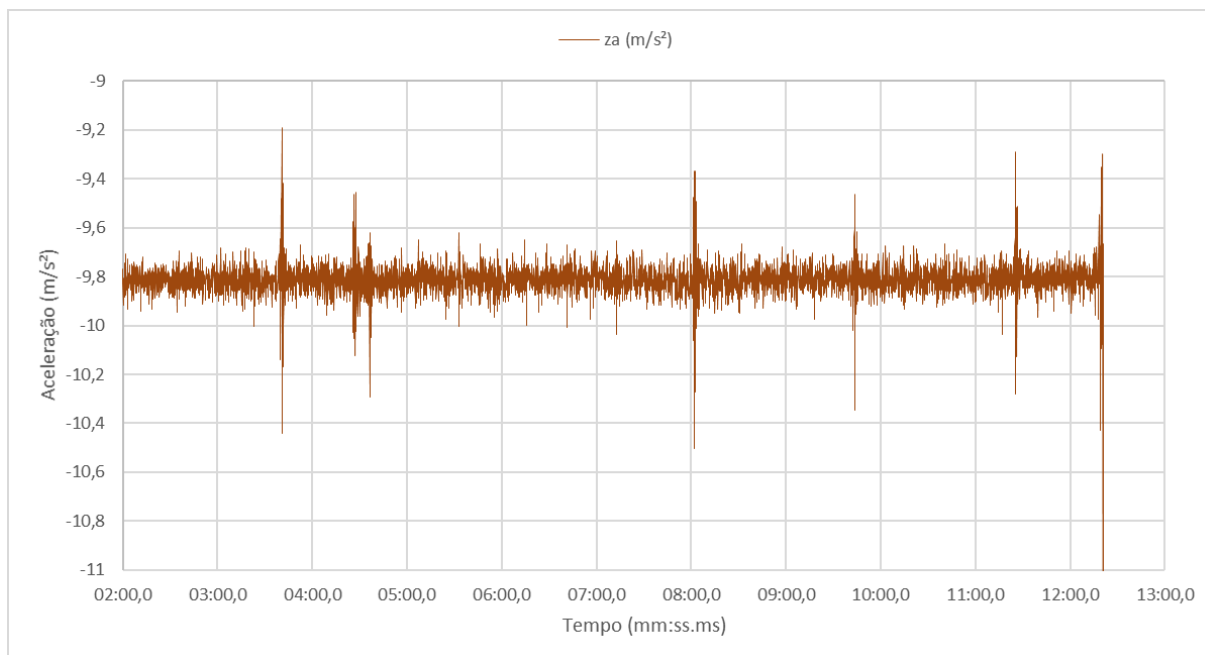
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 74 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na ponte de veículos do estacionamento da Escola Politécnica.



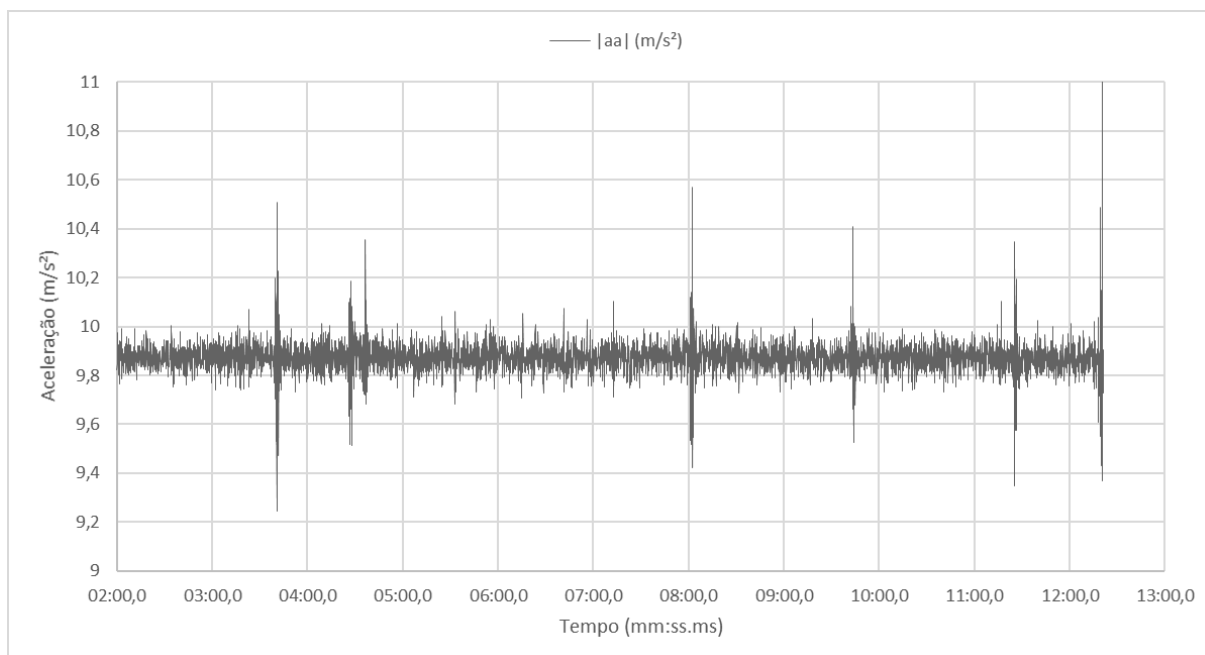
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 75 - Componente z da aceleração, coletado na ponte da Avenida Almeida Prado.

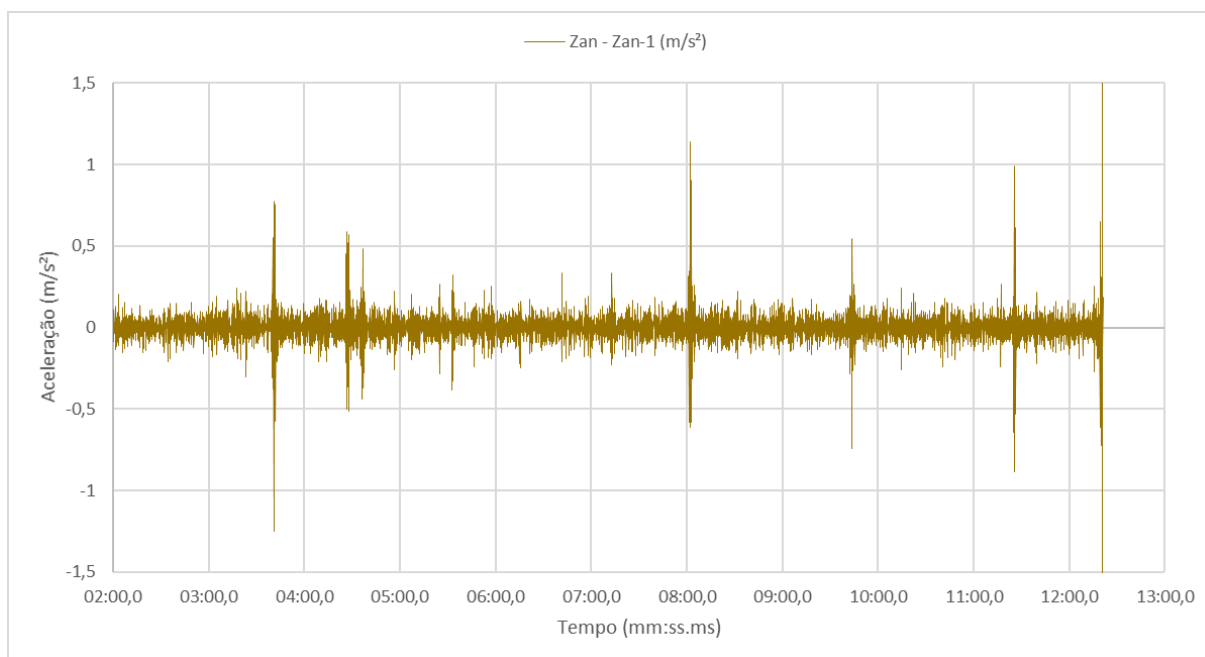


Fonte: Própria autoria (2019)

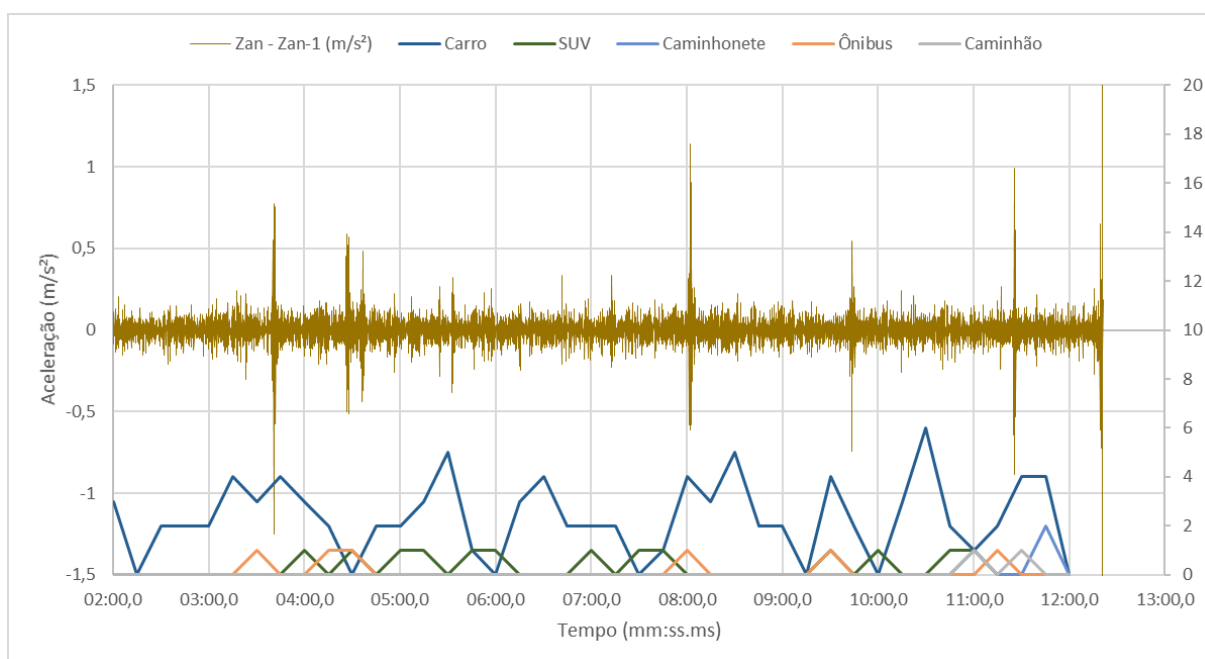
Gráfico 76 - Módulo da aceleração, coletado na ponte da Avenida Almeida Prado.



Fonte: Própria autoria (2019)

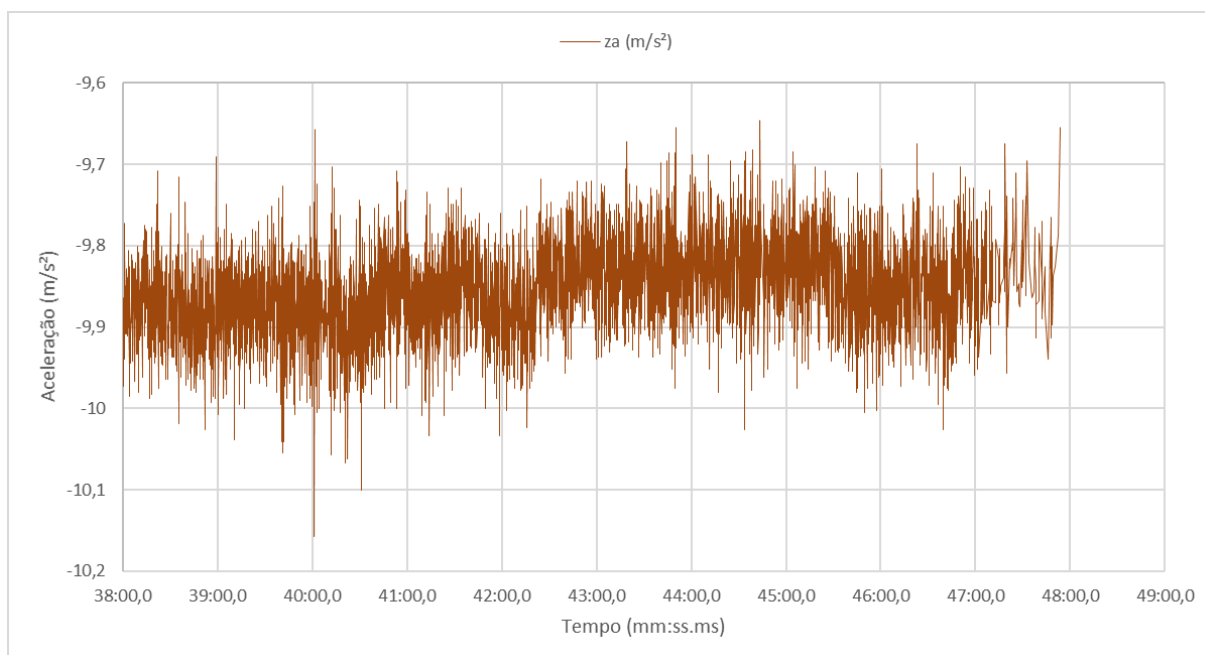
Gráfico 77 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na ponte da Avenida Almeida Prado.

Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 78 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na ponte da Avenida Almeida Prado.

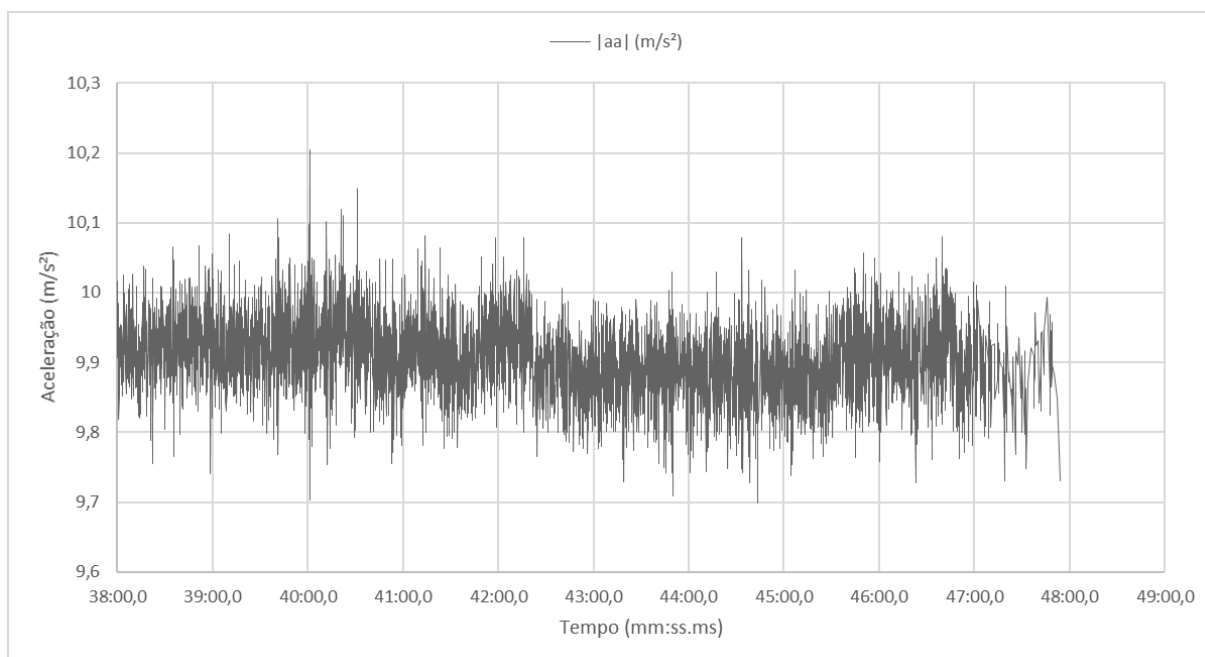
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 79 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A.

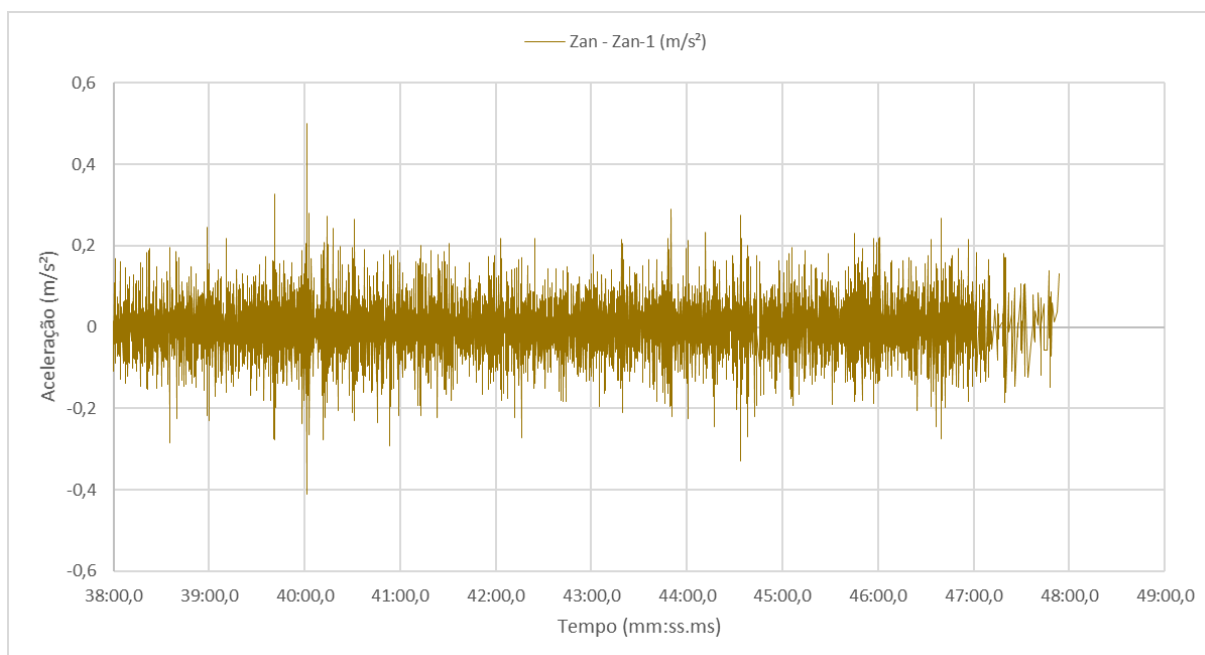


Fonte: Própria autoria (2019)

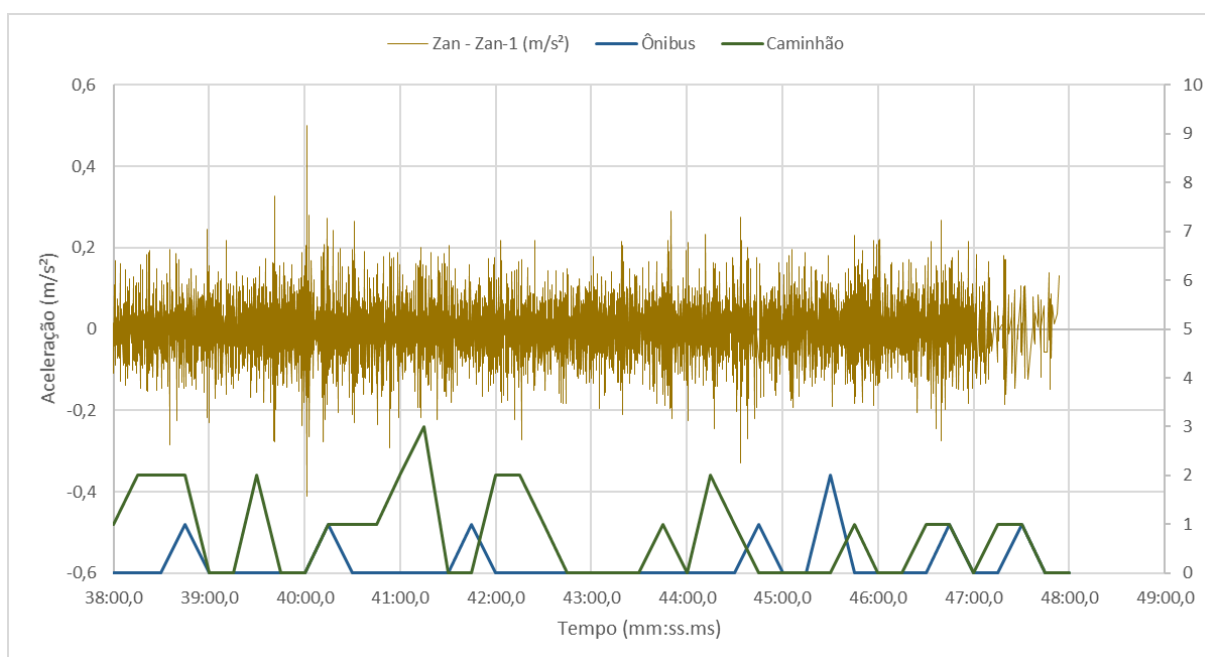
Gráfico 80 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A.



Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 81 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A.

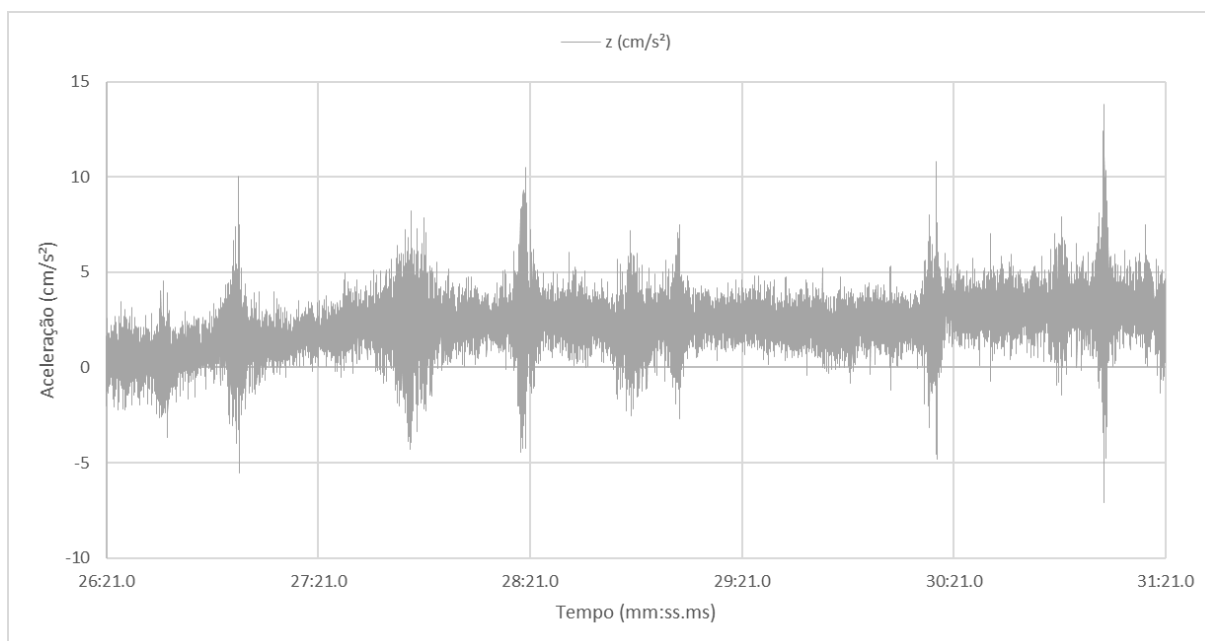
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 82 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A.

Fonte: Própria autoria (2019)

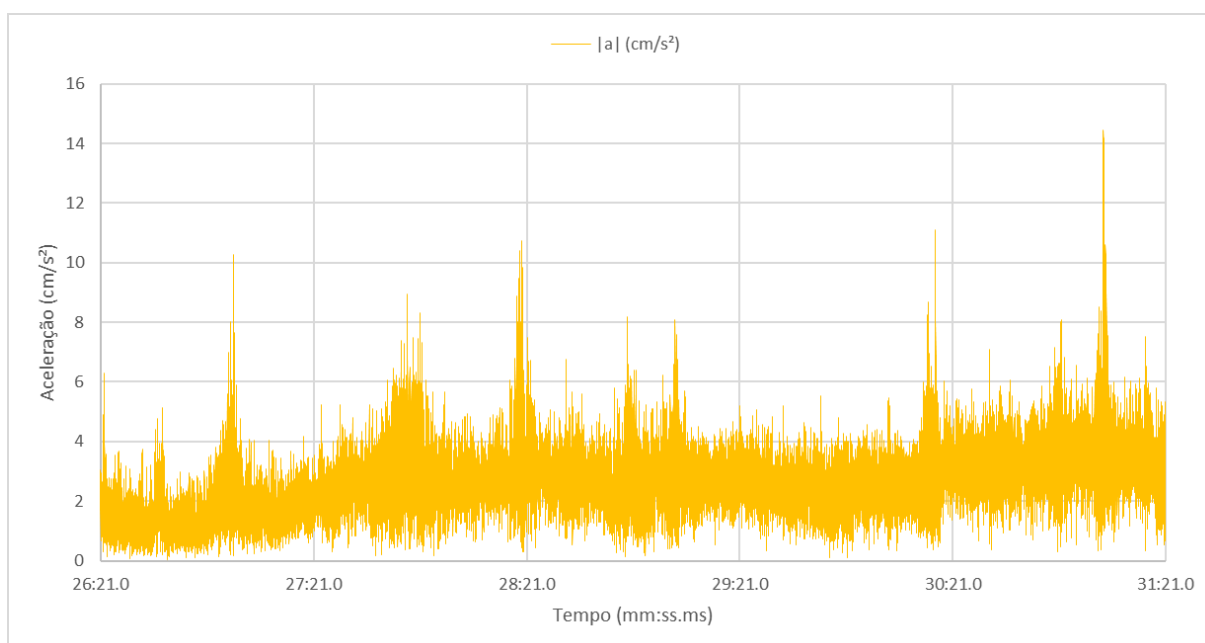
APÊNDICE C – GRÁFICOS ELABORADOS COM OS DADOS DO CELULAR (F=100Hz)

Gráfico 83 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A, amostra 1.

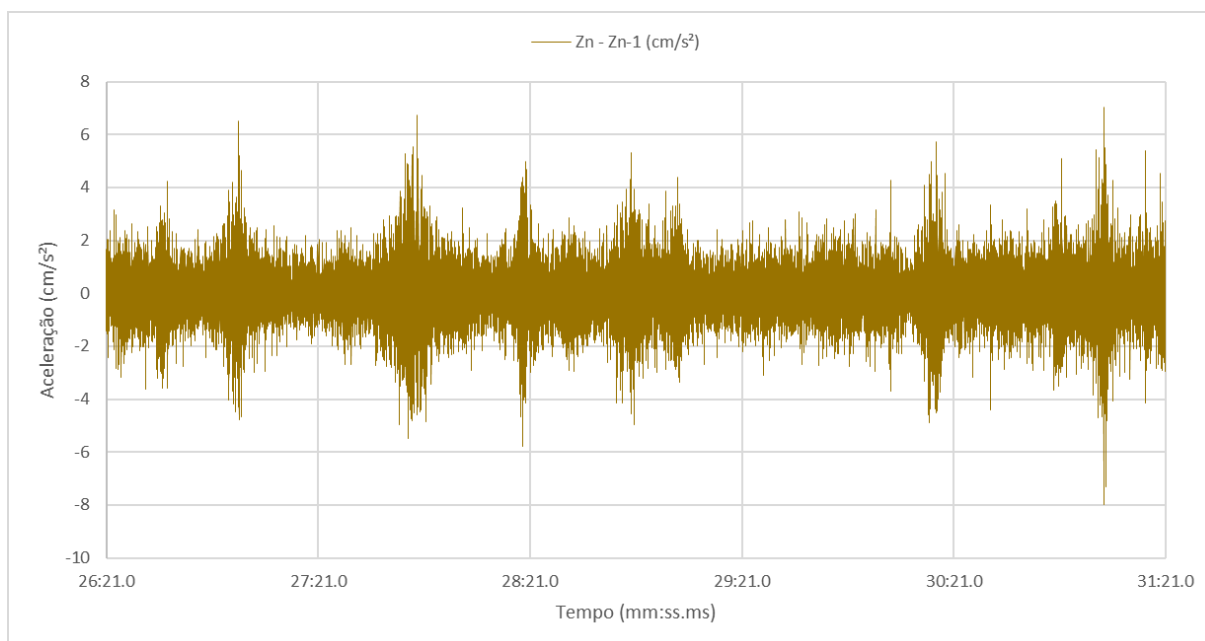


Fonte: Própria autoria (2019)

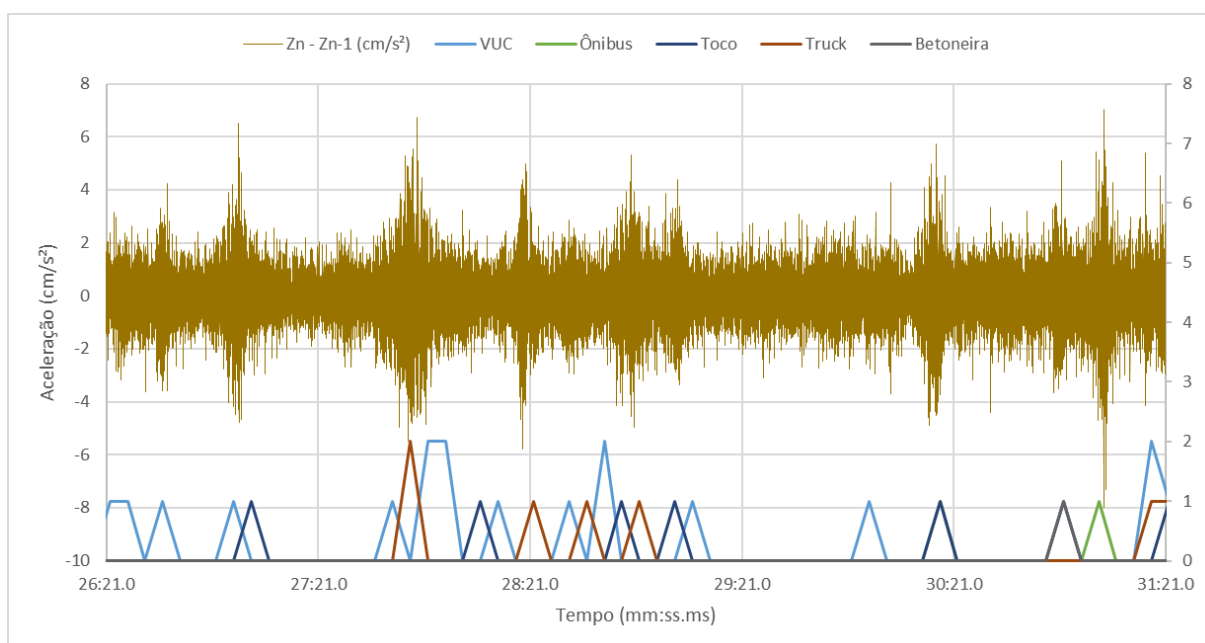
Gráfico 84 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A, amostra 1.



Fonte: Própria autoria (2019)

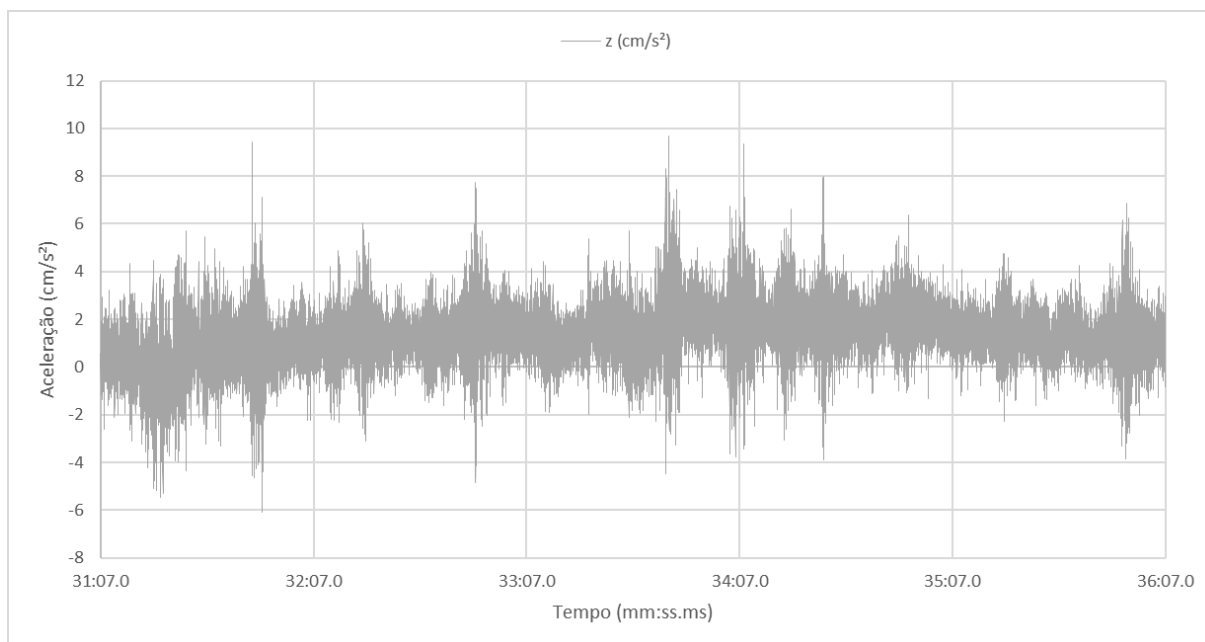
Gráfico 85 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A, amostra 1.

Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 86 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A, amostra 1.

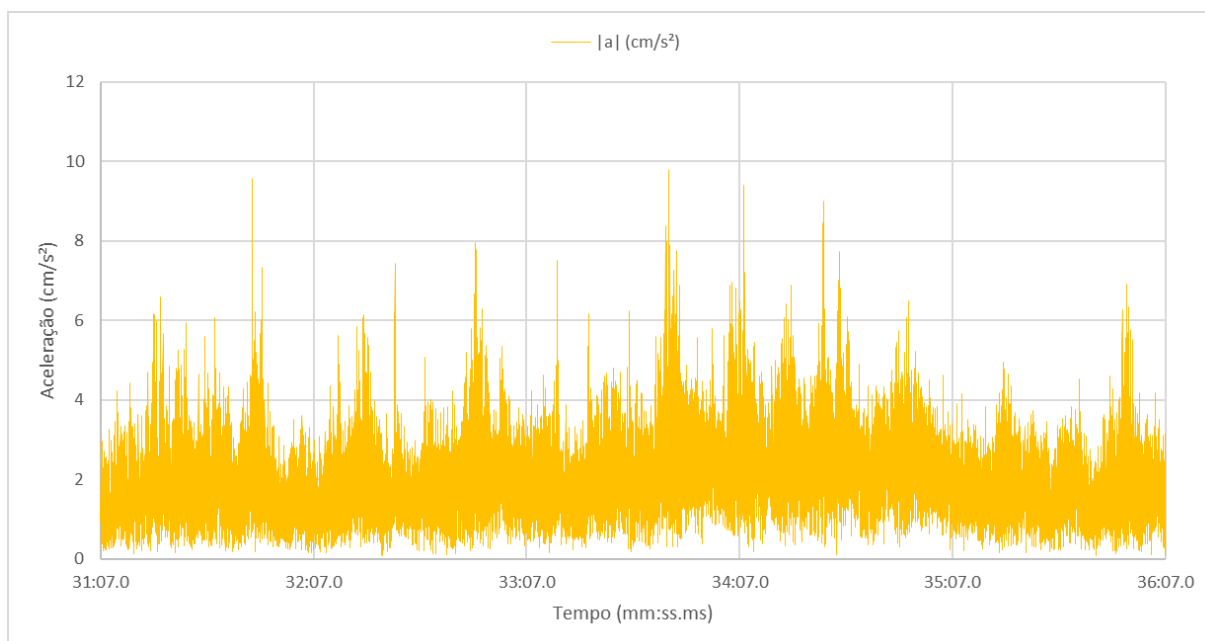
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 87 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A, amostra 2.



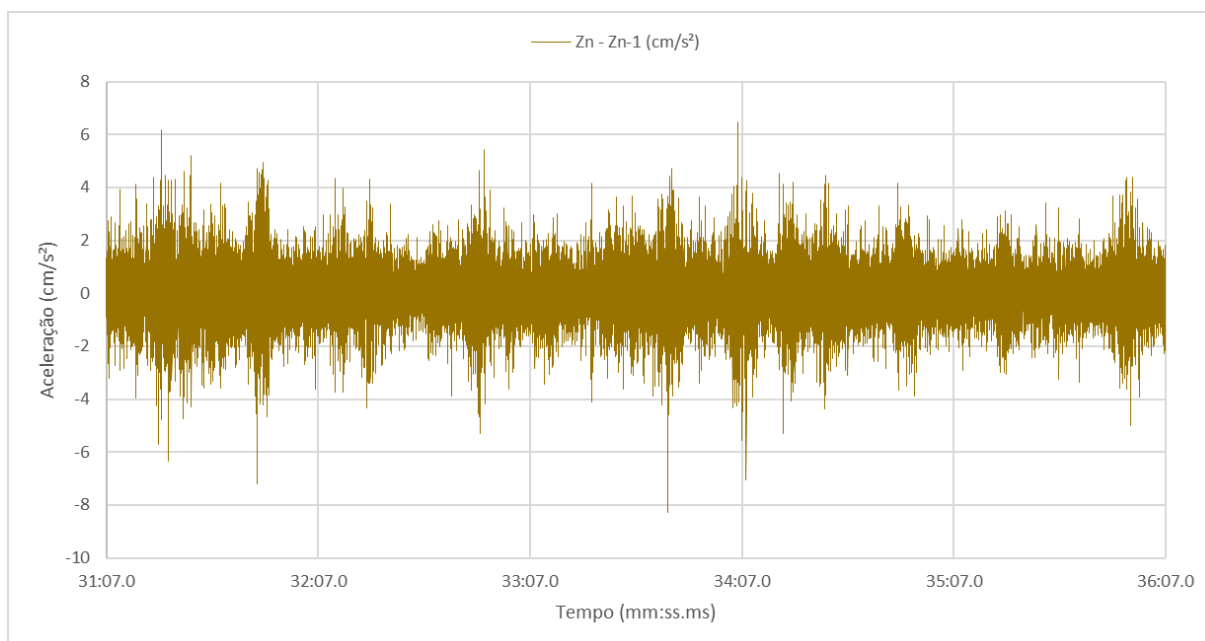
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 88 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A, amostra 2.



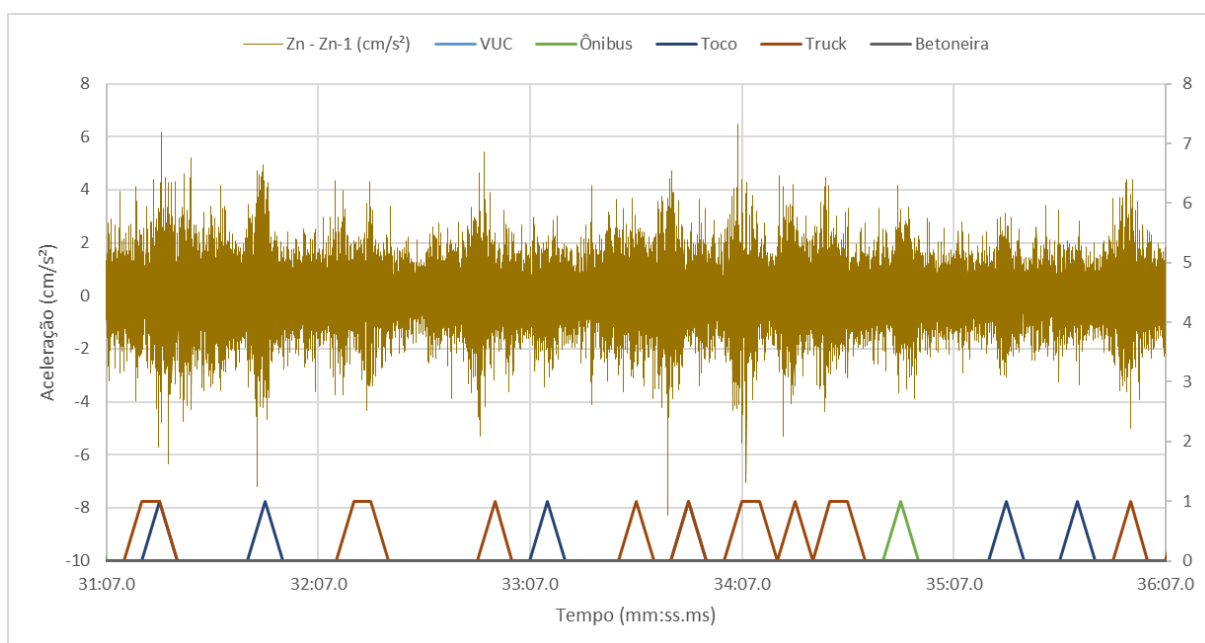
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 89 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A, amostra 2.



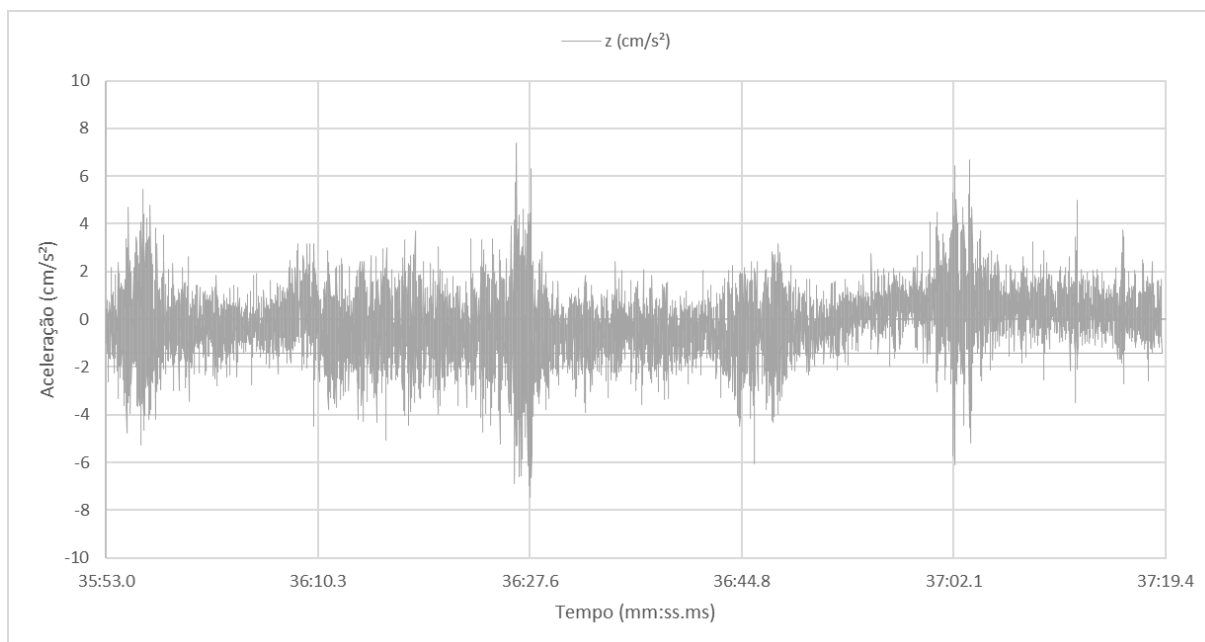
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 90 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A, amostra 2.



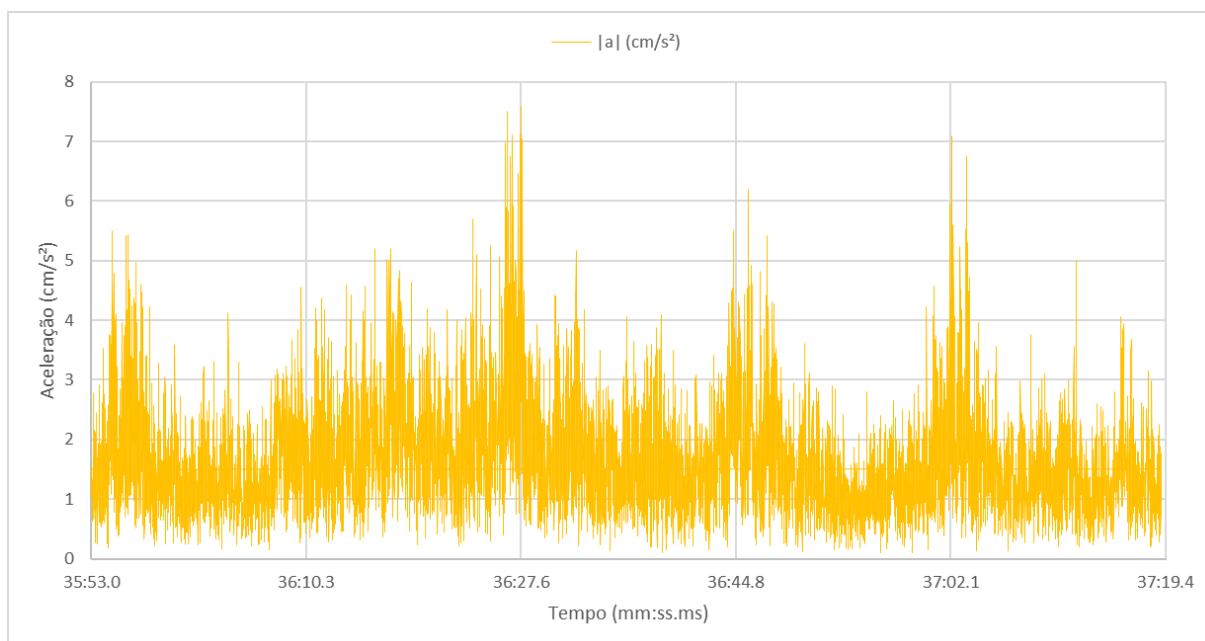
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 91 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A, amostra 3.



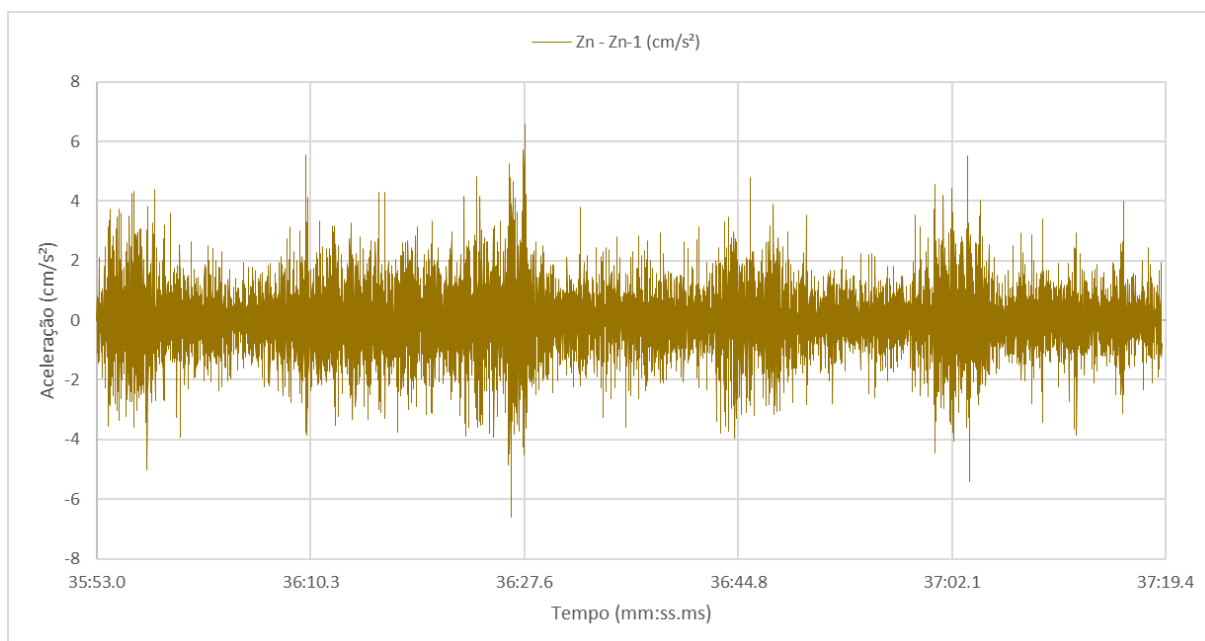
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 92 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A, amostra 3.



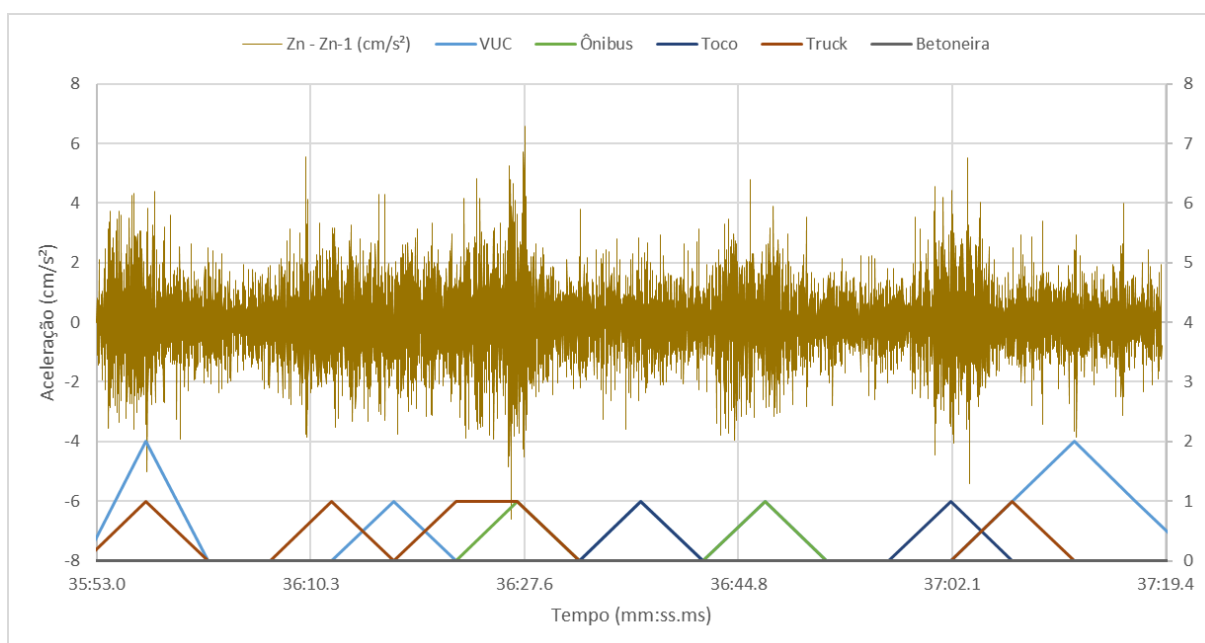
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 93 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A, amostra 3.



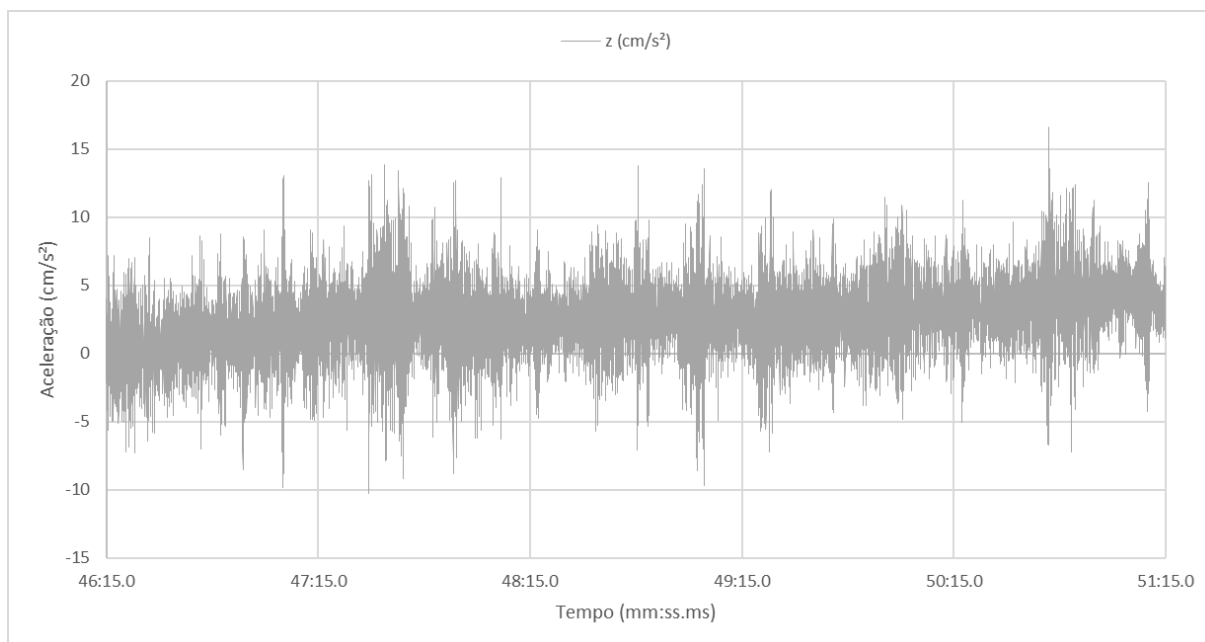
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 94 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A, amostra 3.



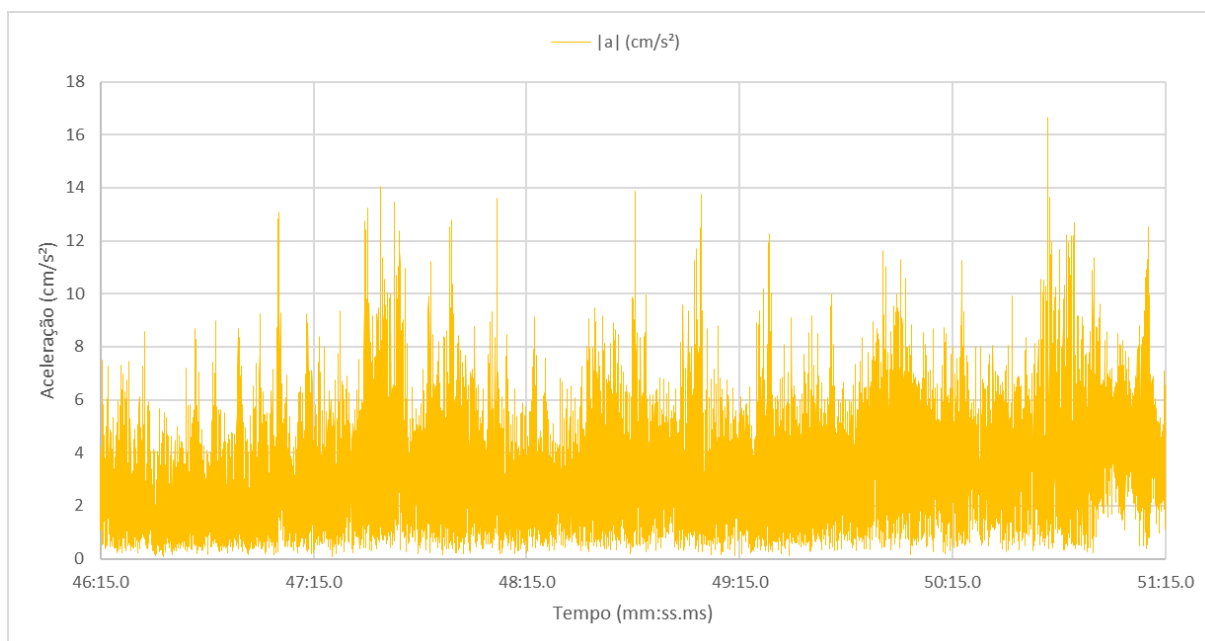
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 95 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B, amostra 1.



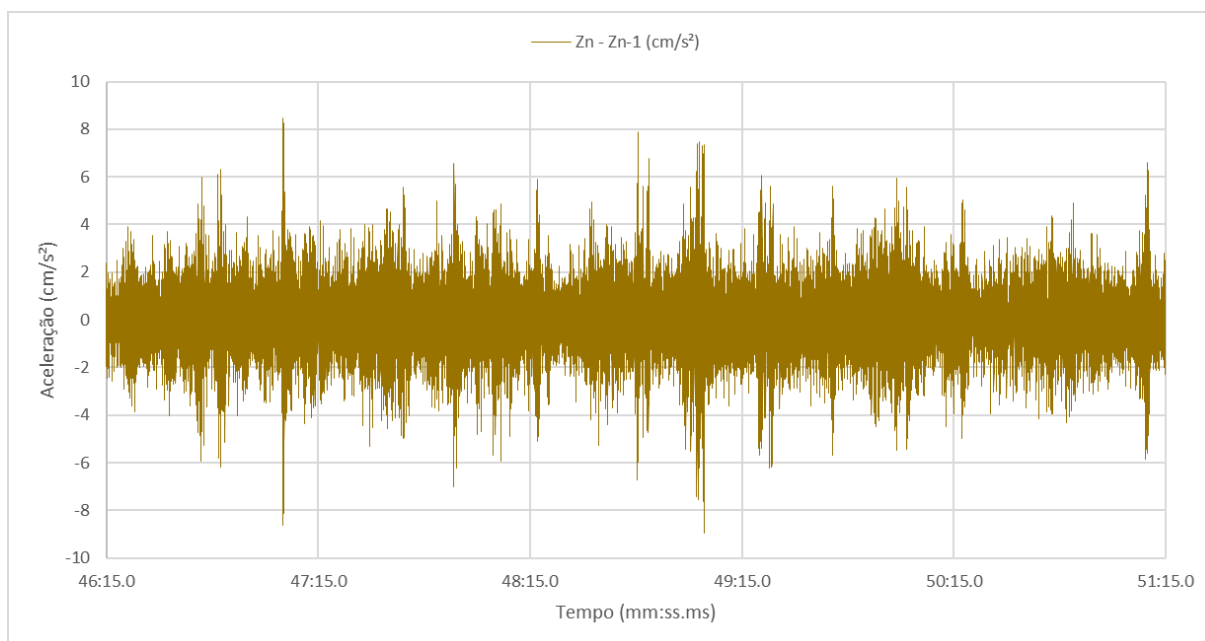
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 96 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B, amostra 1.



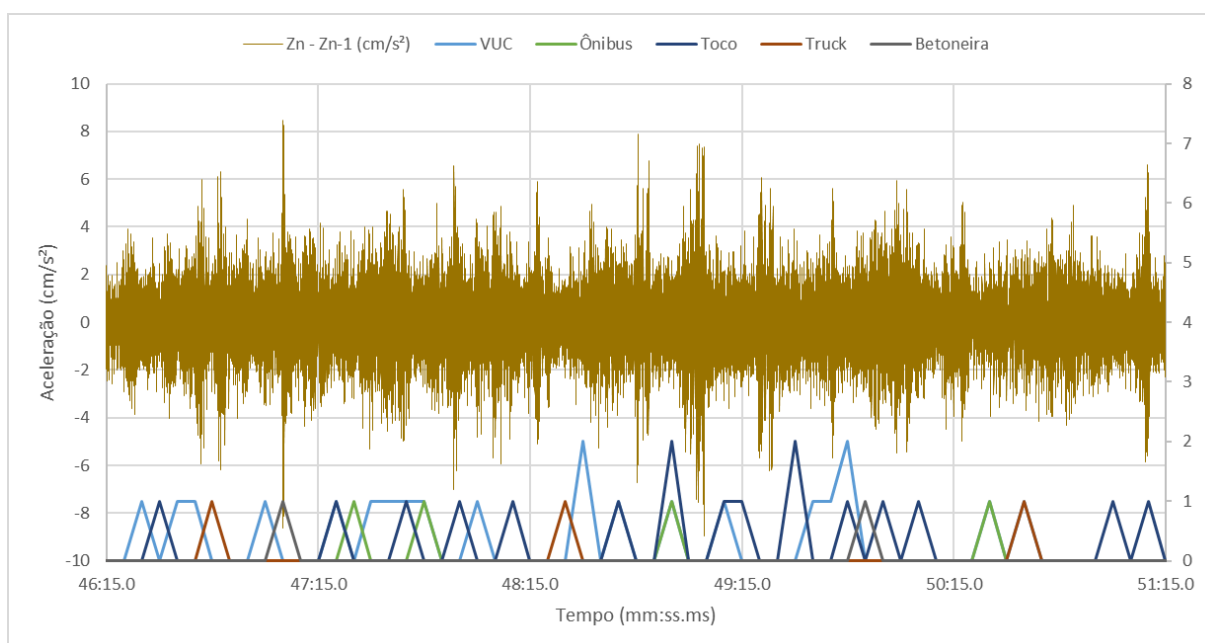
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 97 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B, amostra 1.



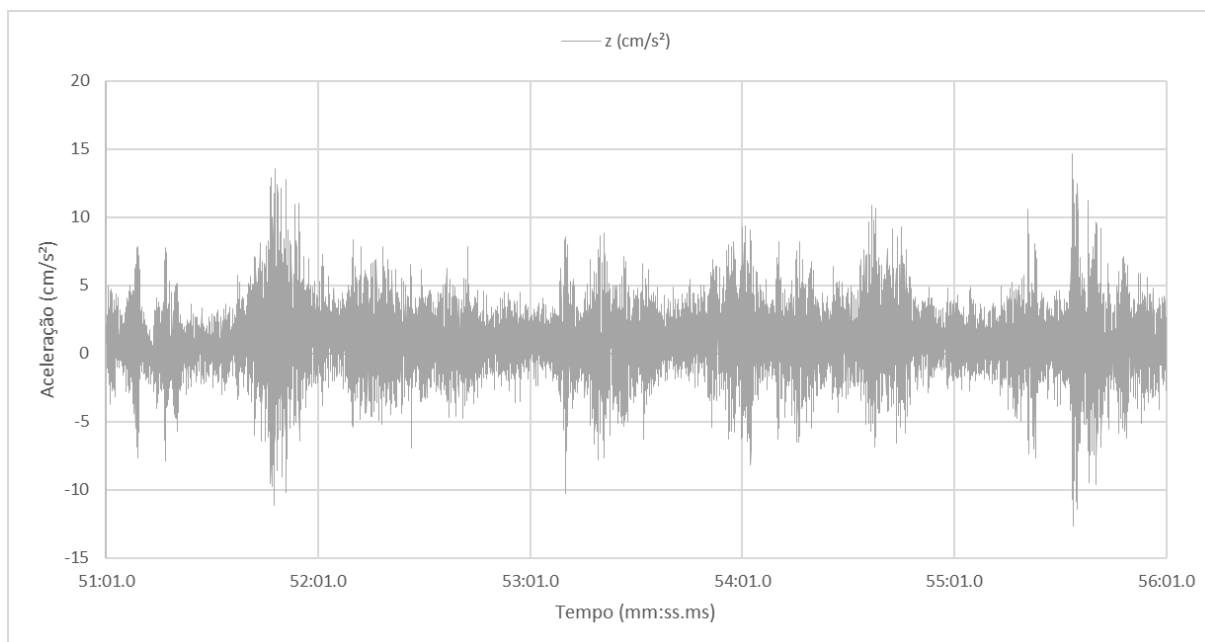
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 98 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B, amostra 1.



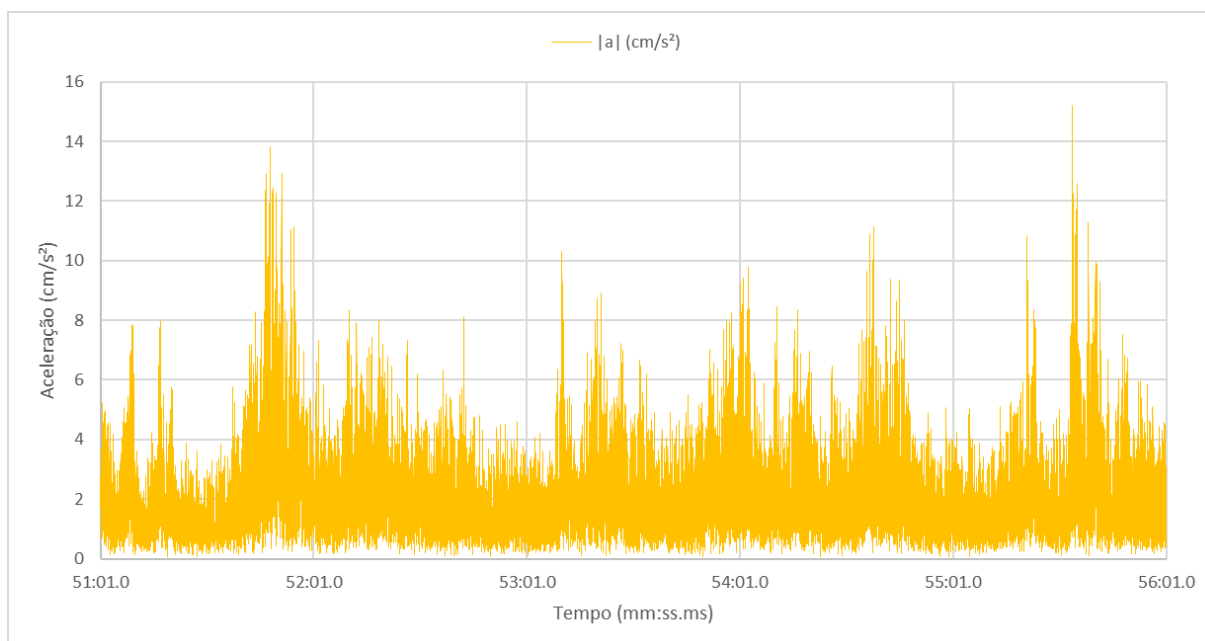
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 99 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B, amostra 2.

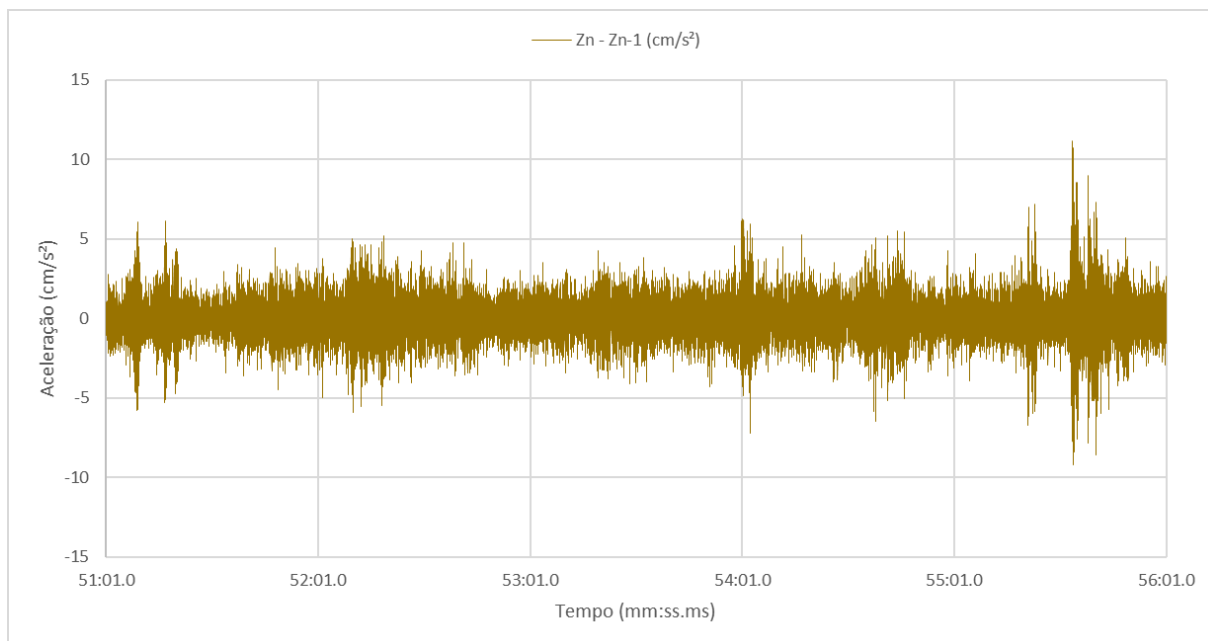


Fonte: Própria autoria (2019)

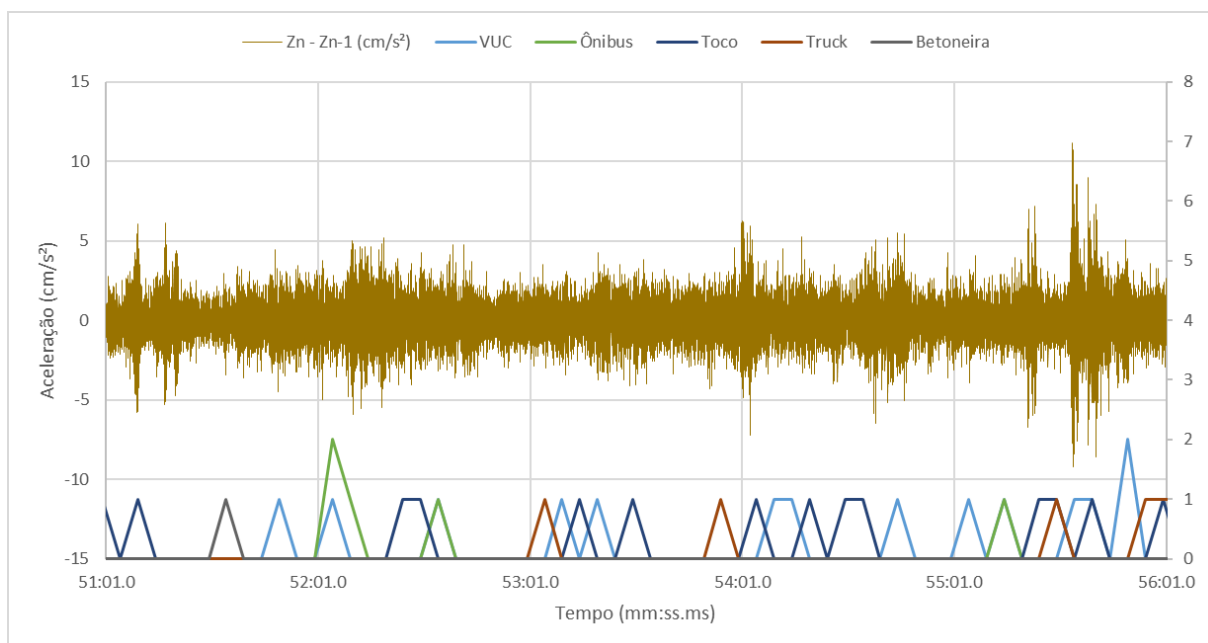
Gráfico 100 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B, amostra 2.



Fonte: Própria autoria (2019)

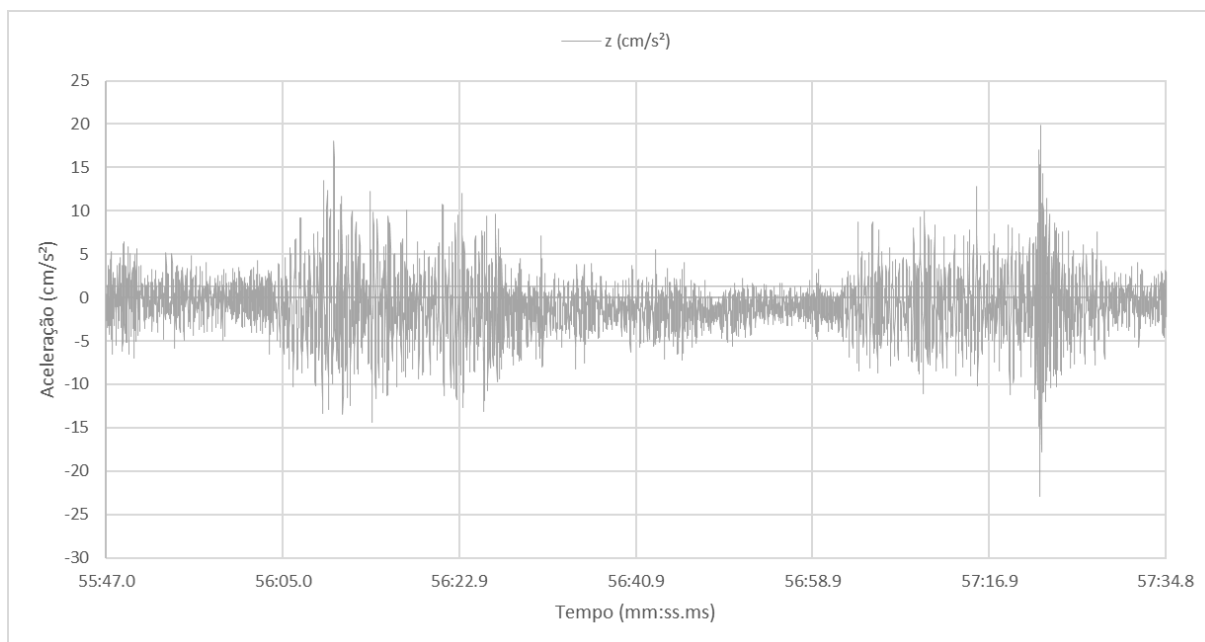
Gráfico 101 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B, amostra 2.

Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 102 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B, amostra 2.

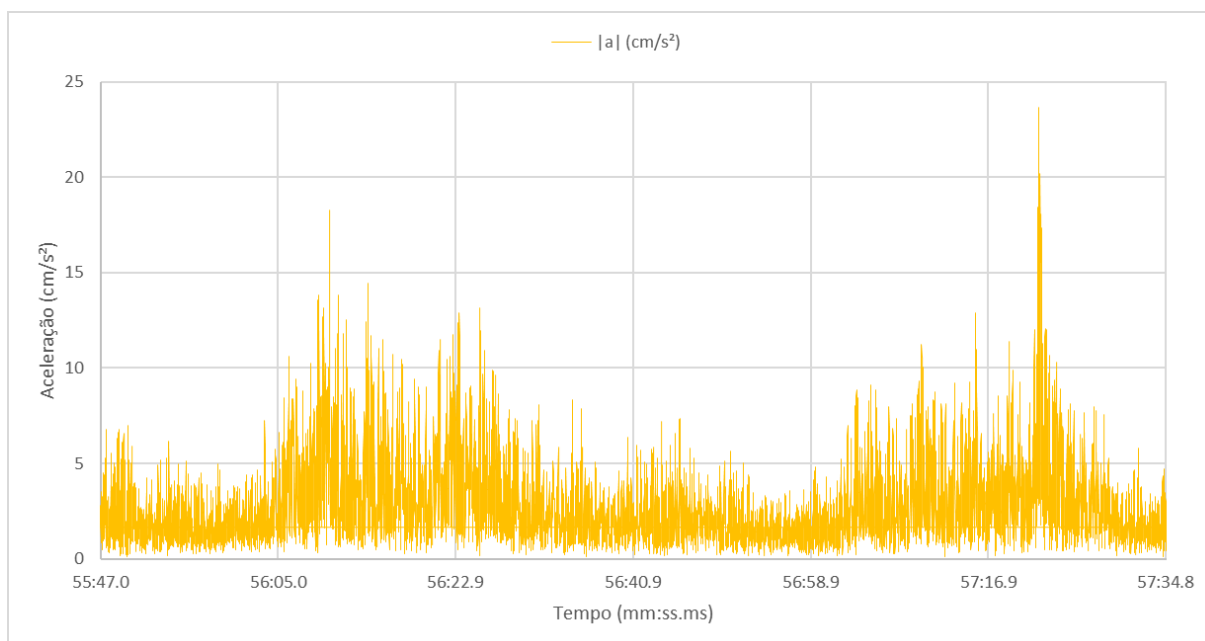
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 103 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B, amostra 3.

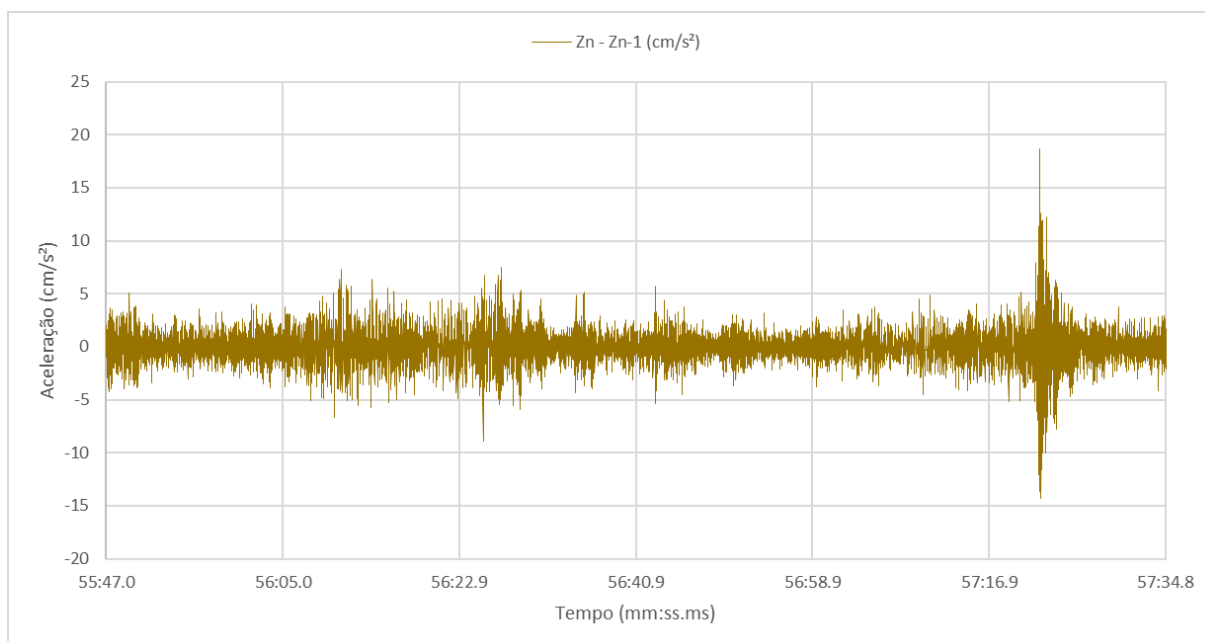


Fonte: Própria autoria (2019)

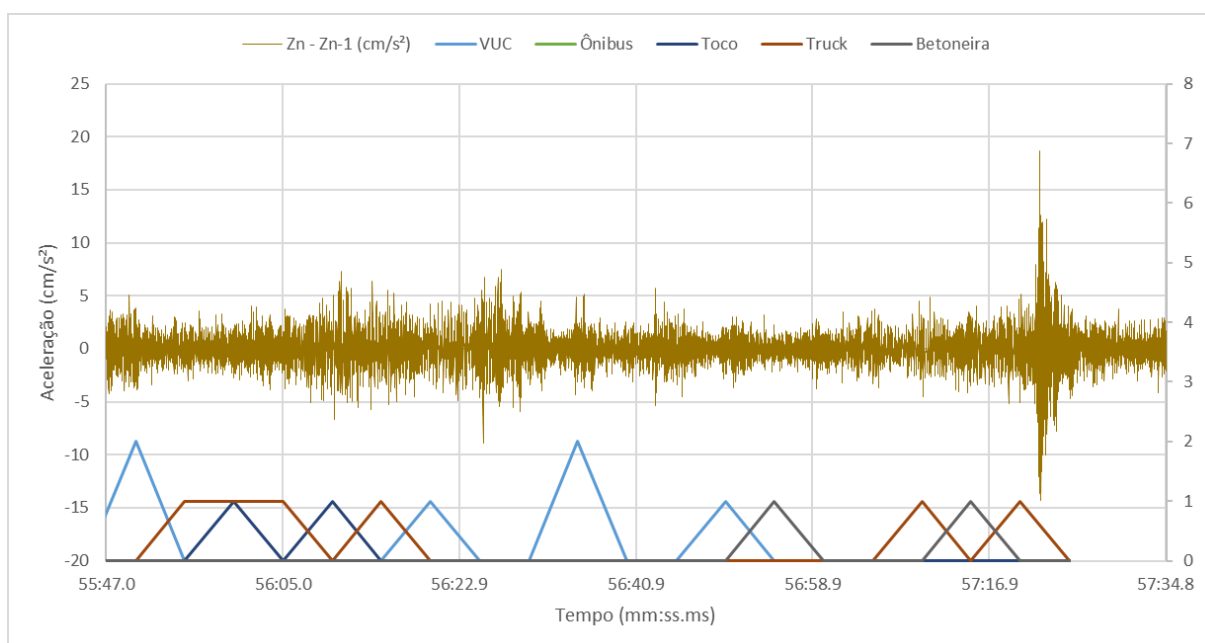
Gráfico 104 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B, amostra 3.



Fonte: Própria autoria (2019)

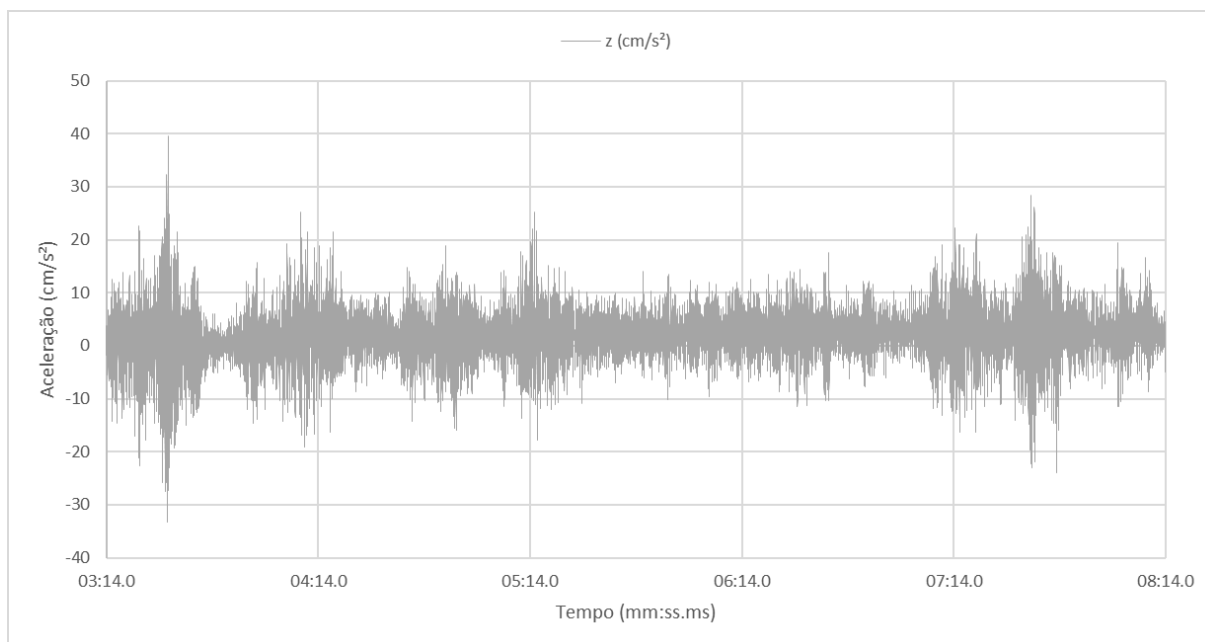
Gráfico 105 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B, amostra 3.

Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 106 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B, amostra 3.

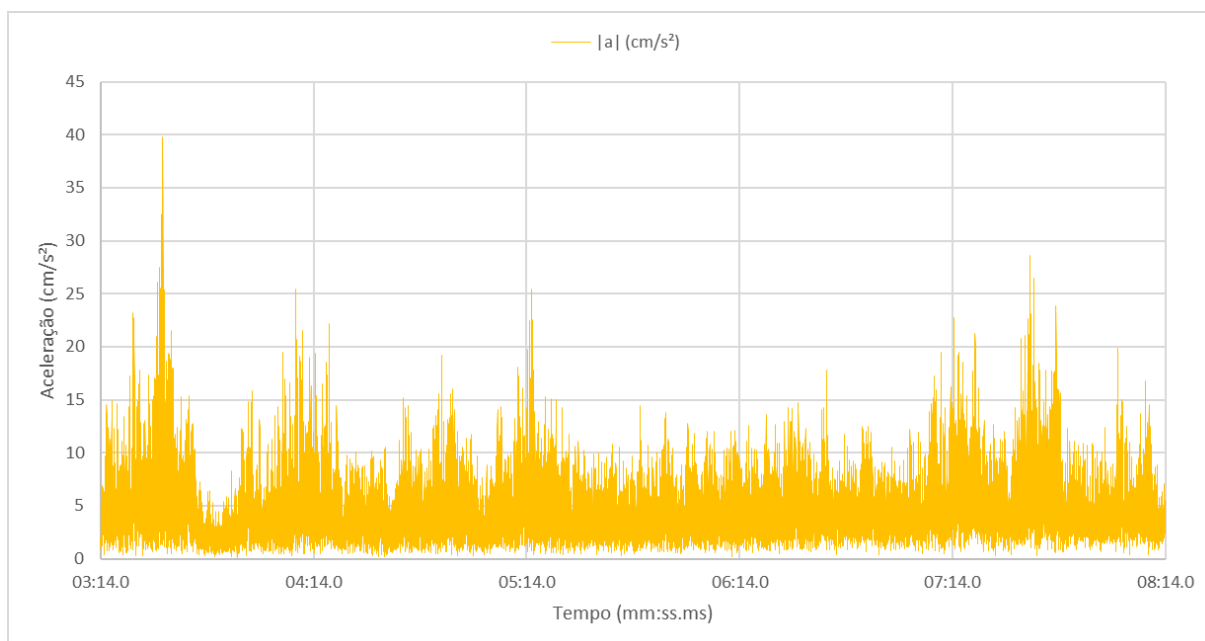
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 107 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 1.



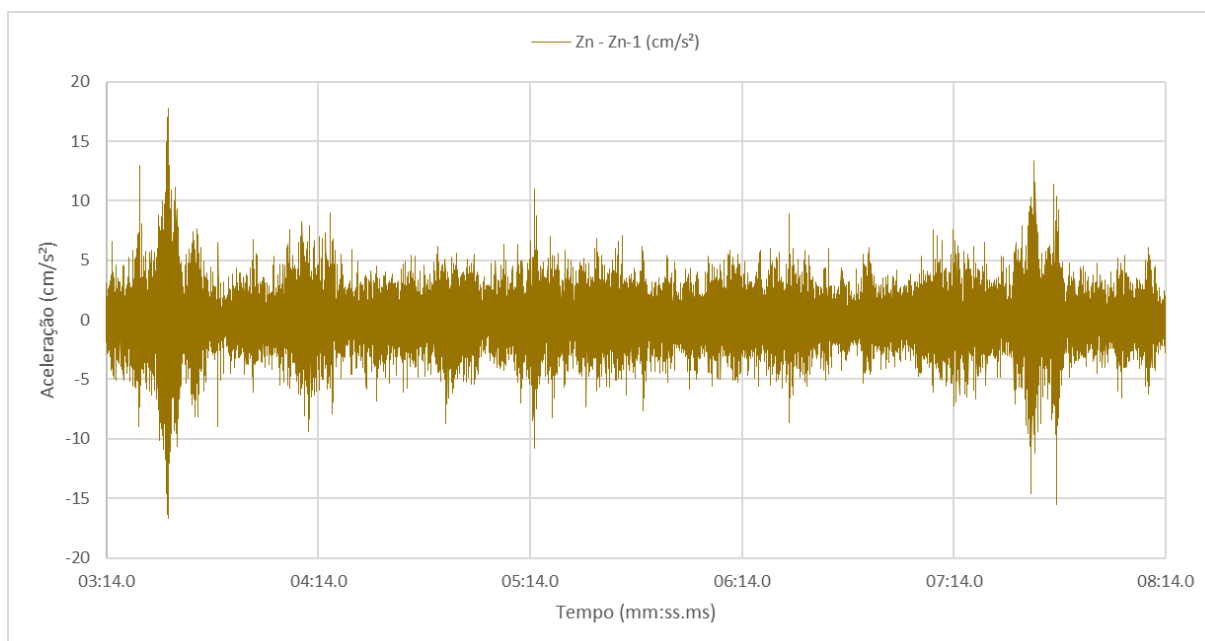
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 108 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 1.



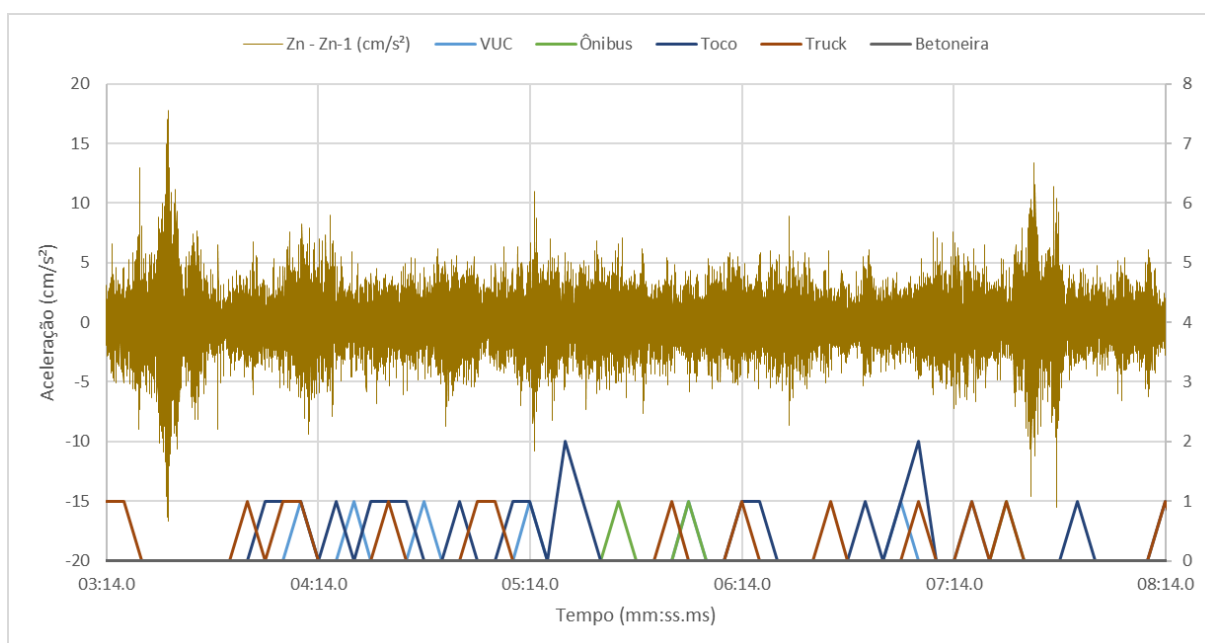
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 109 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 1.



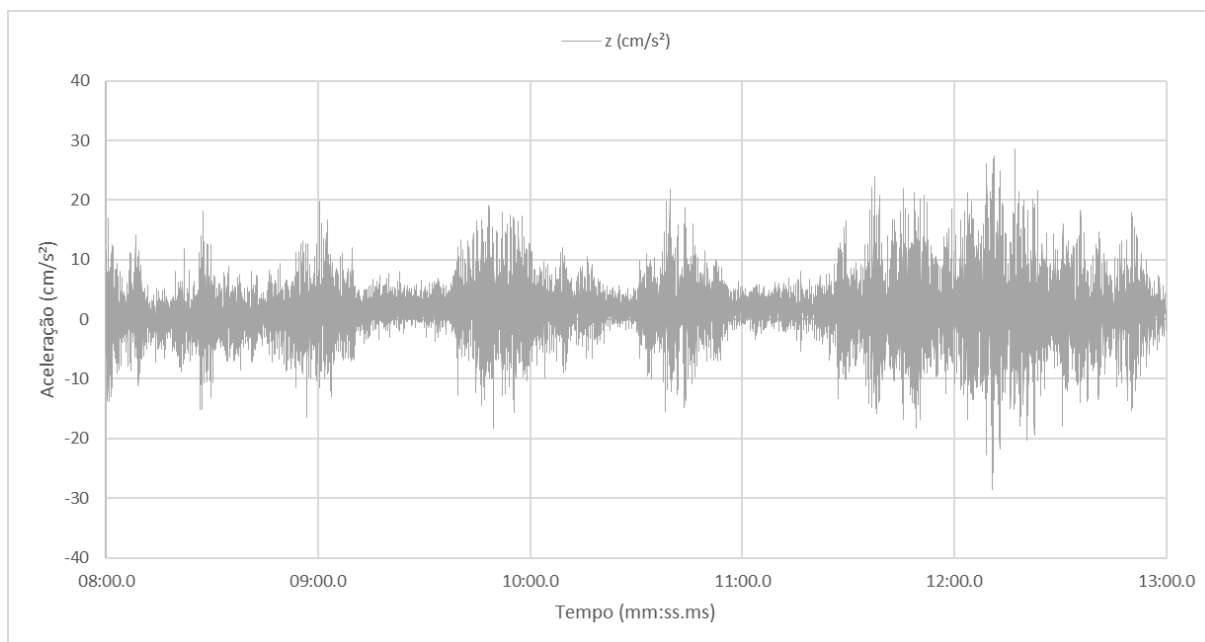
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 110 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 1.



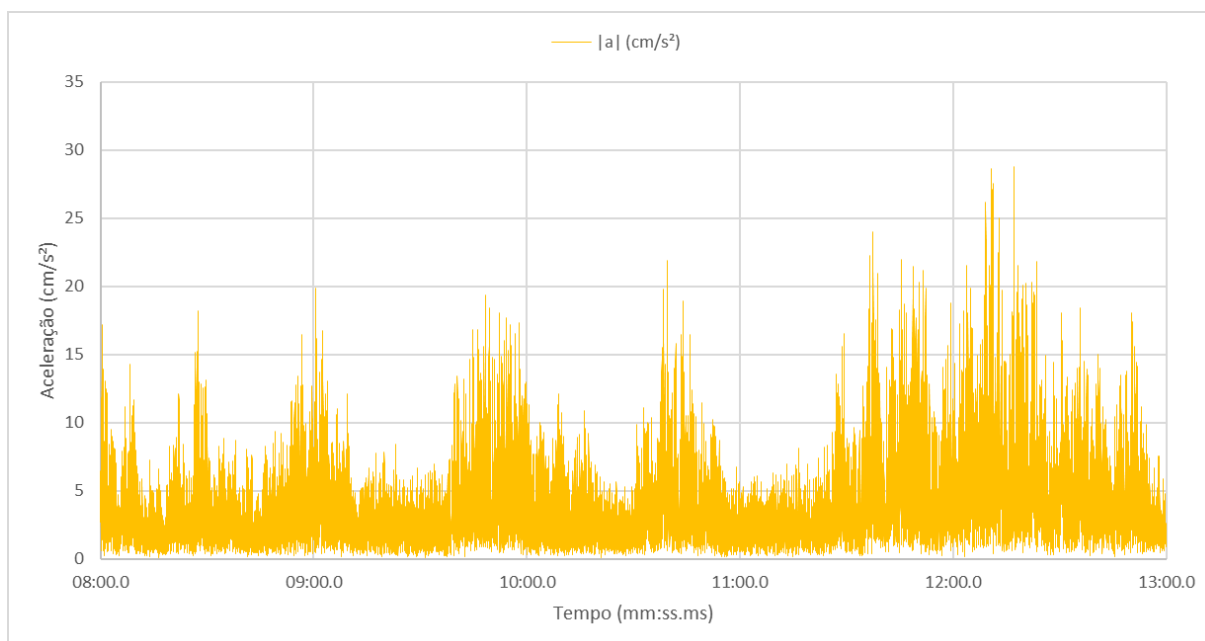
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 111 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 2.

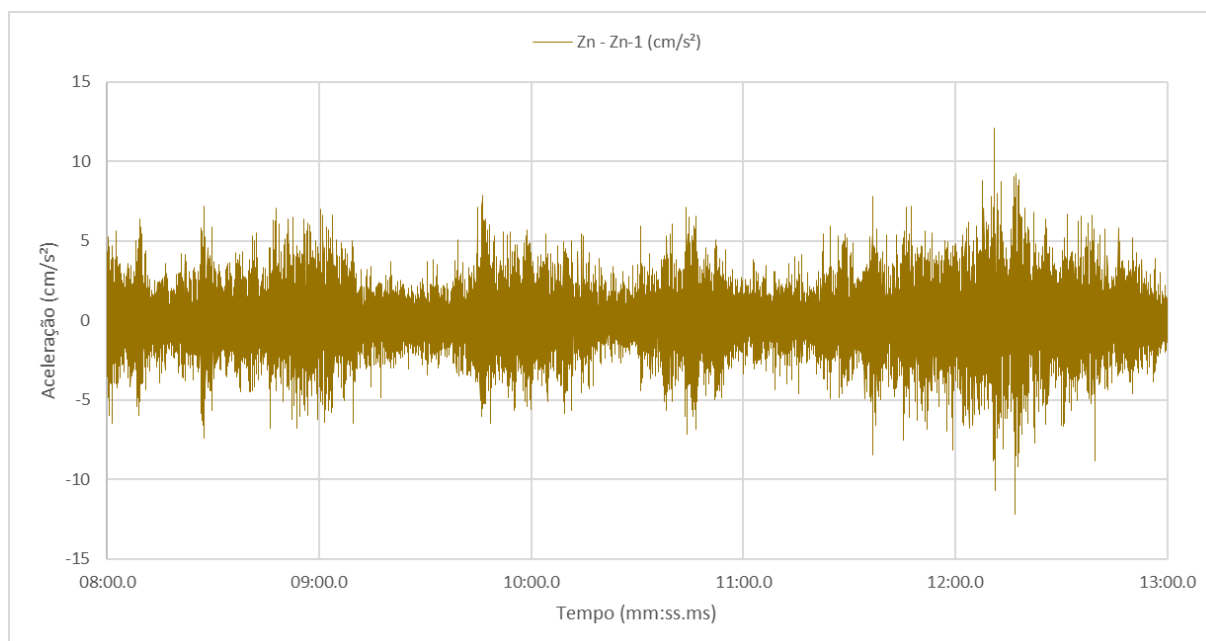


Fonte: Própria autoria (2019)

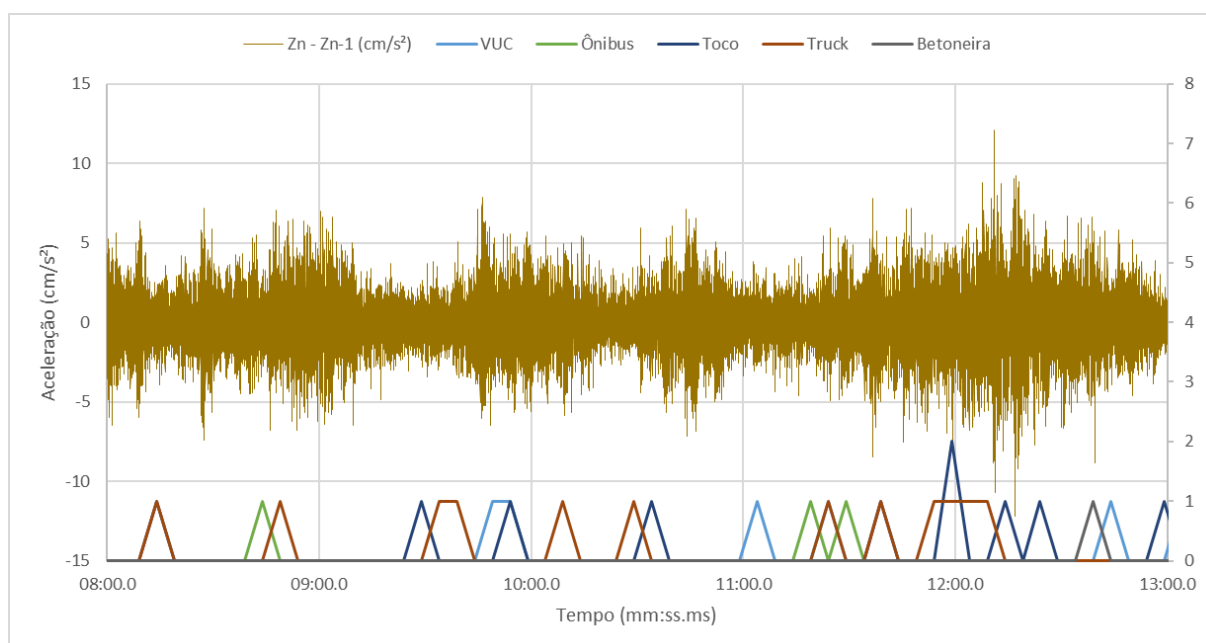
Gráfico 112 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 2.



Fonte: Própria autoria (2019)

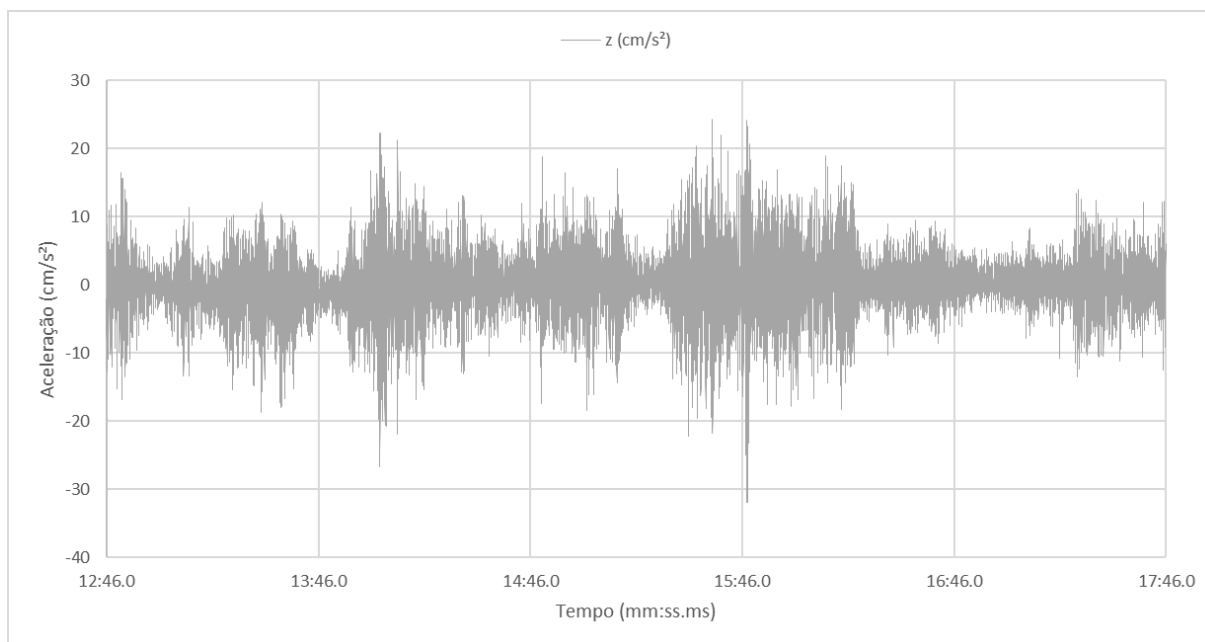
Gráfico 113 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 2.

Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 114 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 2.

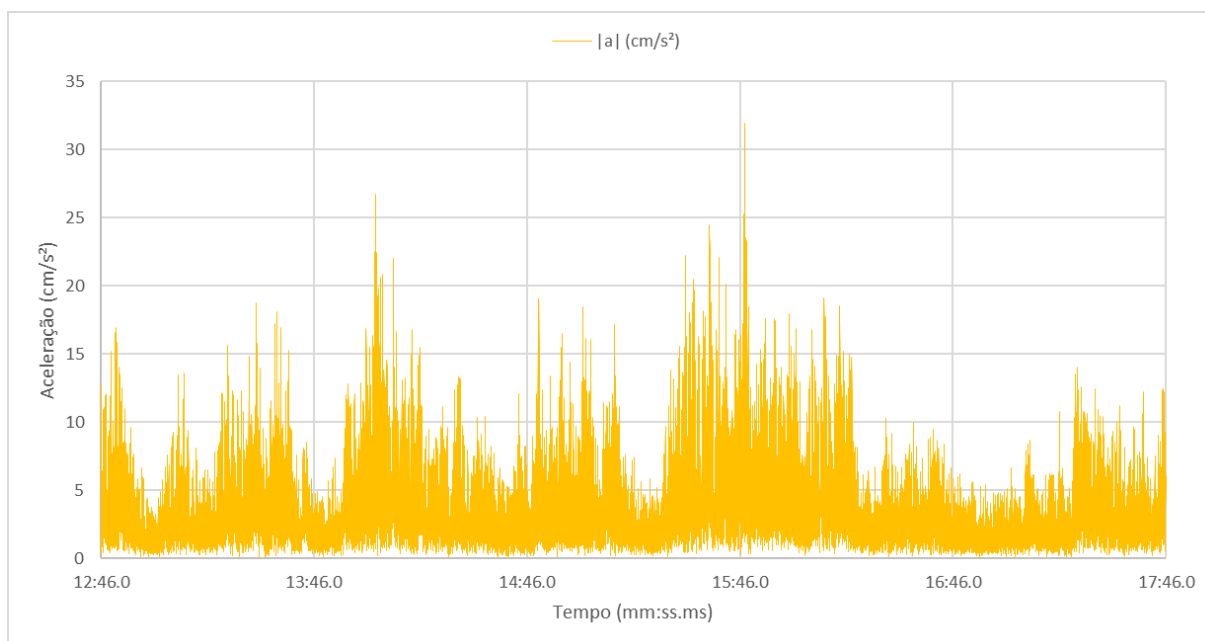
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 115 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 3.



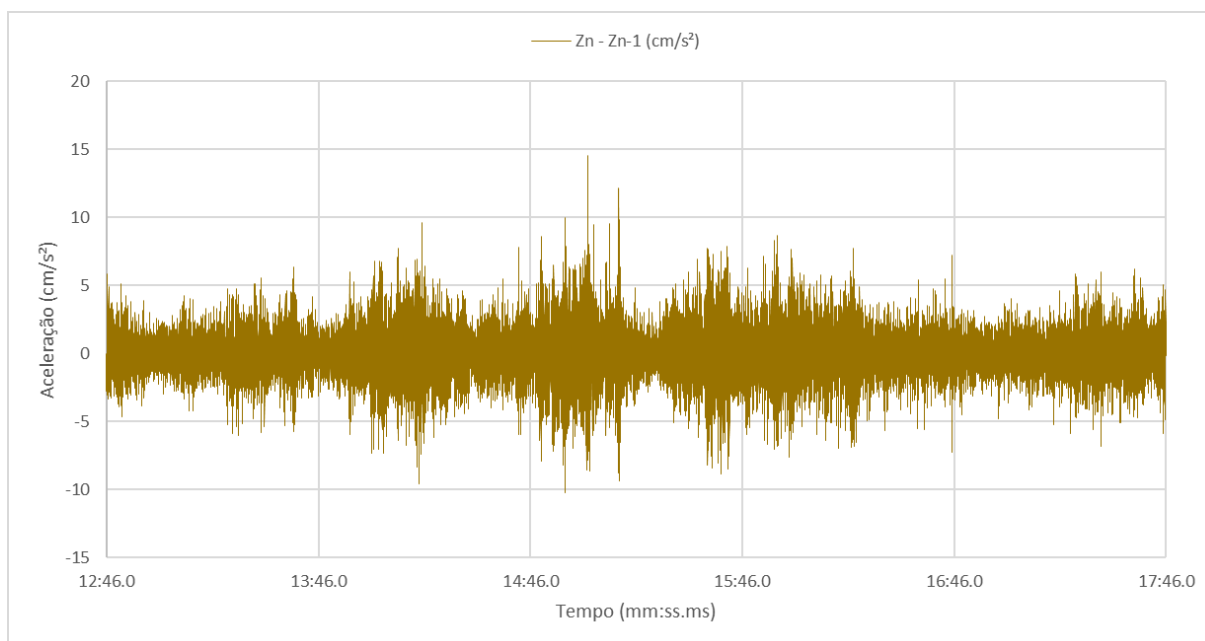
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 116 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 3.



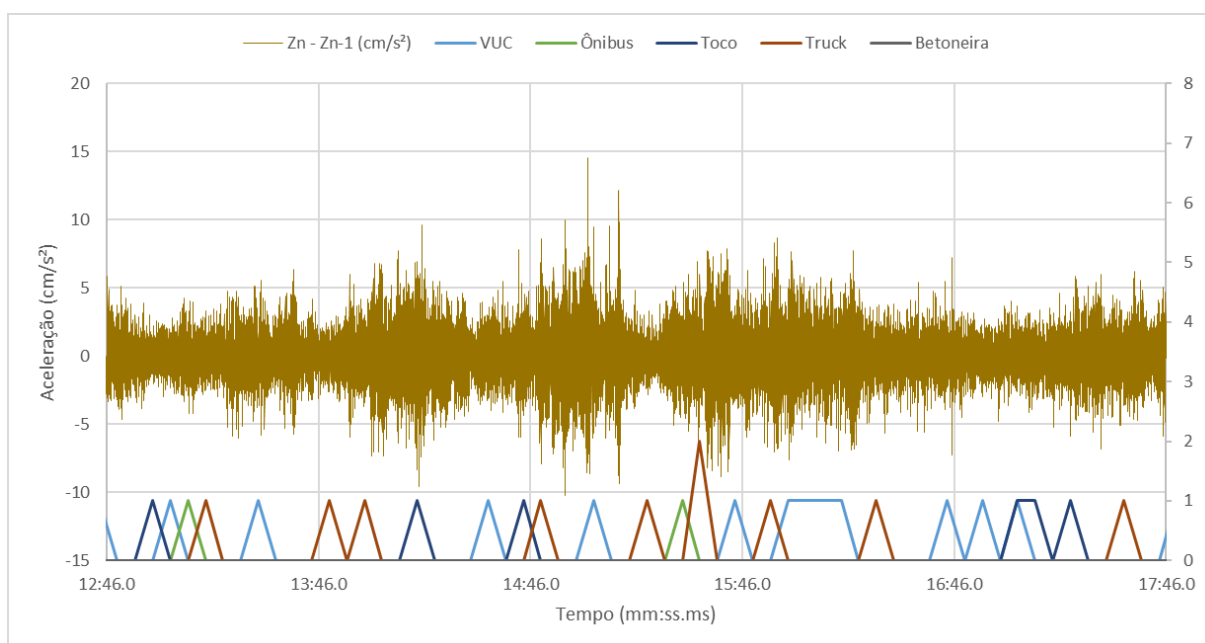
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 117 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 3.



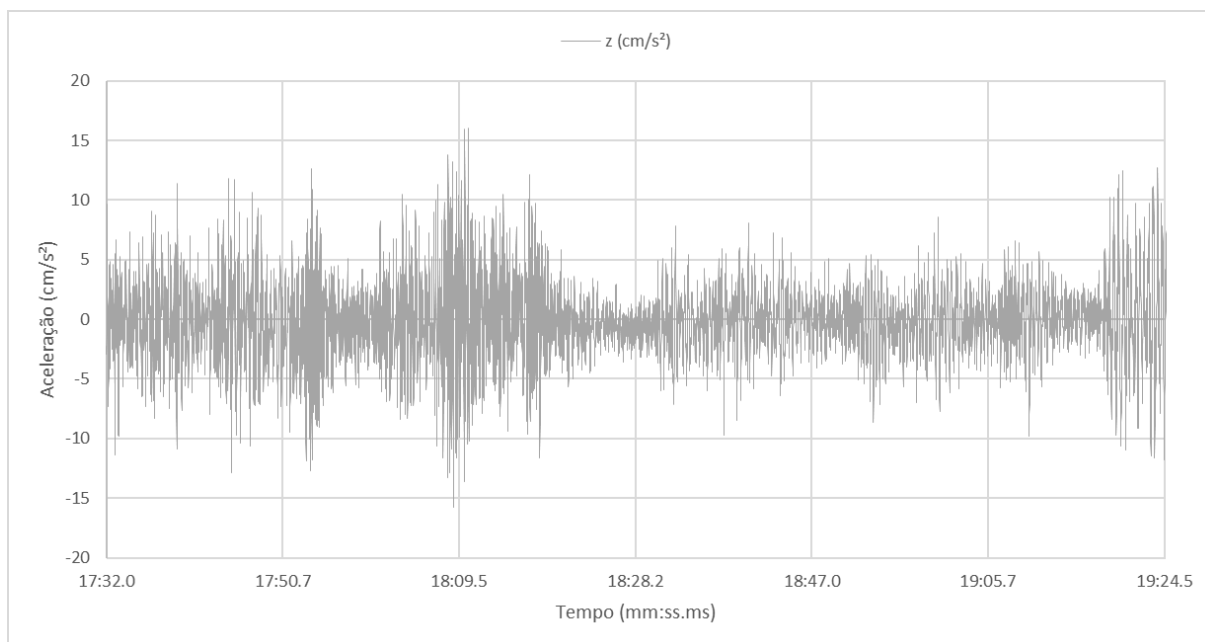
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 118 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 3.



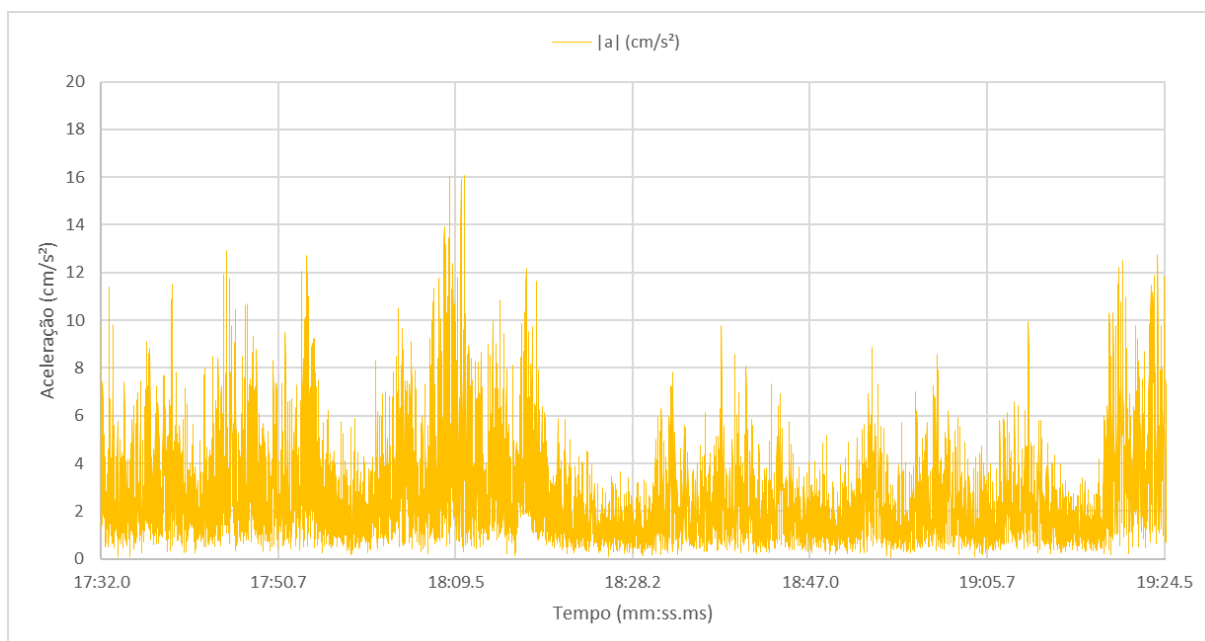
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 119 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 4.

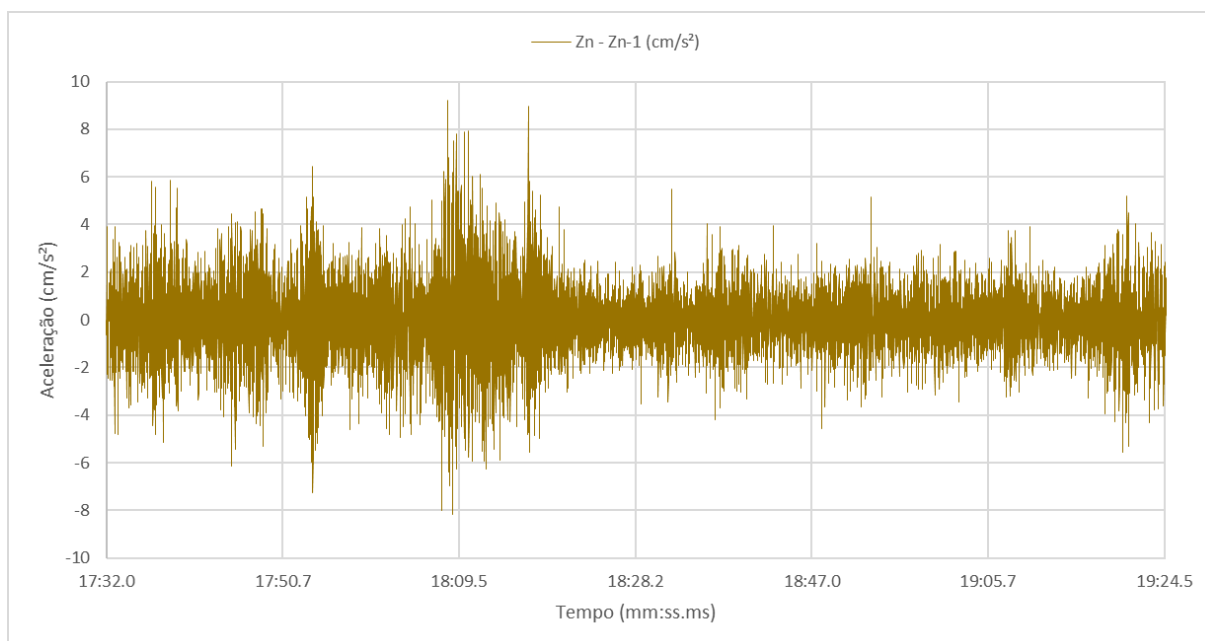


Fonte: Própria autoria (2019)

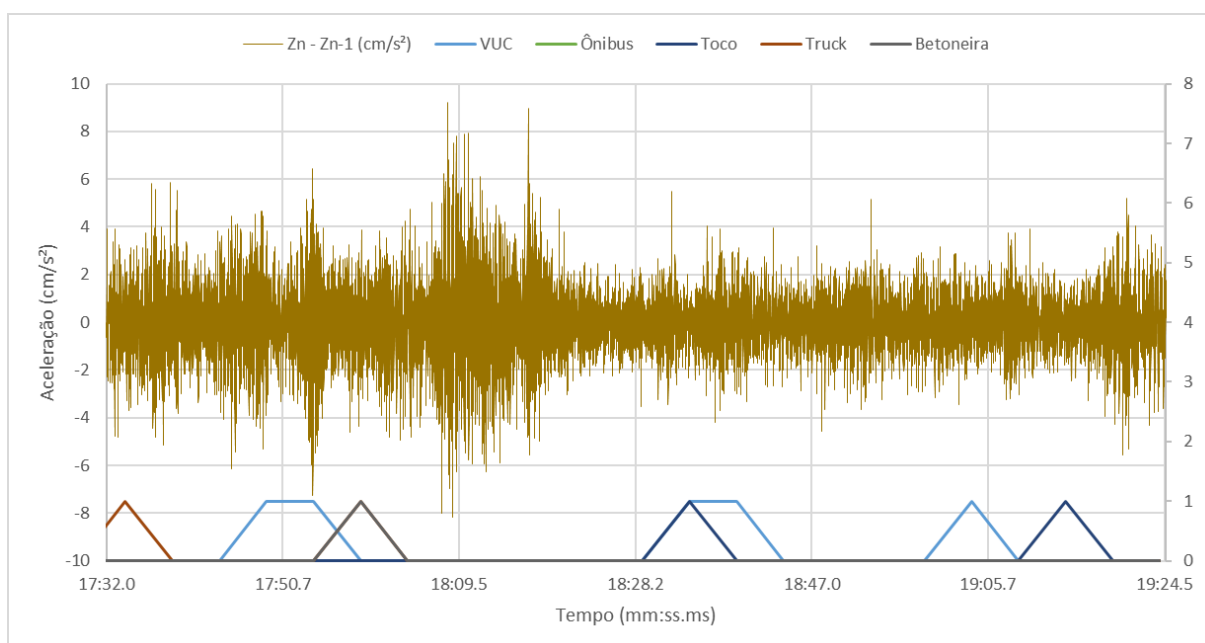
Gráfico 120 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 4.



Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 121 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 4.

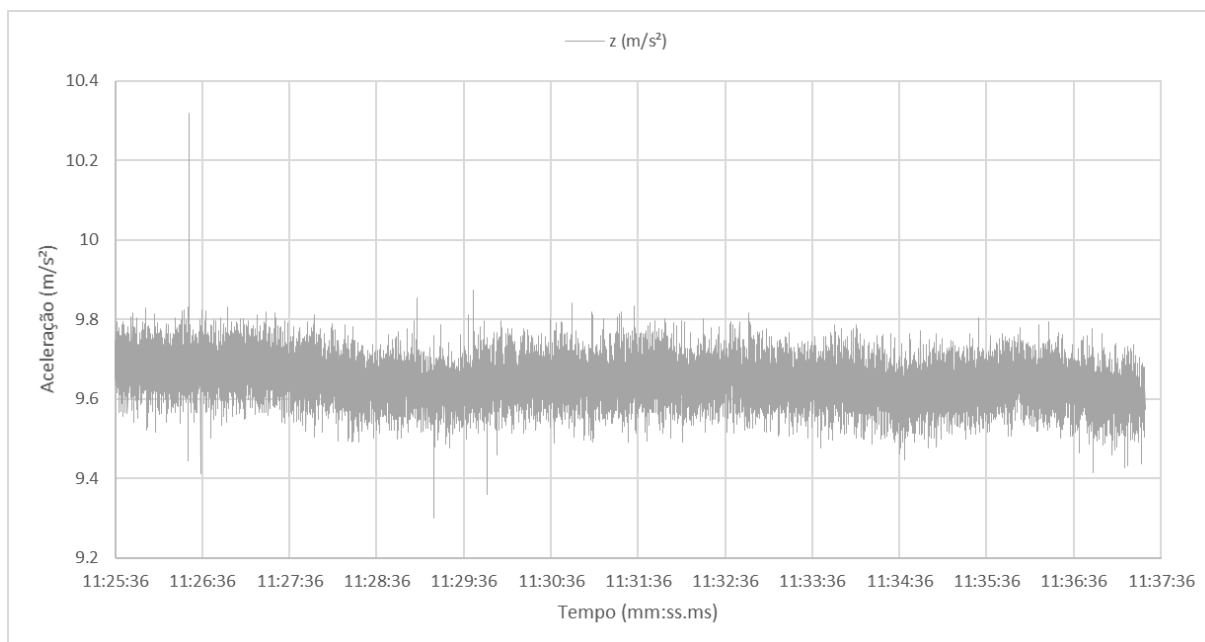
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 122 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 4.

Fonte: Própria autoria (2019)

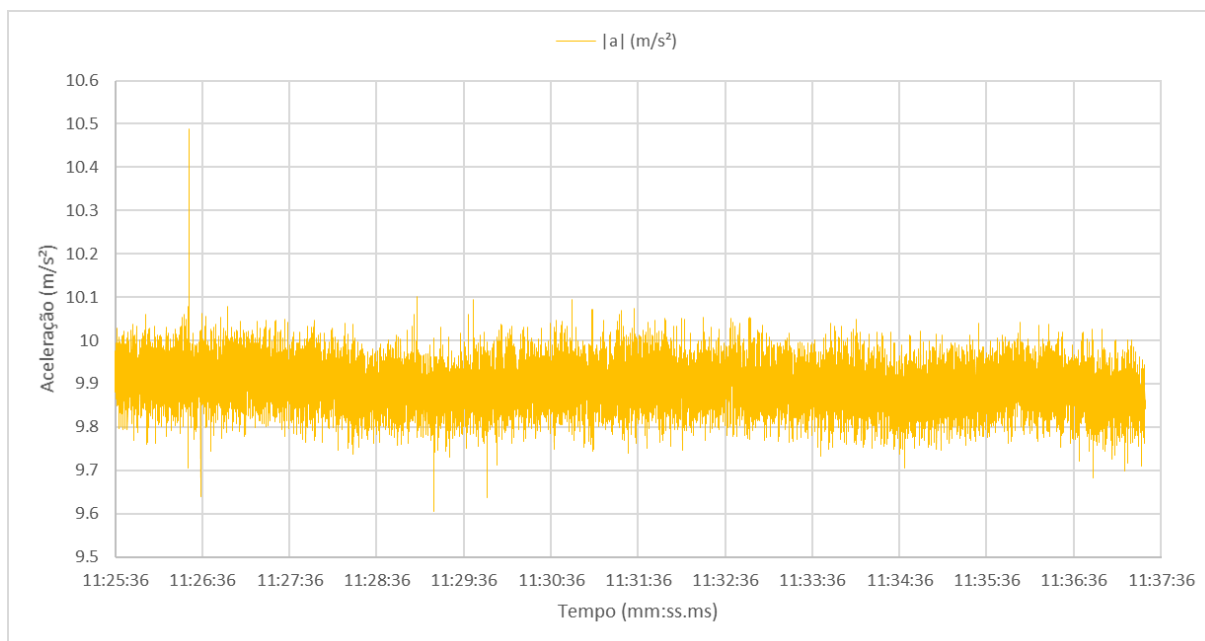
APÊNDICE D – GRÁFICOS ELABORADOS COM OS DADOS DO ARDUINO (F=30Hz)

Gráfico 123 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A.

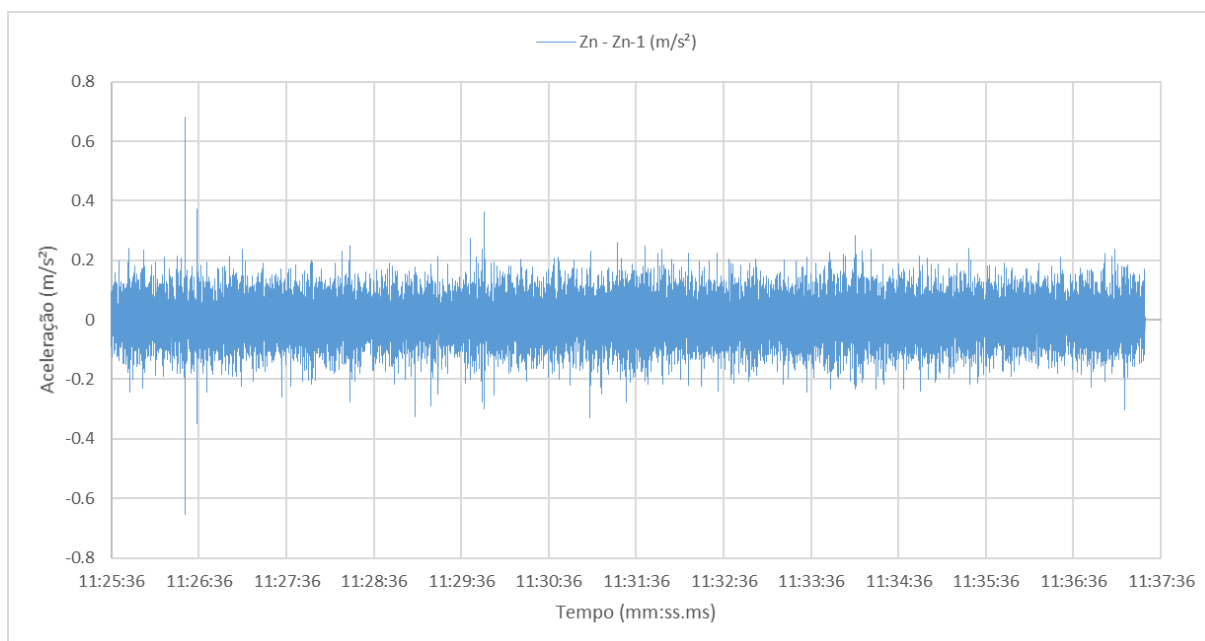


Fonte: Própria autoria (2019)

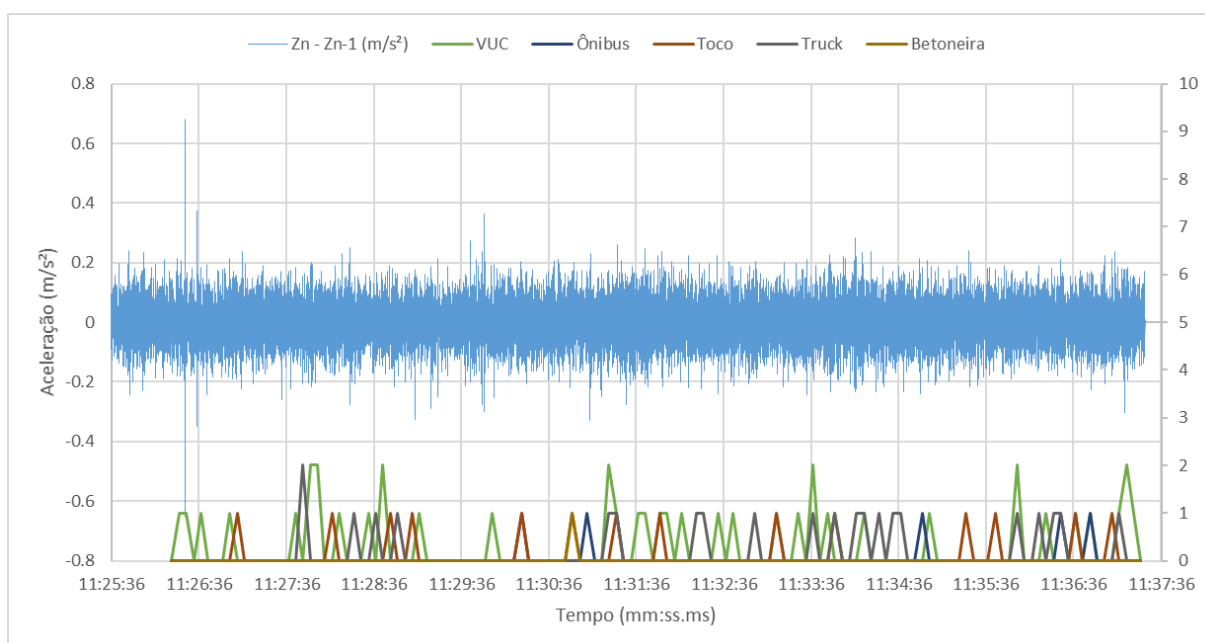
Gráfico 124 - Módulo da aceleração (m/s²) versus Tempo (mm:ss.ms).



Fonte: Própria autoria (2019)

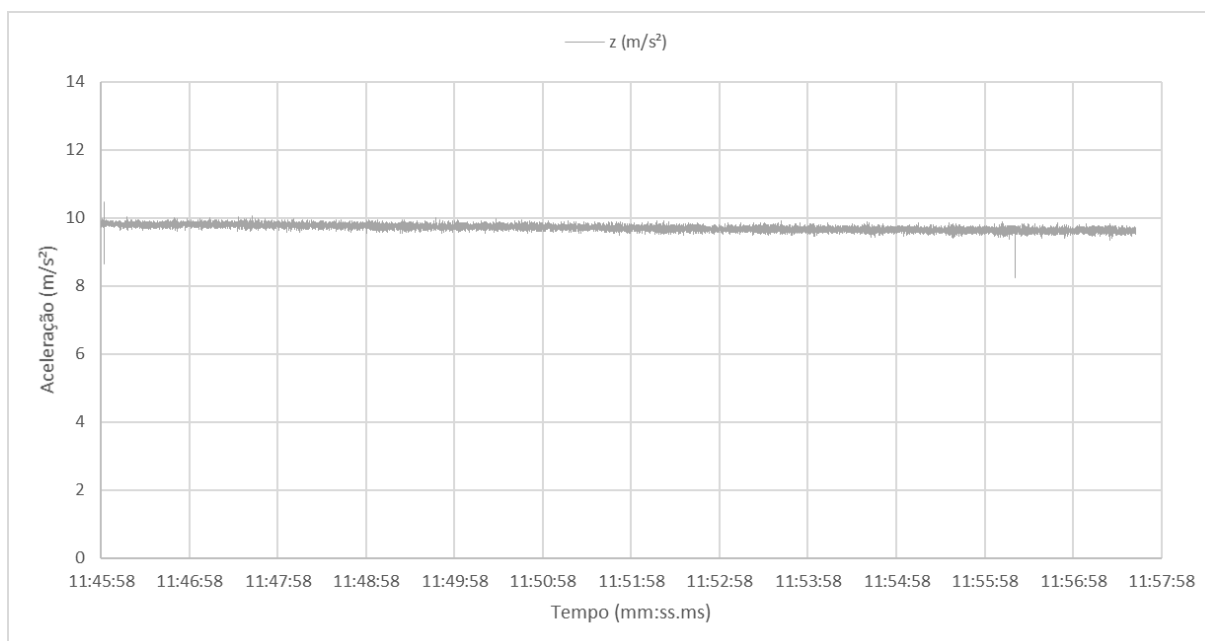
Gráfico 125 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A.

Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 126 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto A.

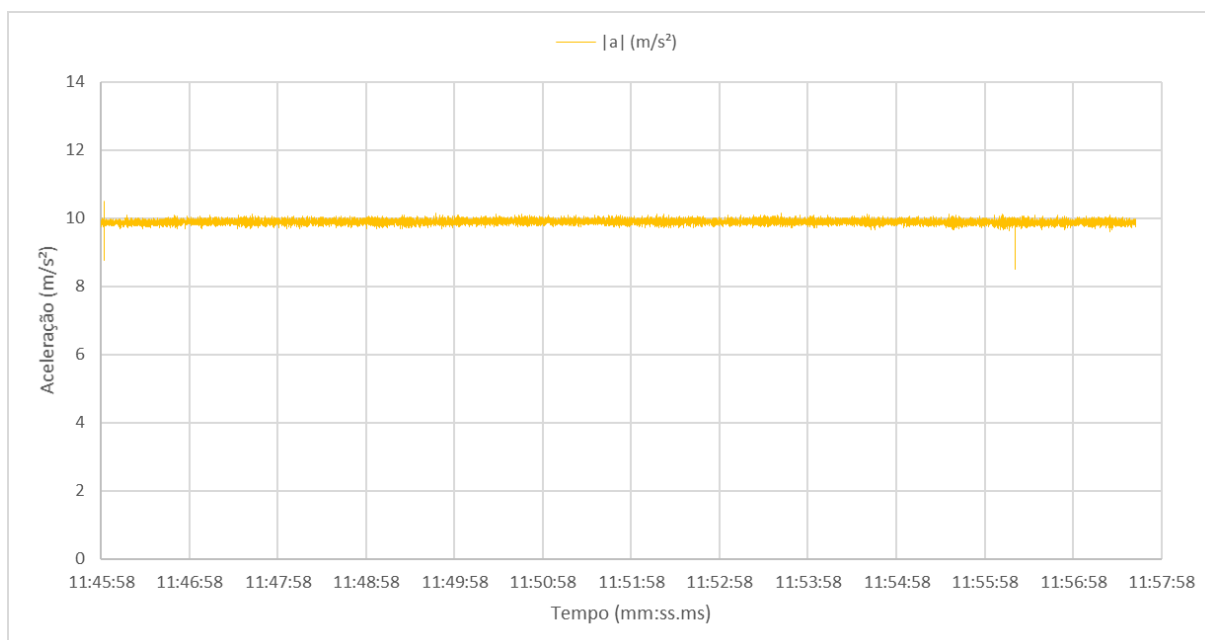
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 127 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B.

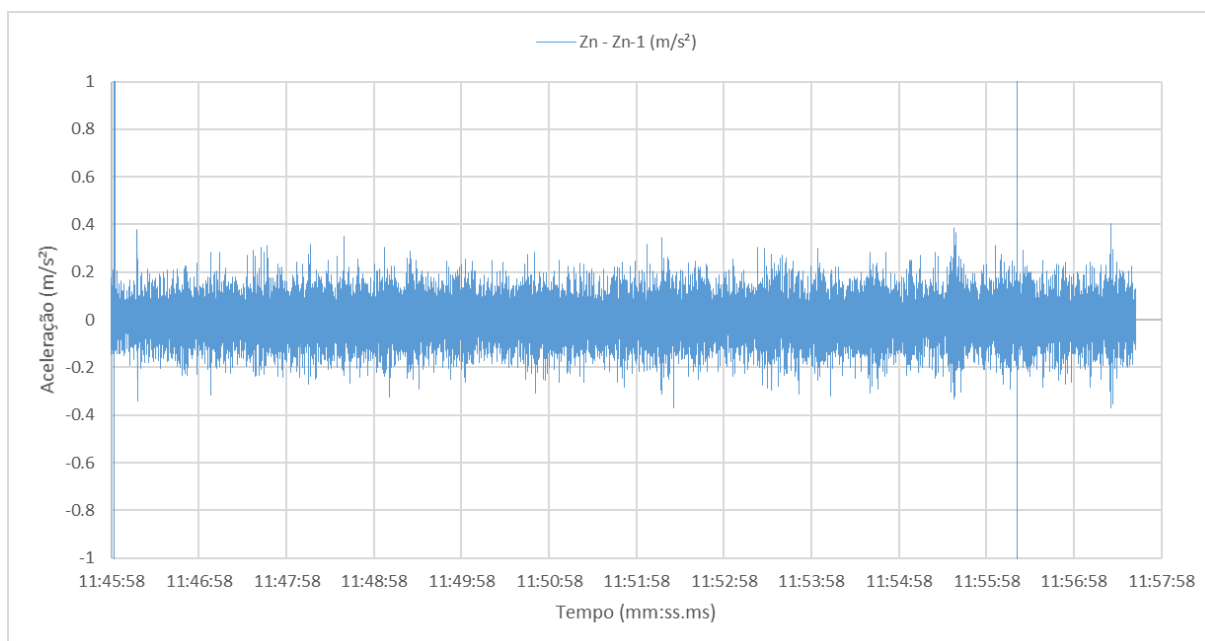


Fonte: Própria autoria (2019)

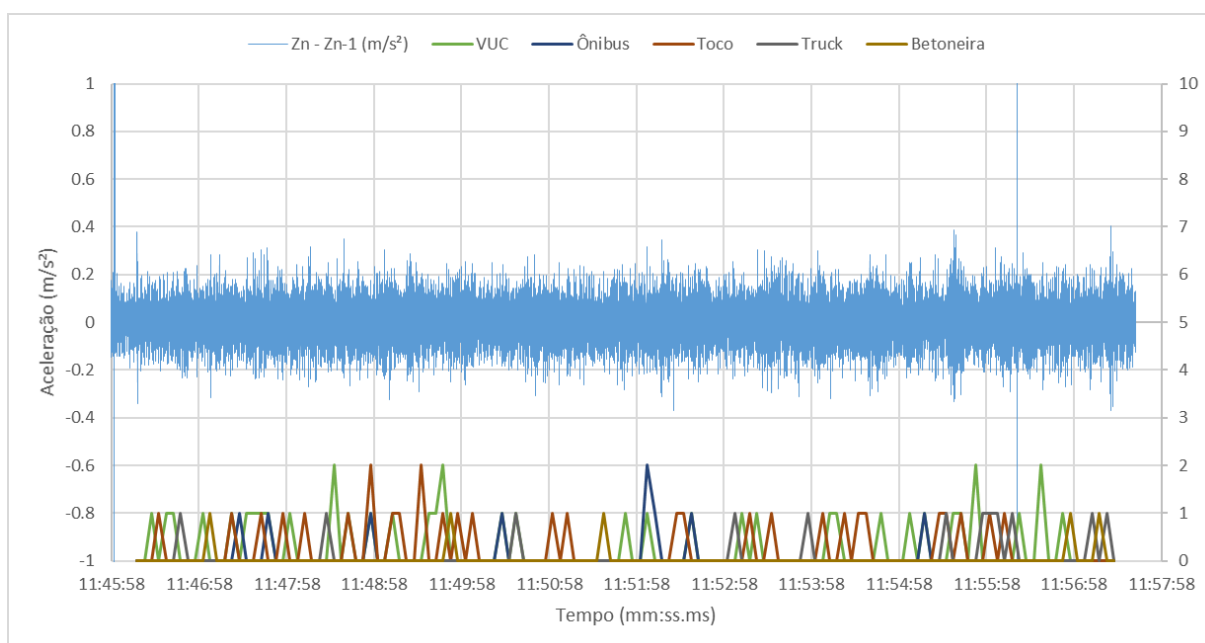
Gráfico 128 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B.



Fonte: Própria autoria (2019)

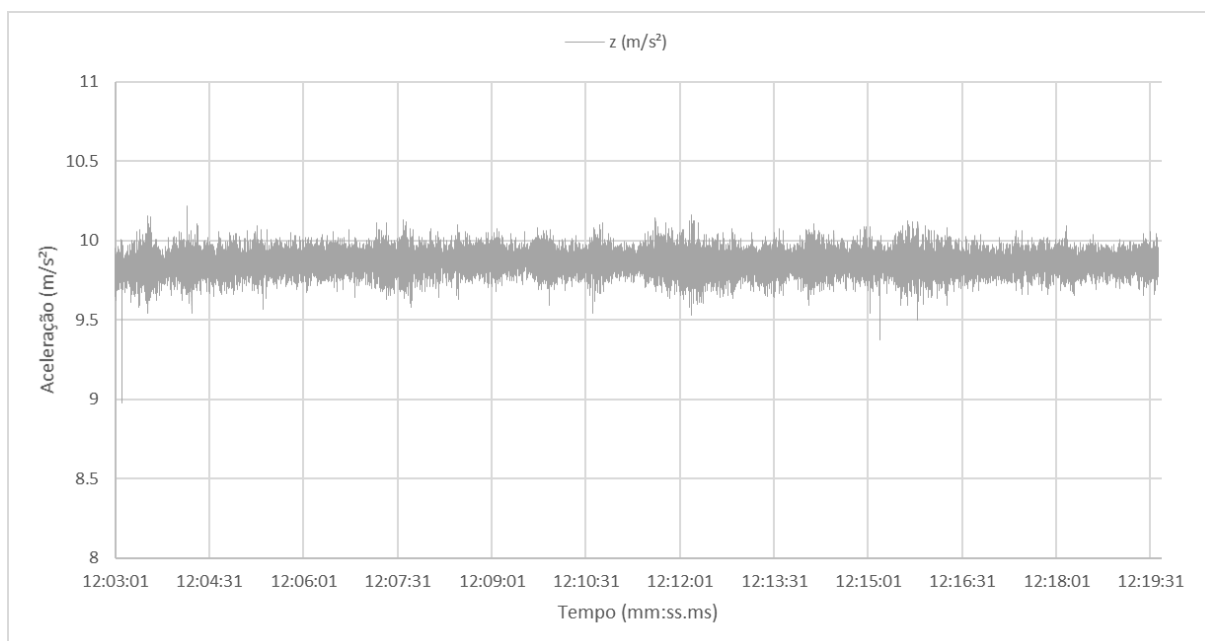
Gráfico 129 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B.

Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 130 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto B.

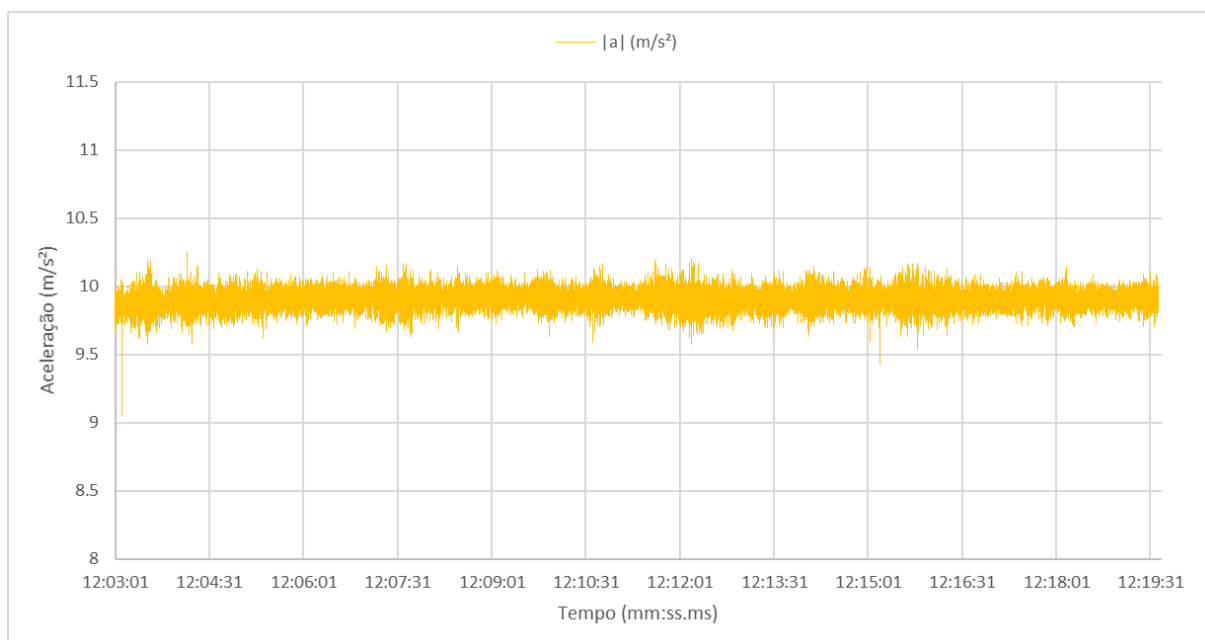
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 131 - Componente z da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C.

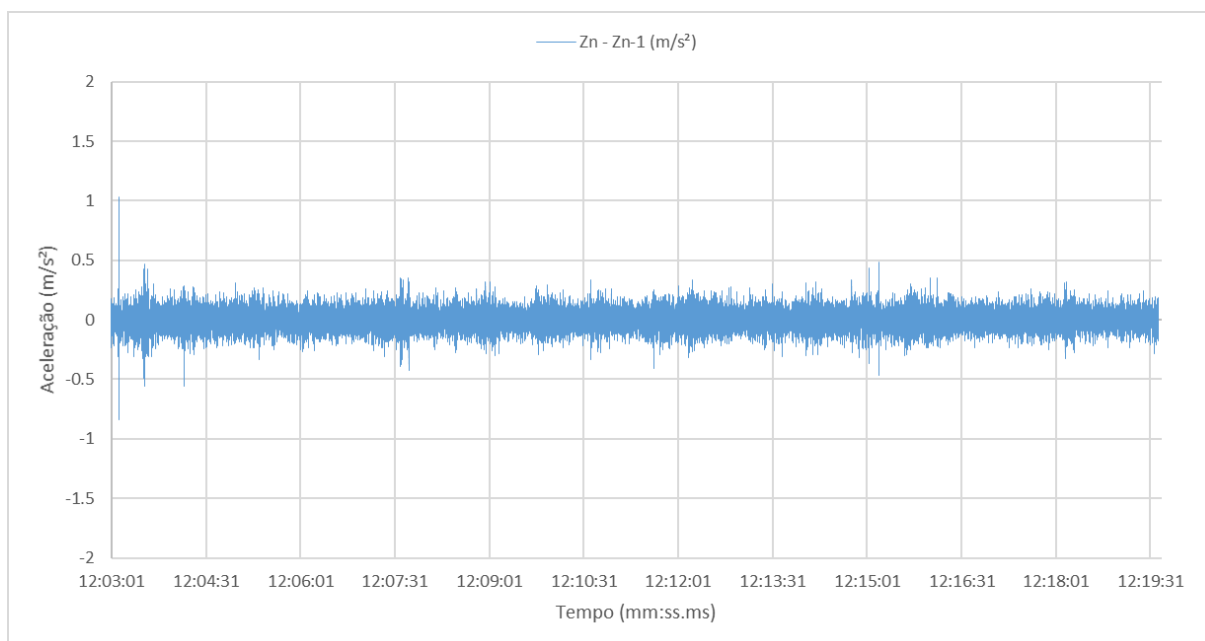


Fonte: Própria autoria (2019)

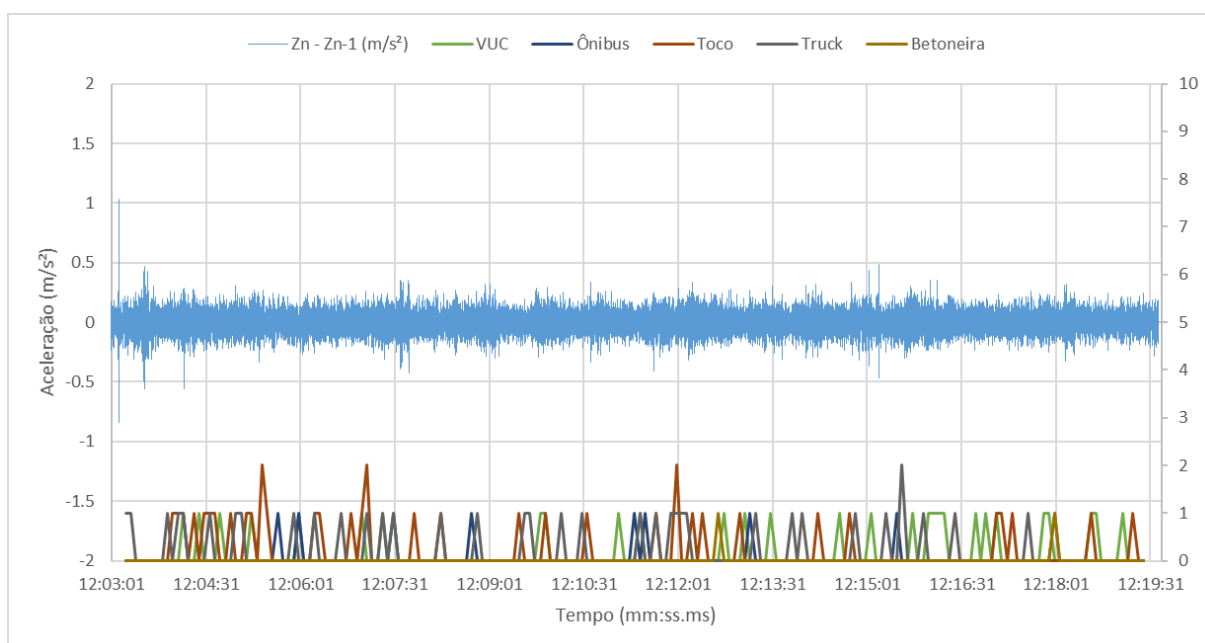
Gráfico 132 - Módulo da aceleração, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C.



Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 133 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C.

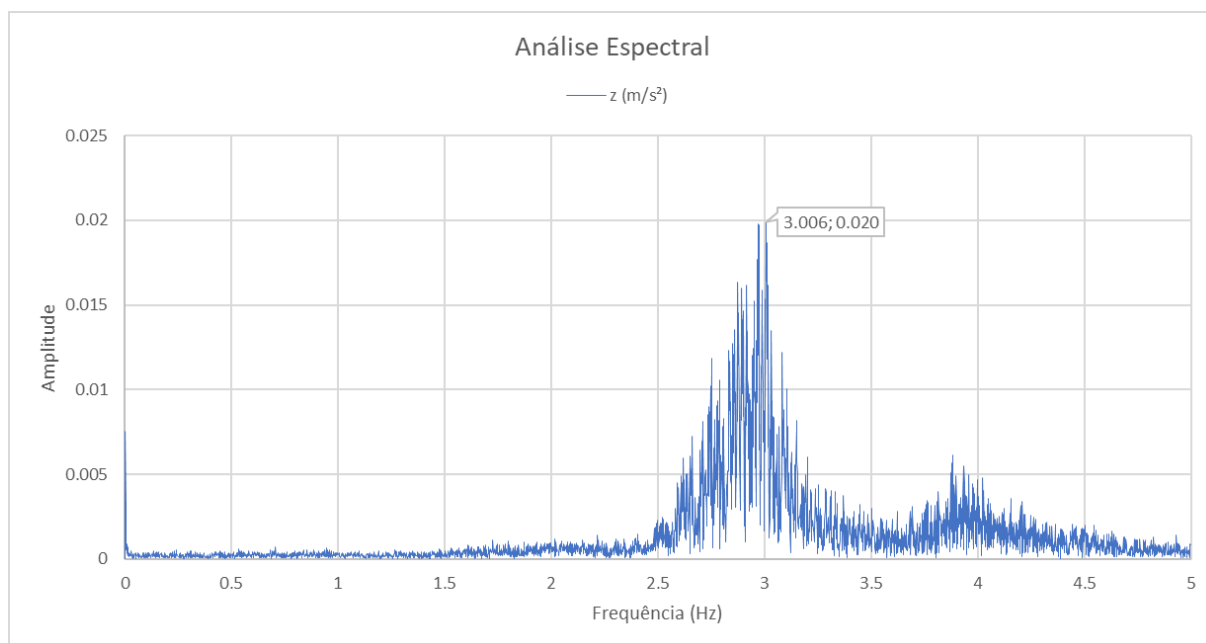
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 134 - Amplitude $Z_n - Z_{n-1}$, correlacionado ao tráfego, coletado na Ponte Cidade Universitária - Ponto C.

Fonte: Própria autoria (2019)

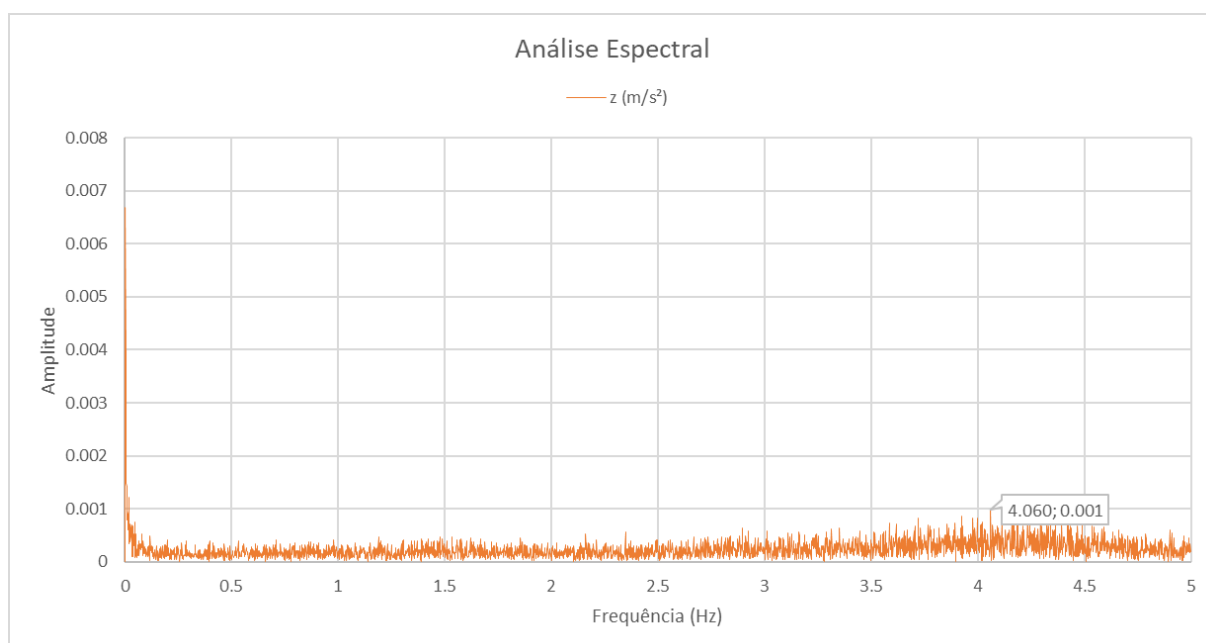
APÊNDICE E – ANÁLISES ESPECTRAIS ELABORADAS COM DADOS DO CELULAR (F=10Hz)

Gráfico 135 - Análise espectral do sinal da componente z, da passarela de pedestres da Escola Politécnica.



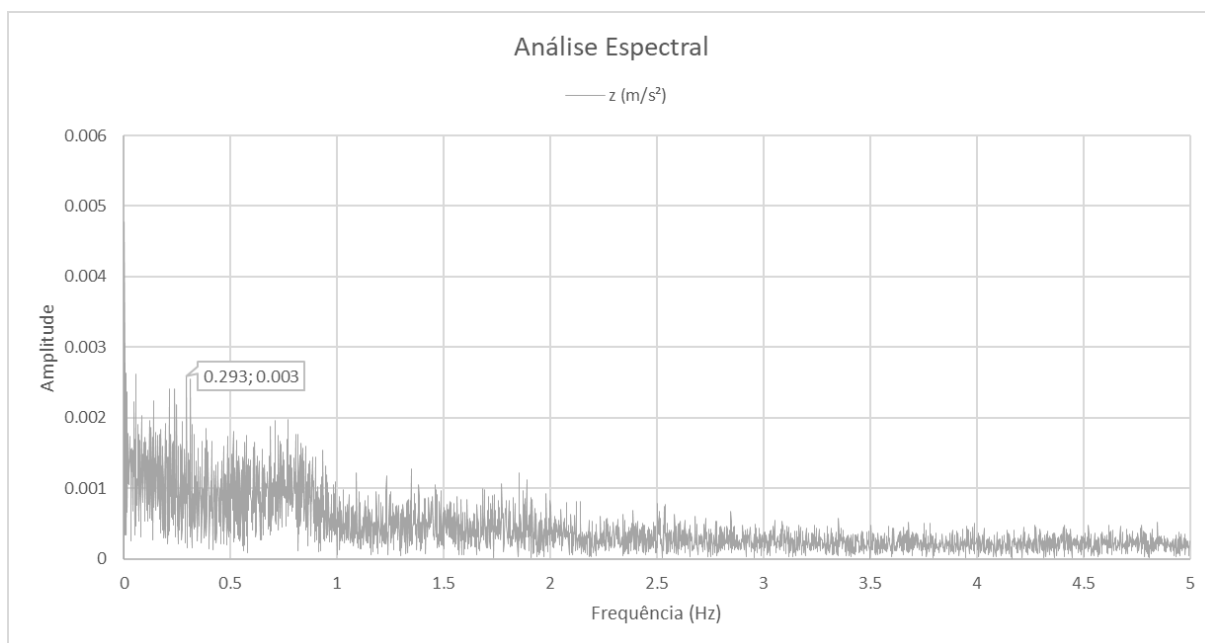
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 136 - Análise espectral do sinal da componente z, da ponte de veículos da Escola Politécnica.



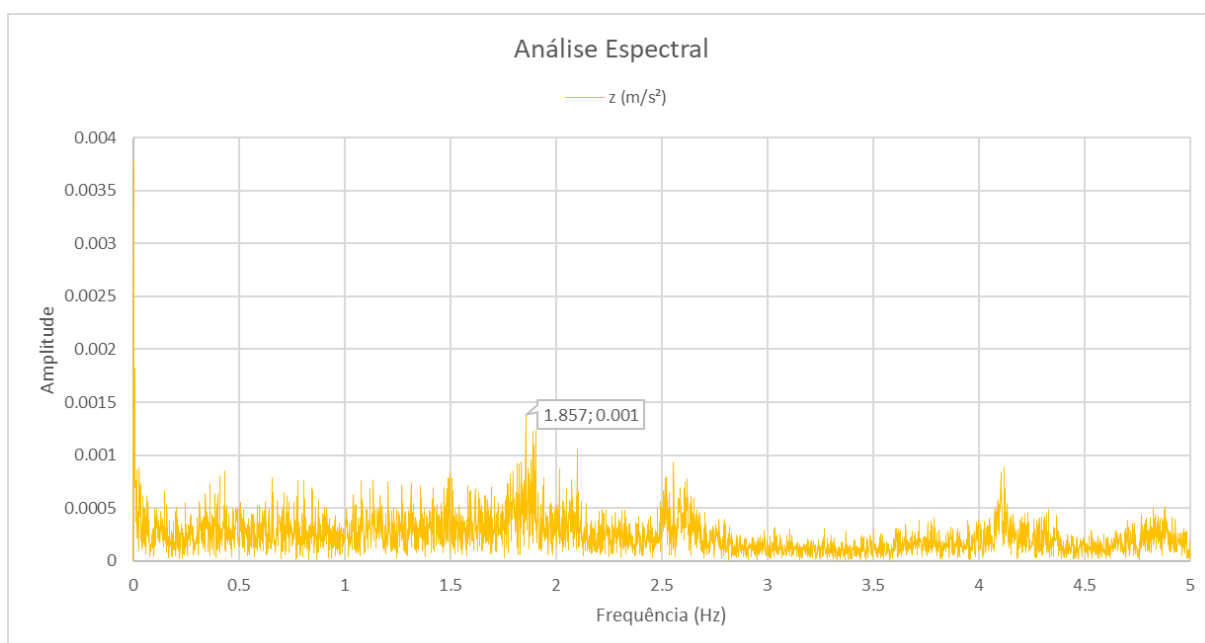
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 137 - Análise espectral do sinal da componente z, da ponte da Avenida Almeida Prado.



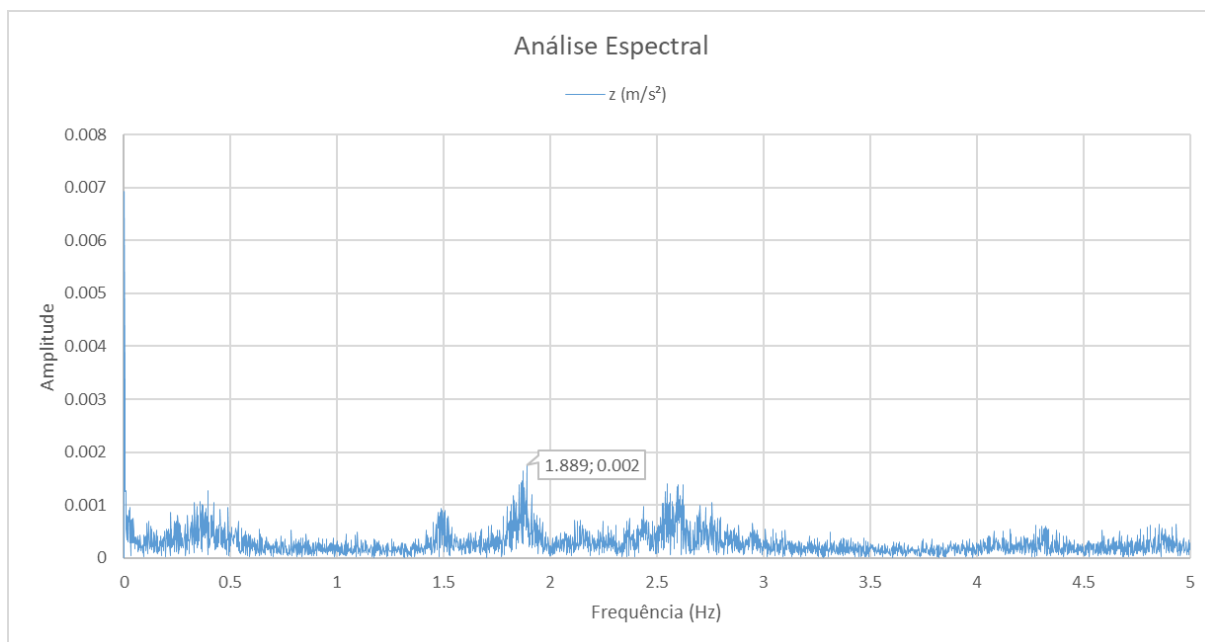
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 138 - Análise espectral do sinal da componente z, da ponte da Ponte Cidade Universitária - Ponto A.



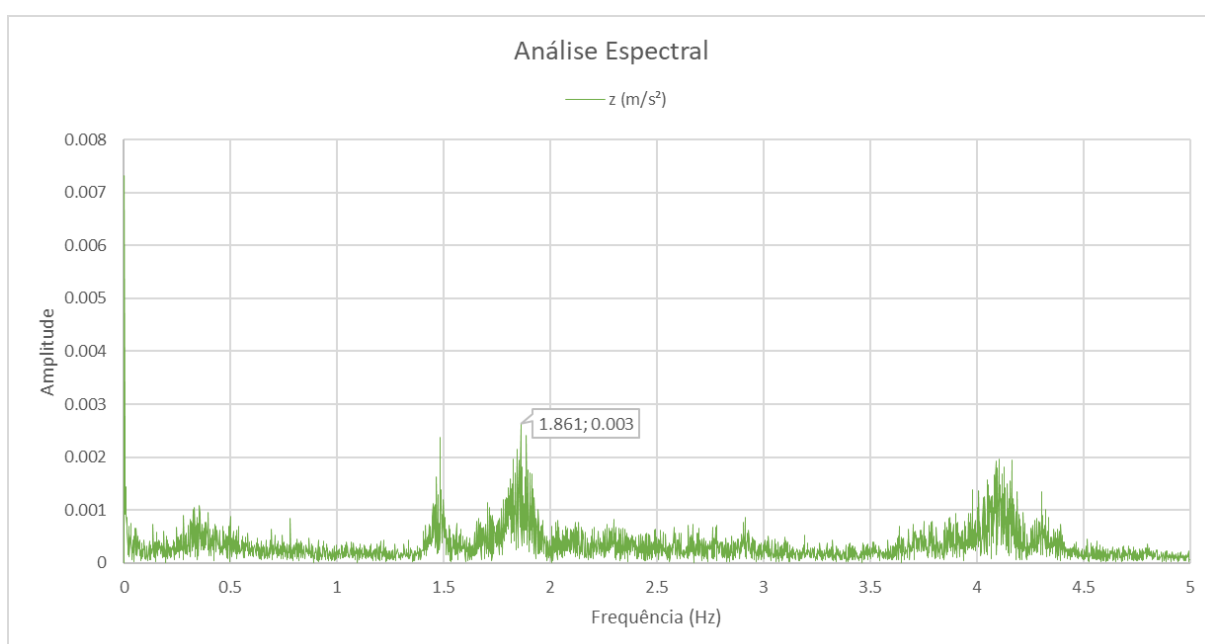
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 139 - Análise espectral do sinal da componente z, da ponte da Ponte Cidade Universitária - Ponto B.



Fonte: Própria autoria (2019)

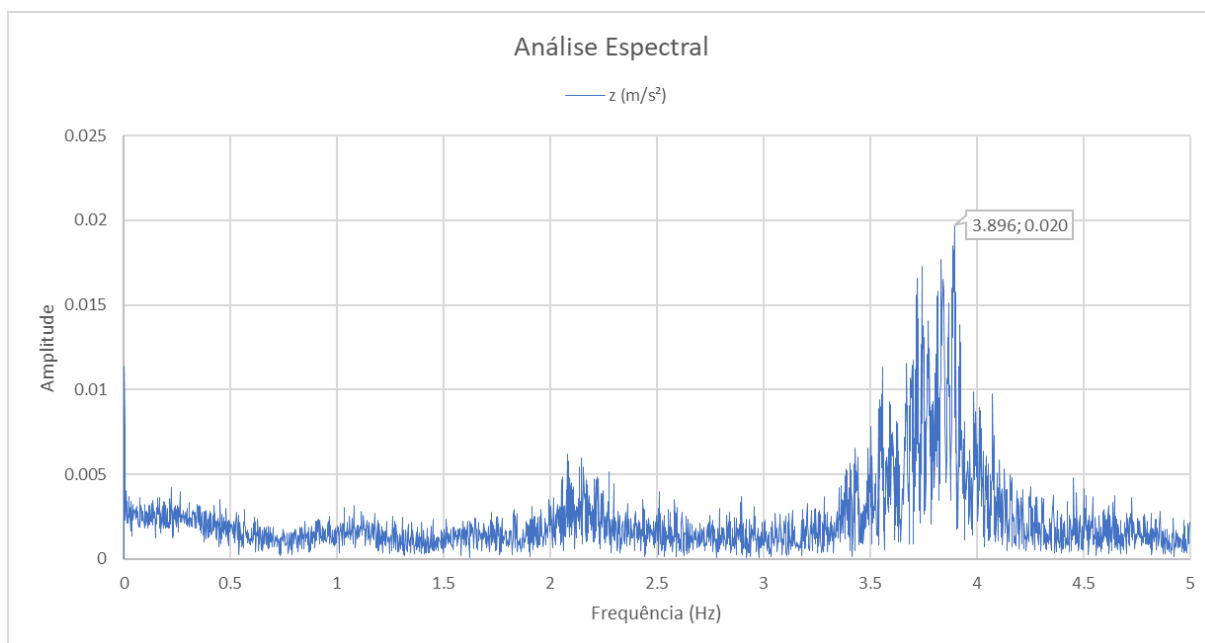
Gráfico 140 - Análise espectral do sinal da componente z, da ponte da Ponte Cidade Universitária - Ponto C.



Fonte: Própria autoria (2019)

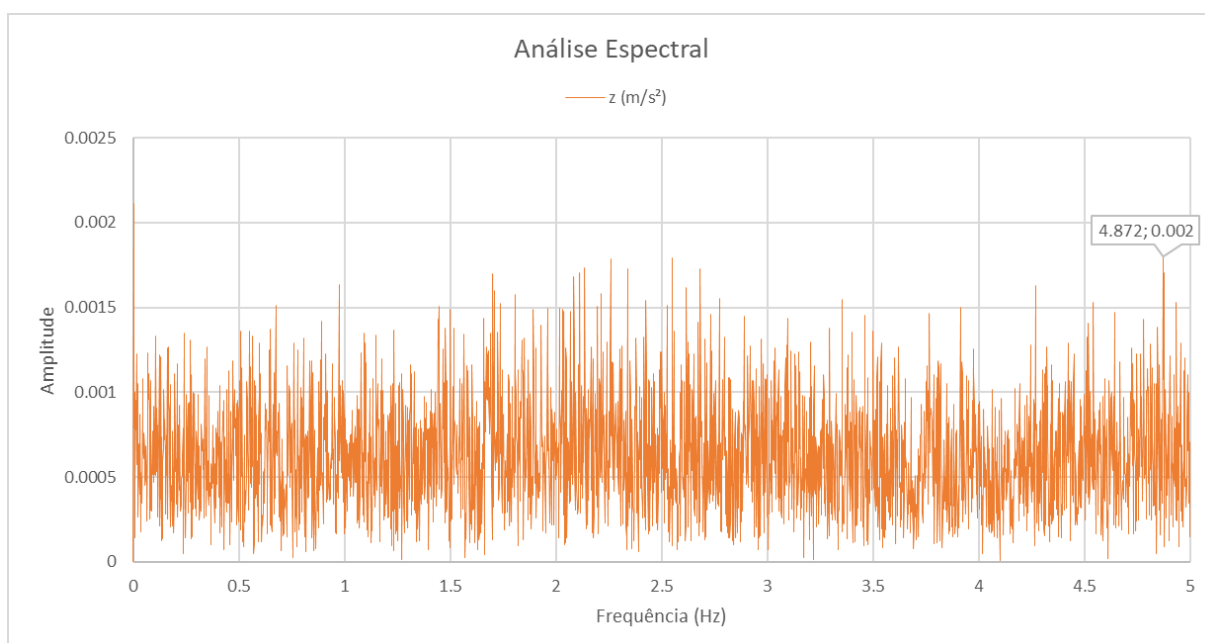
APÊNDICE F – ANÁLISES ESPECTRAIS ELABORADAS COM DADOS DO ARDUINO (F=10Hz)

Gráfico 141 - Análise espectral do sinal da componente z, da passarela de pedestres da Escola Politécnica.



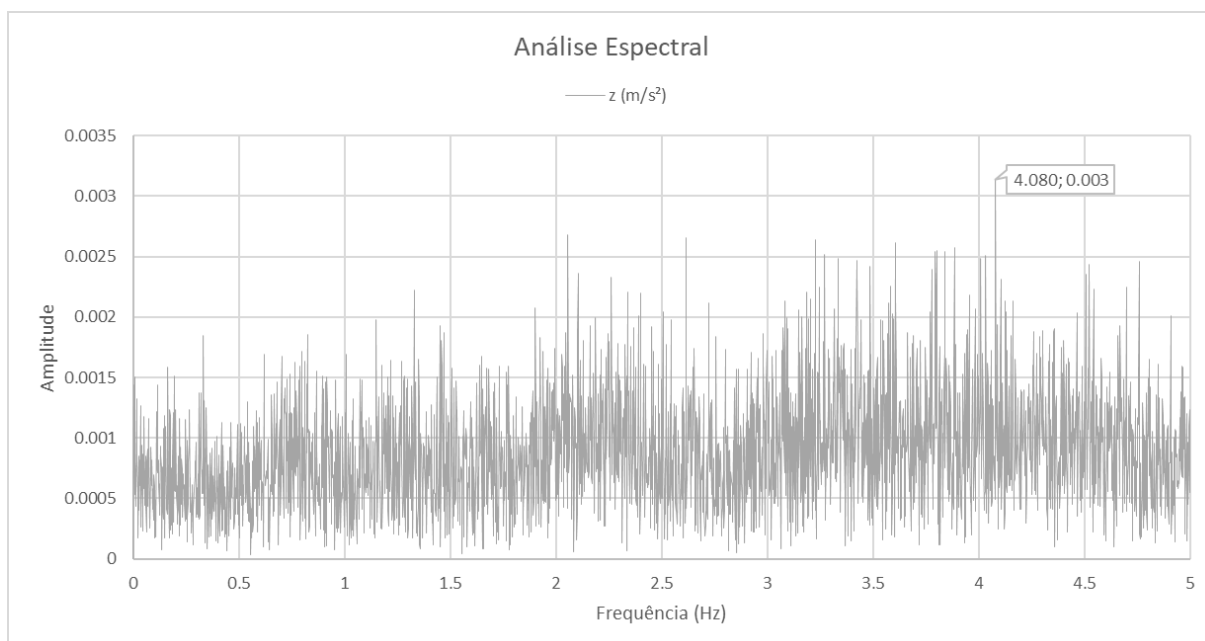
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 142 - Análise espectral do sinal da componente z, da ponte de veículos da Escola Politécnica.



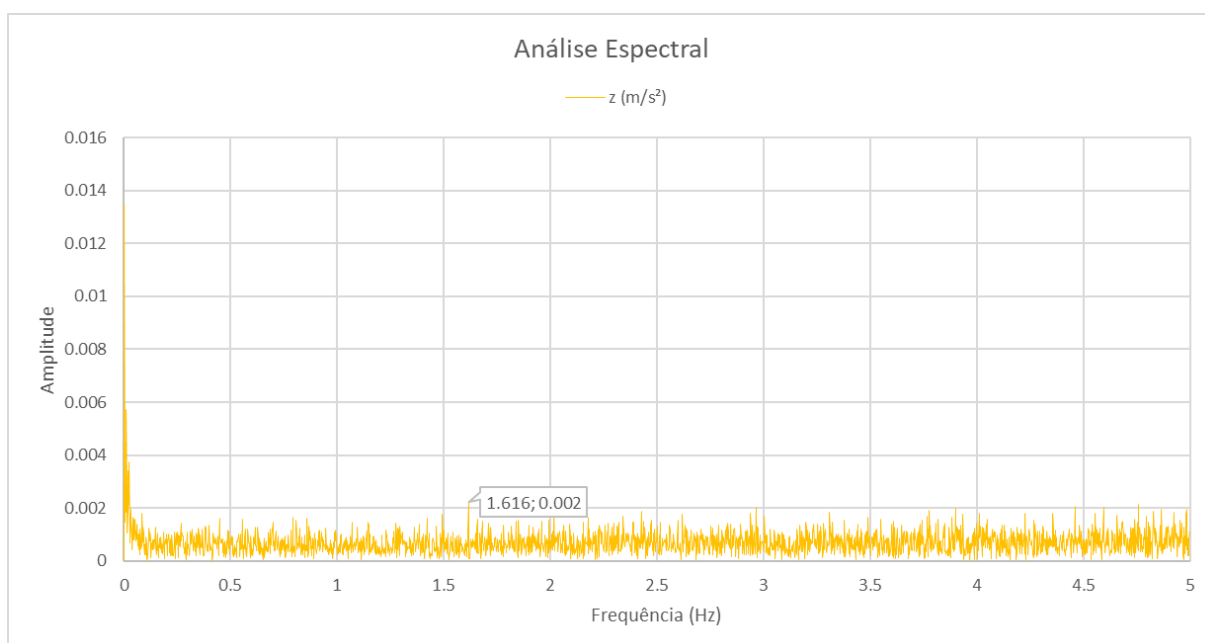
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 143 - Análise espectral do sinal da componente z, da ponte da Avenida Almeida Prado.



Fonte: Própria autoria (2019)

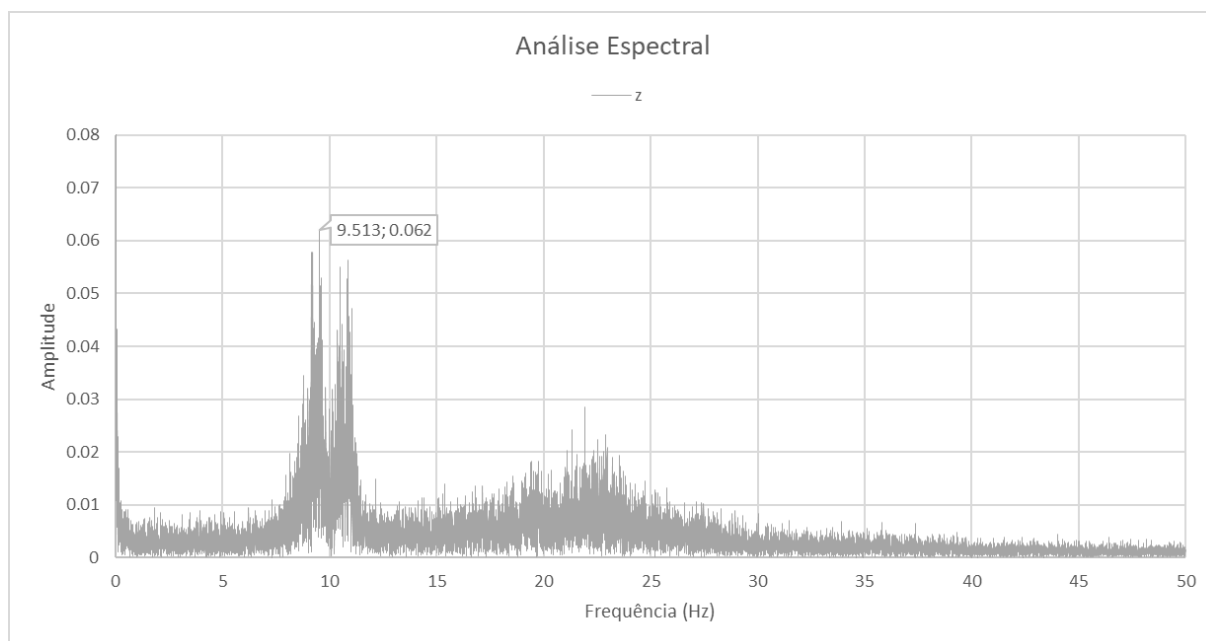
Gráfico 144 - Análise espectral do sinal da componente z, da ponte da Ponte Cidade Universitária - Ponto A.



Fonte: Própria autoria (2019)

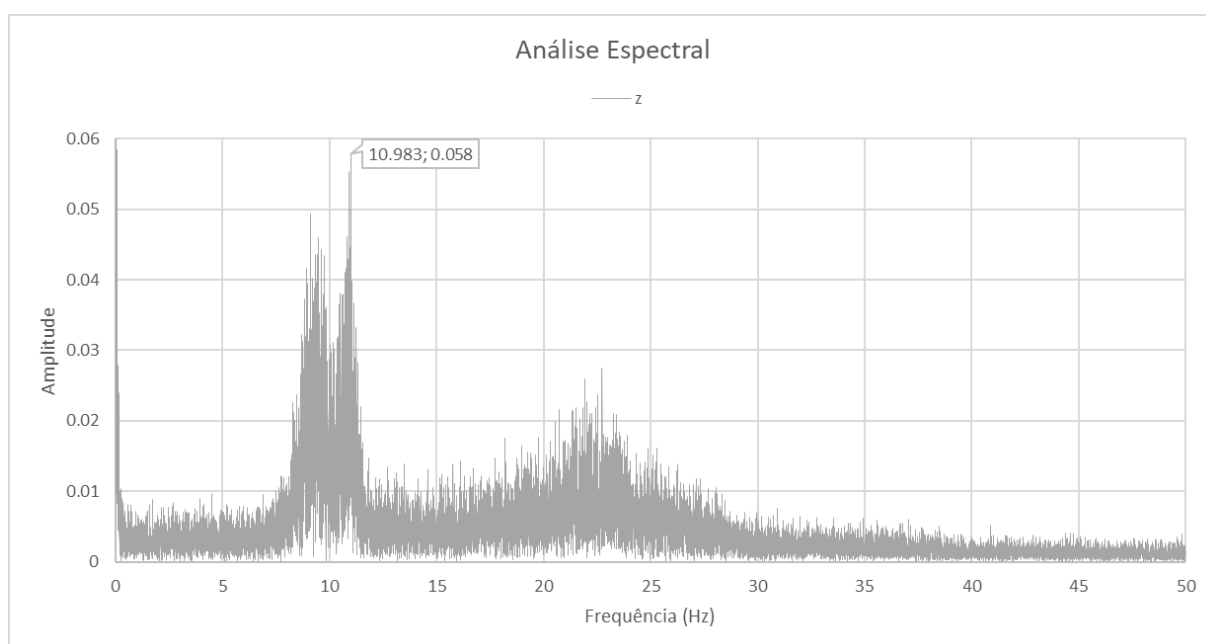
APÊNDICE G – ANÁLISES ESPECTRAIS ELABORADAS COM DADOS DO CELULAR (F=100Hz)

Gráfico 145 - Análise espectral do sinal da componente z, da Ponte Cidade Universitária - Ponto A, amostra 1.



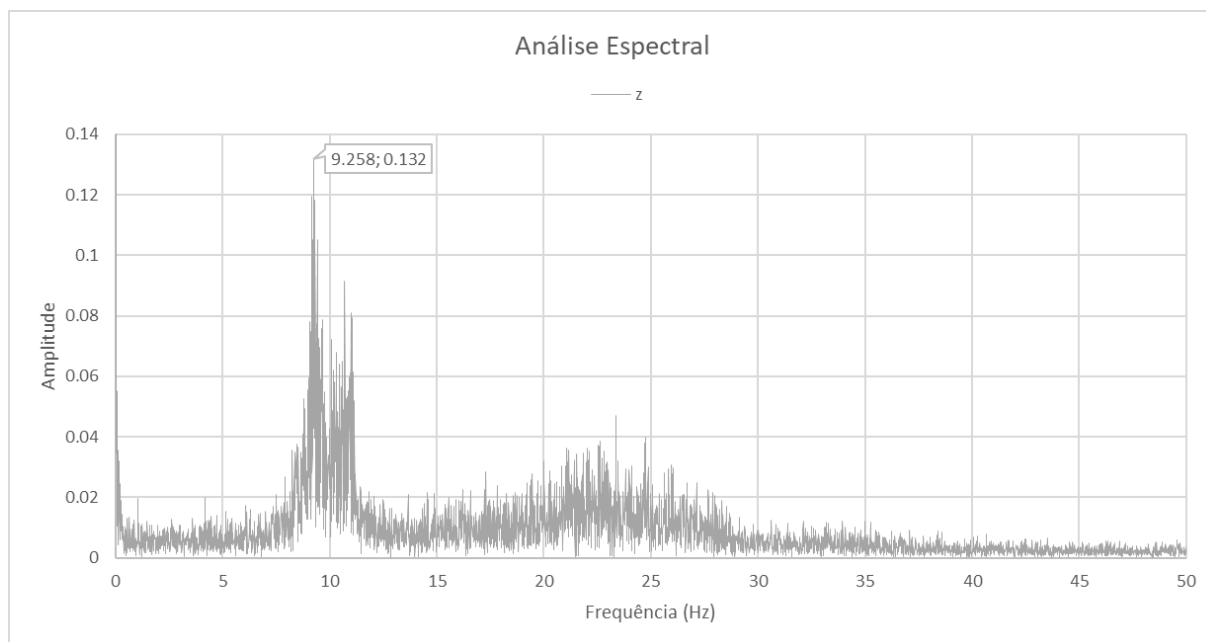
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 146 - Análise espectral do sinal da componente z, da Ponte Cidade Universitária - Ponto A, amostra 2.



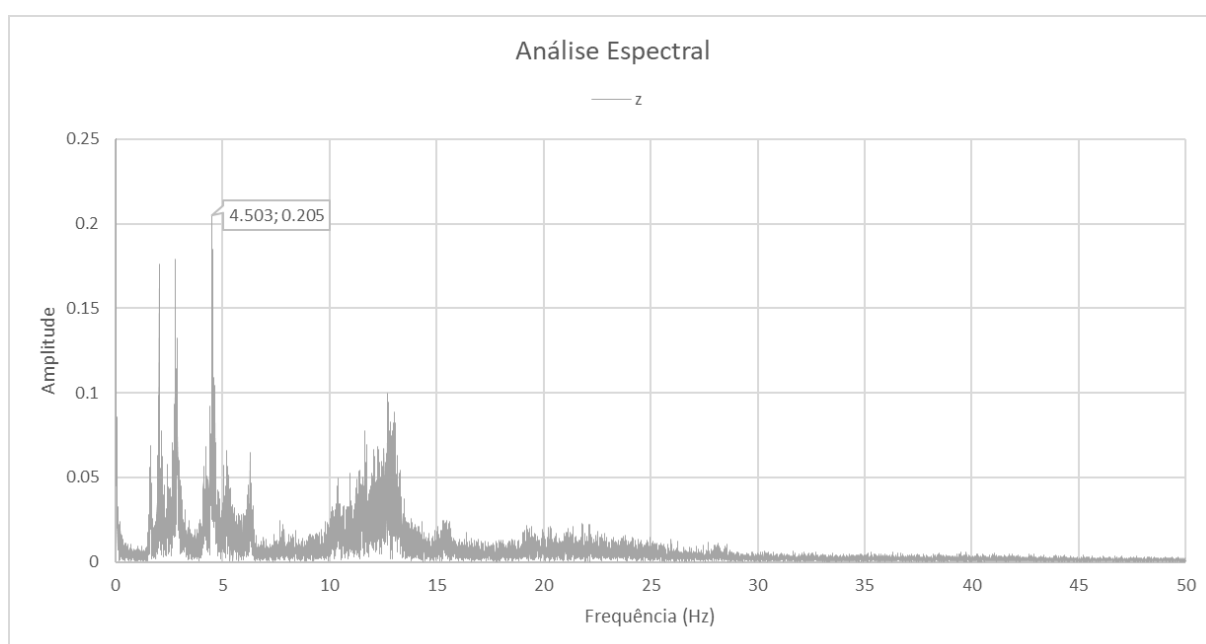
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 147 - Análise espectral do sinal da componente z, da Ponte Cidade Universitária - Ponto A, amostra 3.



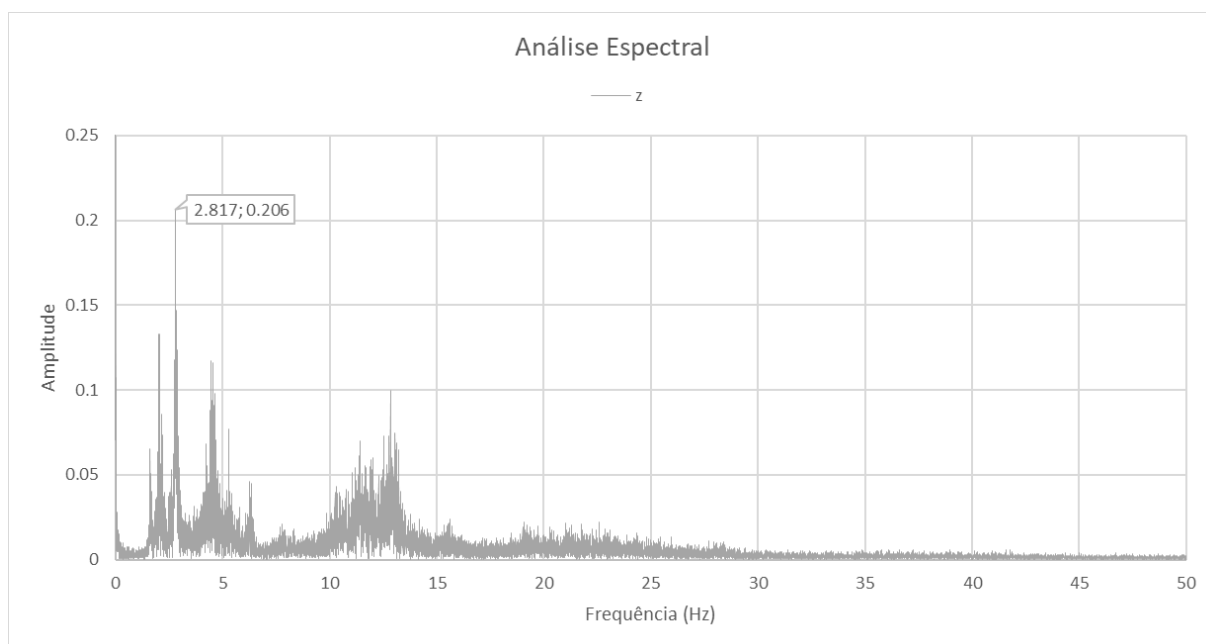
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 148 - Análise espectral do sinal da componente z, da Ponte Cidade Universitária - Ponto B, amostra 1.



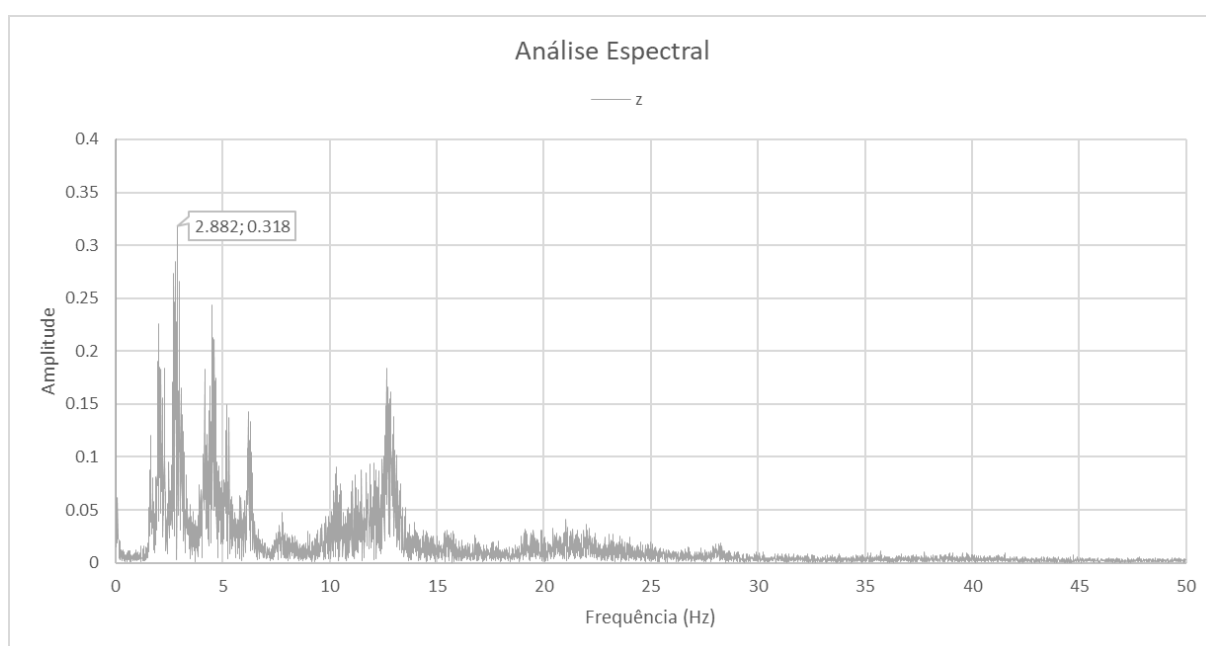
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 149 - Análise espectral do sinal da componente z, da Ponte Cidade Universitária - Ponto B, amostra 2.



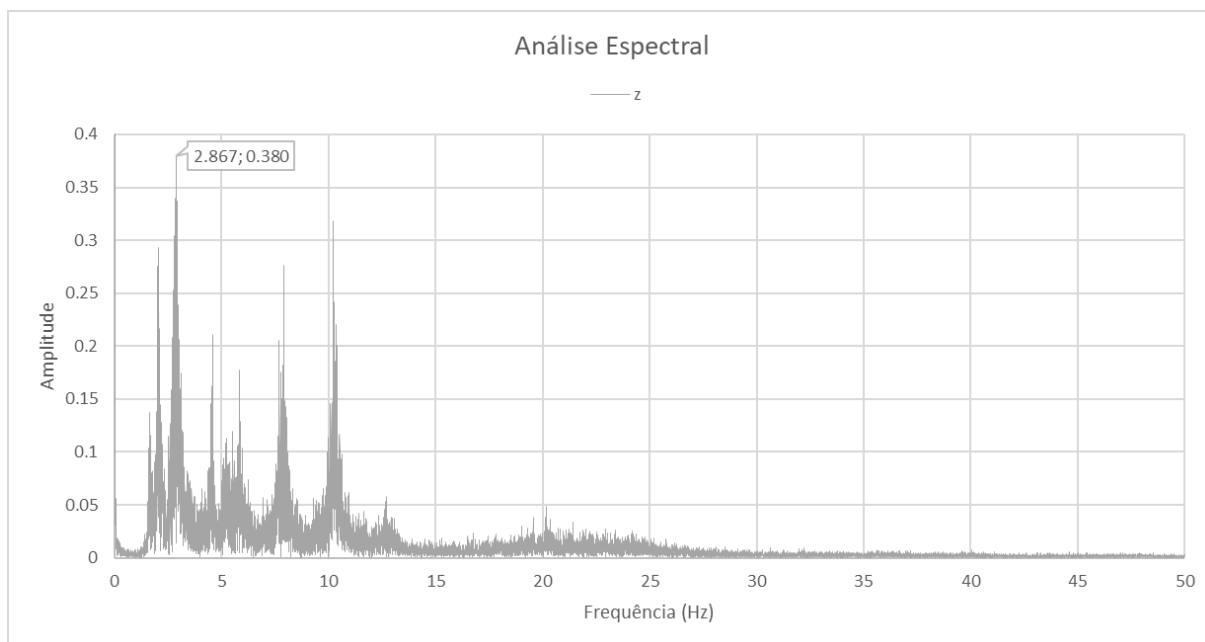
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 150 - Análise espectral do sinal da componente z, da Ponte Cidade Universitária - Ponto B, amostra 3.



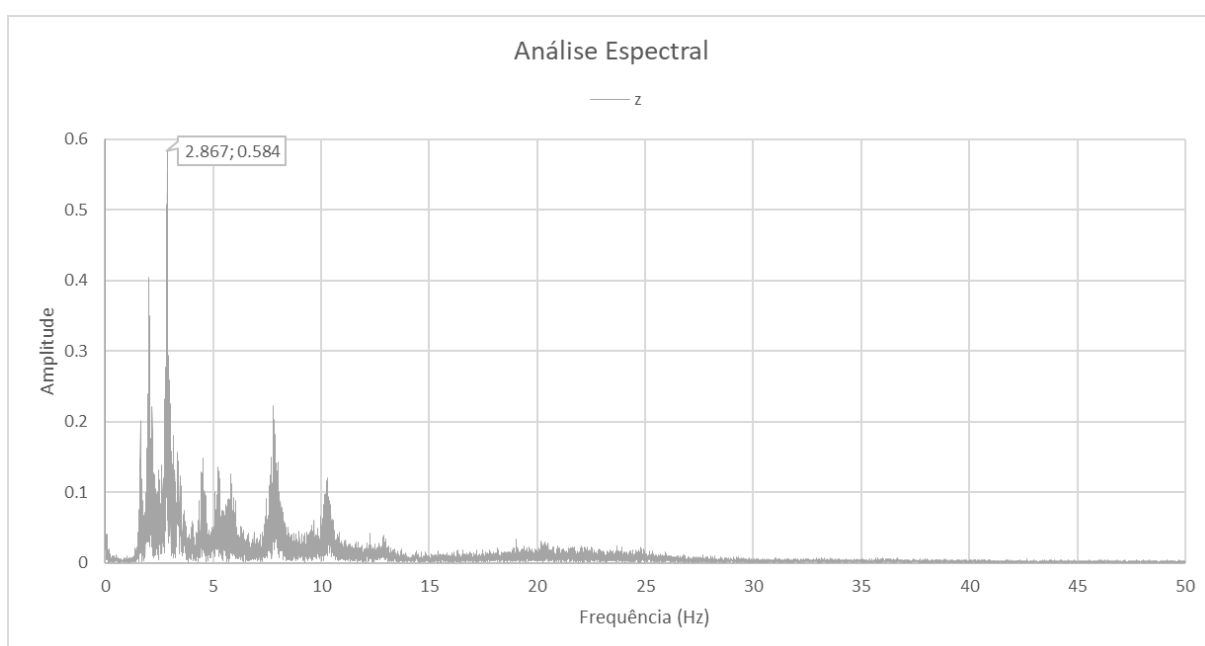
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 151 - Análise espectral do sinal da componente z, da Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 1.



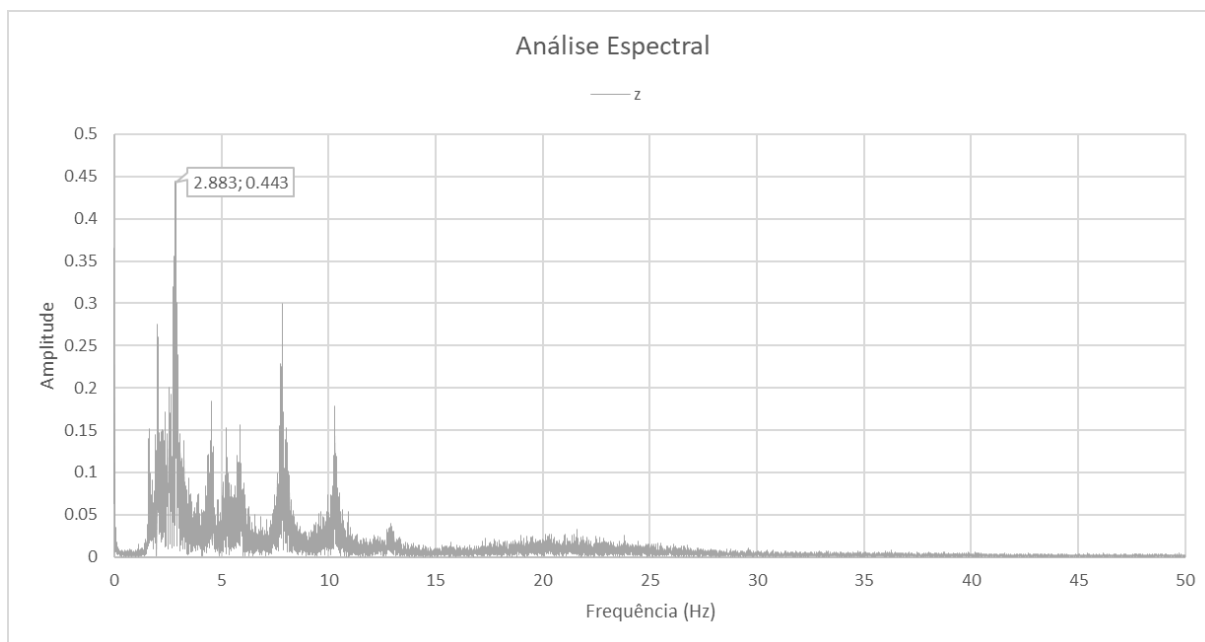
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 152 - Análise espectral do sinal da componente z, da Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 2.



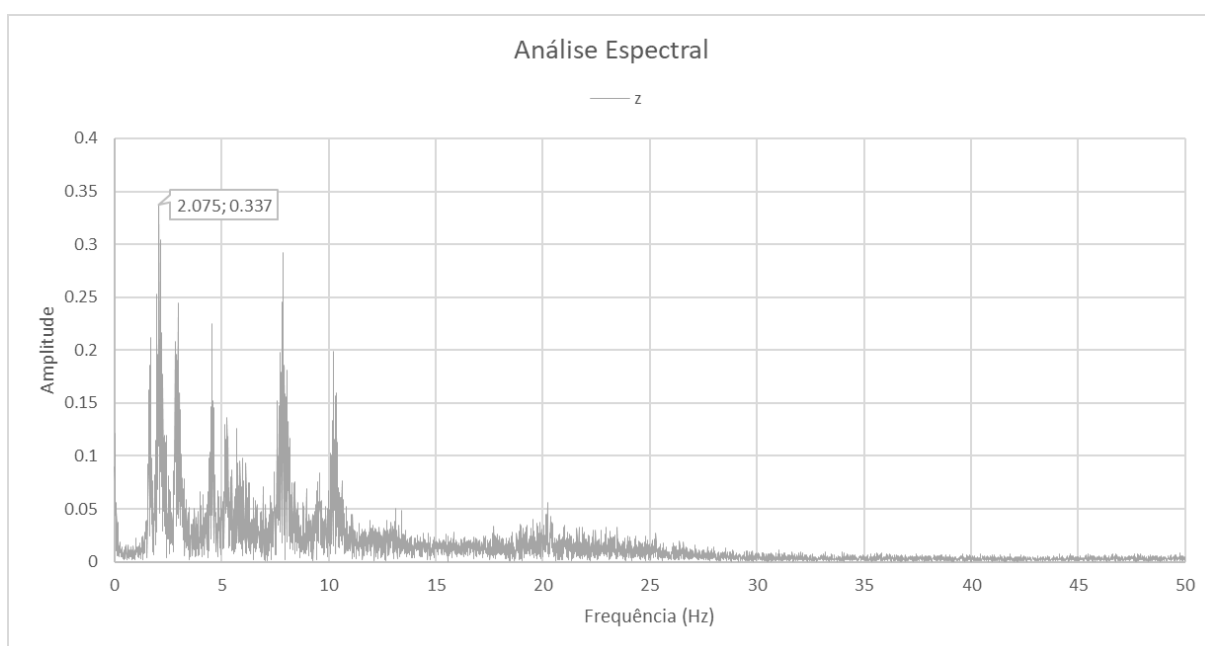
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 153 - Análise espectral do sinal da componente z, da Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 3.



Fonte: Própria autoria (2019)

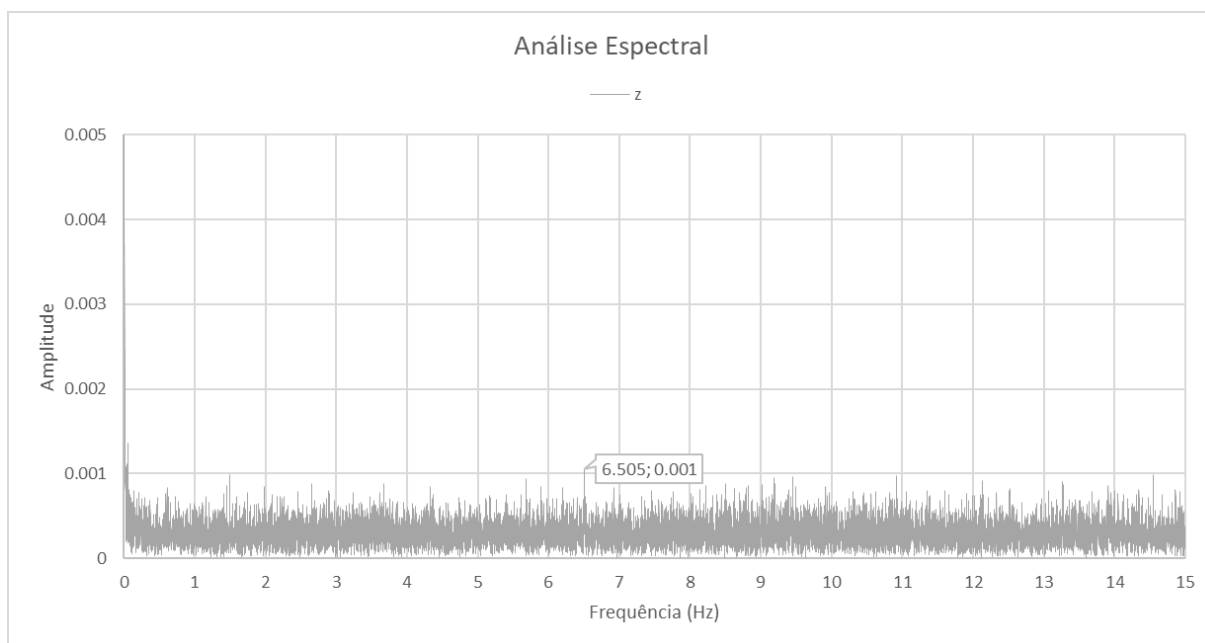
Gráfico 154 - Análise espectral do sinal da componente z, da Ponte Cidade Universitária - Ponto C, amostra 4.



Fonte: Própria autoria (2019)

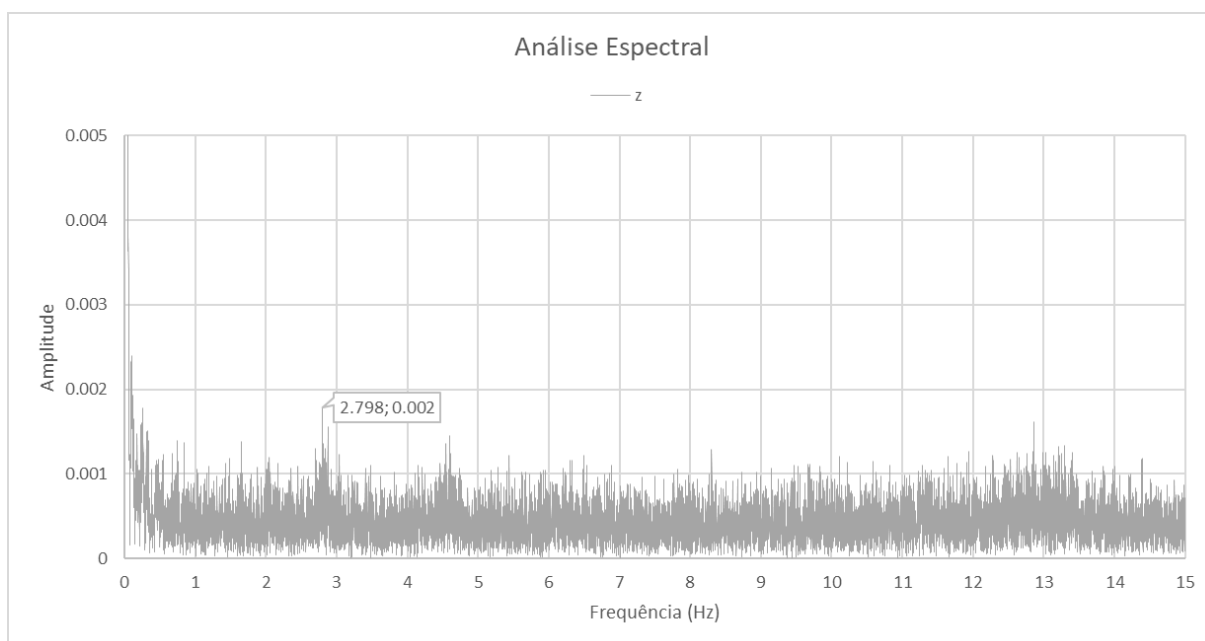
APÊNDICE H – ANÁLISES ESPECTRAIS ELABORADAS COM DADOS DO ARDUINO (F=30Hz)

Gráfico 155 - Análise espectral do sinal da componente x, y, z e do módulo da aceleração, da Ponte Cidade Universitária - Ponto A.



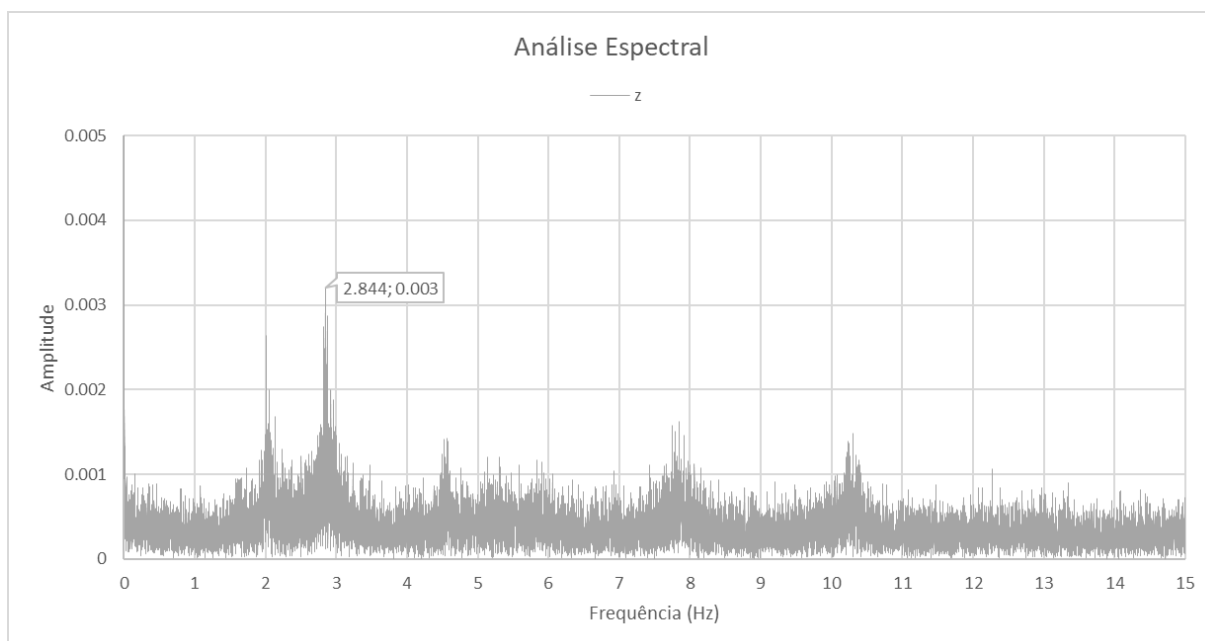
Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 156 - Análise espectral do sinal da componente z, da Ponte Cidade Universitária - Ponto B.



Fonte: Própria autoria (2019)

Gráfico 157 - Análise espectral do sinal da componente z, da Ponte Cidade Universitária - Ponto C.



Fonte: Própria autoria (2019)

APÊNDICE I – CÓDIGO PARA OBTENÇÃO DOS DADOS DO ARDUINO

```

1 //Programa: Arduino Acelerômetro por Bluetooth
2 //Autores: Otávio S. Godinho; Thiago S. K. Ferraz.
3
4 //Carrega as bibliotecas necessárias para o código
5 #include<Wire.h>
6 #include "I2Cdev.h"
7 #include "MPU6050.h"
8 #include <SoftwareSerial.h>
9
10 //Define os pinos para o qual será enviado os dados para a serial
    pelo Bluetooth
11 SoftwareSerial mySerial(11, 10); // RX, TX do HC-05
12
13 //Define os offsets (parâmetros iniciais) do sensor para calibra-lo
14 #define MPU6050_ACCEL_OFFSET_X -3109
15 #define MPU6050_ACCEL_OFFSET_Y 1093
16 #define MPU6050_ACCEL_OFFSET_Z 1585
17 #define MPU6050_GYRO_OFFSET_X 43
18 #define MPU6050_GYRO_OFFSET_Y 11
19 #define MPU6050_GYRO_OFFSET_Z 6
20
21 MPU6050 mpu;
22 //Define o endereço I2C do MPU6050
23 const int MPU = 0x68;
24
25 //Variáveis para armazenar valores lidos pelo sensor
26 int AcX, AcY, AcZ, Tmp, GyX, GyY, GyZ;
27
28 //Inicia a parte do código de inicialização dos instrumentos
29 void setup()
30 {
31     // Inicializa o serial e a transmissão dos dados
32     Serial.begin(9600); //Inicia a transmissão pela serial padrão(USB)
33     mySerial.begin(9600); //Inicia a transmissão pela serial Bluetooth
34     Wire.begin();
35     Wire.beginTransmission(MPU);
36     Wire.write(0x6B);
37
38     //Inicializa o MPU-6050
39     Wire.write(0);
40     Wire.endTransmission(true);
41     Wire.begin();
42     mpu.initialize();
43
44     //Implementa os parâmetros iniciais do sensor
45     mpu.setXAccelOffset(MPU6050_ACCEL_OFFSET_X);
46     mpu.setYAccelOffset(MPU6050_ACCEL_OFFSET_Y);

```

```

47  mpu.setZAccelOffset(MPU6050_ACCEL_OFFSET_Z);
48  mpu.setXGyroOffset(MPU6050_GYRO_OFFSET_X);
49  mpu.setYGyroOffset(MPU6050_GYRO_OFFSET_Y);
50  mpu.setZGyroOffset(MPU6050_GYRO_OFFSET_Z);
51  }
52
53  //Parte do código que irá rodar em loop realizando as leituras do
    sensor e enviado os dados por USB e por Bluetooth na frequência de
    10hz
54  void loop()
55  {
56      Wire.beginTransmission(MPU); //Iniciando a transmissão
57      Wire.write(0x3B); // Definindo o registrador que será utilizado
58      Wire.endTransmission(false);
59
60      //Solicita os dados do sensor
61      Wire.requestFrom(MPU, 14, true);
62
63      //Armazenando os valores lidos pelo arduino:
64      //Aceleração do eixo X, Y e Z
65      AcX = Wire.read() << 8 | Wire.read();
66      AcY = Wire.read() << 8 | Wire.read();
67      AcZ = Wire.read() << 8 | Wire.read();
68
69      //Rotação nos eixos X, Y e Z
70      GyX = Wire.read() << 8 | Wire.read();
71      GyY = Wire.read() << 8 | Wire.read();
72      GyZ = Wire.read() << 8 | Wire.read();
73
74      //Temperatura
75      Tmp = Wire.read() << 8 | Wire.read();
76
77      //Imprime os valores na serial padrão (USB)
78      Serial.print(""); Serial.print(AcX);
79      Serial.print("\t"); Serial.print(AcY);
80      Serial.print("\t"); Serial.println(AcZ);
81      Serial.print("\t"); Serial.print(GyX);
82      Serial.print("\t"); Serial.print(GyY);
83      Serial.print("\t"); Serial.print(GyZ);
84      Serial.print("\t"); Serial.println(Tmp/340.00+36.53);
85      //Conta necessária para a temperatura lida ser enviada em °C
86
87      //Imprime os valores na serial pelo Bluetooth
88      mySerial.print(""); mySerial.print(AcX);
89      mySerial.print("\t"); mySerial.print(AcY);
90      mySerial.print("\t"); mySerial.println(AcZ);
91      mySerial.print("\t"); mySerial.print(GyX);
92      mySerial.print("\t"); mySerial.print(GyY);
93      mySerial.print("\t"); mySerial.print(GyZ);

```

```
94    mySerial.print("\t"); mySerial.println(Tmp/340.00+36.53);  
95    //Conta necessária para a temperatura lida ser enviada em °C  
96  
97    //Aguarda 100 ms (f = 10hz) para ler novamente os valores  
98    delay(100);  
99 }
```

Variação do Código, para obtenção a 30Hz

```
97    //Aguarda 33 ms (f = 30hz) para ler novamente os valores  
98    delay(33);  
99 }
```

APÊNDICE J – CÓDIGO PARA REALIZAÇÃO DA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

```

1  ## Copyright (C) 2019 Otávio S. Godinho
2  ##
3  ## This program is free software; you can redistribute it and/or modify it
4  ## under the terms of the GNU General Public License as published by
5  ## the Free Software Foundation; either version 3 of the License, or
6  ## (at your option) any later version.
7  ##
8  ## This program is distributed in the hope that it will be useful,
9  ## but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of
10 ## MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the
11 ## GNU General Public License for more details.
12 ##
13 ## You should have received a copy of the GNU General Public License
14 ## along with this program. If not, see <http://www.gnu.org/licenses/>.
15
16 ## -*- texinfo -*-
17 ## @deftypefn {} {@var{retval} =} my_FFT (@var{input1}, @var{input2})
18 ##
19 ## @seealso{}
20 ## @end deftypefn
21
22 ## Author: Otávio S. Godinho <Otávio S. Godinho@DESKTOP-I60DPUV>
23 ## Created: 2019-09-08
24
25 function [S,frequency] = my_FFT (s, fs)
26
27 ## Lê os dados de aceleração, do arquivo csv, nomeado como A.csv, presente na
28 ## mesma pasta do arquivo do Octave
29 s=csvread('A.csv')
30 ## Transpoe a matriz
31 s=s'
32 normal=length(s);
33 aux=0:normal-1;
34 T=normal/fs;
35 frequency=aux/T;
36 ## Realiza a transformada rápida de Fourier
37 S=fftn(s)/normal;
38 fc=ceil(normal/2);
39 S=S(1:fc);
40 ## Plota o gráfico da análise espectral
41 figure();
42 plot(frequency(1:fc),abs(S));
43 title('Análise de Espectro');
44 xlabel('Frequência (Hz)');
45 ylabel('Amplitude');
46
47 ##utilizar o primeiro R para obter apenas as amplitudes e o segundo para a
48 ## frequência e amplitude

```

```
49 ##R=abs(S)
50 R=[frequency(1:fc);abs(S)]
51 csvwrite('B.csv',(R));
52
53 endfunction
54 ## Copyright (C) 2019 Otávio S. Godinho
```

APÊNDICE K – FICHAS DE MEDIÇÃO DE TRÁFEGO

LOCAL: Passarela de Pedestres - POLI

Data: 27/05/2019

Hora: 11:19:00

Tempo	Pedestre	Caminhando	Correndo	Pulando	Pedestres > 1
11:19:00	0	0	0	0	0
11:19:15	1	1	0	0	0
11:19:30	0	2	0	0	0
11:19:45	0	0	1	0	0
11:20:00	0	1	1	0	0
11:20:15	0	1	0	0	0
11:20:30	0	0	0	0	0
11:20:45	0	0	0	0	0
11:21:00	0	0	1	0	0
11:21:15	0	0	0	0	0
11:21:30	0	0	0	0	0
11:21:45	1	0	0	0	0
11:22:00	1	1	0	0	0
11:22:15	0	0	0	0	0
11:22:30	0	0	0	0	1
11:22:45	0	0	0	0	1
11:23:00	0	0	0	0	1
11:23:15	0	0	0	0	0
11:23:30	0	0	0	0	0
11:23:45	0	0	0	0	0
11:24:00	0	0	0	0	0
11:24:15	0	1	0	0	0
11:24:30	0	1	0	0	1
11:24:45	0	1	0	0	0
11:25:00	0	1	0	0	0
11:25:15	0	1	0	0	0
11:25:30	0	1	0	0	0
11:25:45	0	0	1	0	0
11:26:00	0	0	0	0	0
11:26:15	0	0	1	0	0
11:26:30	0	0	0	0	0
11:26:45	0	0	0	0	0
11:27:00	0	0	0	0	1
11:27:15	1	0	0	0	0
11:27:30	0	0	0	0	0
11:27:45	0	0	0	0	0
11:28:00	1	0	0	0	0
11:28:15	0	1	0	0	0
11:28:30	1	1	0	0	0
11:28:45	0	1	0	0	0
11:29:00	0	0	0	0	0

LOCAL: Ponte de Carros - POLI

Data: 27/05/2019

Hora: 12:38:00

Tempo	Carro	SUV	Caminhonete		
12:38:00	1	0	0	0	0
12:38:15	0	0	0	0	0
12:38:30	1	0	0	0	0
12:38:45	0	0	0	0	0
12:39:00	1	0	0	0	0
12:39:15	0	0	0	0	0
12:39:30	1	0	0	0	0
12:39:45	2	0	0	0	0
12:40:00	0	0	0	0	0
12:40:15	1	0	0	0	0
12:40:30	0	1	0	0	0
12:40:45	1	0	0	0	0
12:41:00	2	0	0	0	0
12:41:15	0	0	0	0	0
12:41:30	1	0	0	0	0
12:41:45	0	0	0	0	0
12:42:00	2	0	0	0	0
12:42:15	2	0	0	0	0
12:42:30	0	0	0	0	0
12:42:45	2	0	0	0	0
12:43:00	1	0	0	0	0
12:43:15	0	0	0	0	0
12:43:30	0	0	0	0	0
12:43:45	0	1	0	0	0
12:44:00	1	0	0	0	0
12:44:15	2	0	0	0	0
12:44:30	1	0	0	0	0
12:44:45	2	1	1	0	0
12:45:00	1	0	0	0	0
12:45:15	0	0	0	0	0
12:45:30	2	0	0	0	0
12:45:45	1	0	0	0	0
12:46:00	0	0	0	0	0
12:46:15	2	0	0	0	0
12:46:30	0	0	0	0	0
12:46:45	0	0	0	0	0
12:47:00	0	0	0	0	0
12:47:15	1	0	0	0	0
12:47:30	1	0	0	0	0
12:47:45	1	0	0	0	0
12:48:00	0	0	0	0	0

LOCAL: Ponte Av. Almeida Prado

Data: 27/05/2019

Hora: 13:02:00

Tempo	Carro	SUV	Caminhonete	Ônibus	Caminhão
13:02:00	3	0	0	0	0
13:02:15	0	0	0	0	0
13:02:30	2	0	0	0	0
13:02:45	2	0	0	0	0
13:03:00	2	0	0	0	0
13:03:15	4	0	0	0	0
13:03:30	3	0	0	1	0
13:03:45	4	0	0	0	0
13:04:00	3	1	0	0	0
13:04:15	2	0	0	1	0
13:04:30	0	1	0	1	0
13:04:45	2	0	0	0	0
13:05:00	2	1	0	0	0
13:05:15	3	1	0	0	0
13:05:30	5	0	0	0	0
13:05:45	1	1	0	0	0
13:06:00	0	1	0	0	0
13:06:15	3	0	0	0	0
13:06:30	4	0	0	0	0
13:06:45	2	0	0	0	0
13:07:00	2	1	0	0	0
13:07:15	2	0	0	0	0
13:07:30	0	1	0	0	0
13:07:45	1	1	0	0	0
13:08:00	4	0	0	1	0
13:08:15	3	0	0	0	0
13:08:30	5	0	0	0	0
13:08:45	2	0	0	0	0
13:09:00	2	0	0	0	0
13:09:15	0	0	0	0	0
13:09:30	4	1	0	1	0
13:09:45	2	0	0	0	0
13:10:00	0	1	0	0	0
13:10:15	3	0	0	0	0
13:10:30	6	0	0	0	0
13:10:45	2	1	0	0	0
13:11:00	1	1	1	0	1
13:11:15	2	0	0	1	0
13:11:30	4	0	0	0	1
13:11:45	4	0	2	0	0
13:12:00	0	0	0	0	0

LOCAL: Ponte Cidade Universitária - Ponto A

Data: 27/05/2019

Hora: 13:38:00

Tempo	Ônibus	Caminhão			
13:38:00	0	1	0	0	0
13:38:15	0	2	0	0	0
13:38:30	0	2	0	0	0
13:38:45	1	2	0	0	0
13:39:00	0	0	0	0	0
13:39:15	0	0	0	0	0
13:39:30	0	2	0	0	0
13:39:45	0	0	0	0	0
13:40:00	0	0	0	0	0
13:40:15	1	1	0	0	0
13:40:30	0	1	0	0	0
13:40:45	0	1	0	0	0
13:41:00	0	2	0	0	0
13:41:15	0	3	0	0	0
13:41:30	0	0	0	0	0
13:41:45	1	0	0	0	0
13:42:00	0	2	0	0	0
13:42:15	0	2	0	0	0
13:42:30	0	1	0	0	0
13:42:45	0	0	0	0	0
13:43:00	0	0	0	0	0
13:43:15	0	0	0	0	0
13:43:30	0	0	0	0	0
13:43:45	0	1	0	0	0
13:44:00	0	0	0	0	0
13:44:15	0	2	0	0	0
13:44:30	0	1	0	0	0
13:44:45	1	0	0	0	0
13:45:00	0	0	0	0	0
13:45:15	0	0	0	0	0
13:45:30	2	0	0	0	0
13:45:45	0	1	0	0	0
13:46:00	0	0	0	0	0
13:46:15	0	0	0	0	0
13:46:30	0	1	0	0	0
13:46:45	1	1	0	0	0
13:47:00	0	0	0	0	0
13:47:15	0	1	0	0	0
13:47:30	1	1	0	0	0
13:47:45	0	0	0	0	0
13:48:00	0	0	0	0	0

LOCAL: Ponte Cidade Universitária - Ponto B

Data: 27/05/2019

Hora: 13:51:00

Tempo	Ônibus	Caminhão			
13:51:00	0	0	0	0	0
13:51:15	0	1	0	0	0
13:51:30	0	1	0	0	0
13:51:45	0	0	0	0	0
13:52:00	0	2	0	0	0
13:52:15	0	0	0	0	0
13:52:30	0	0	0	0	0
13:52:45	0	0	0	0	0
13:53:00	0	0	0	0	0
13:53:15	1	0	0	0	0
13:53:30	0	5	0	0	0
13:53:45	0	0	0	0	0
13:54:00	0	1	0	0	0
13:54:15	0	0	0	0	0
13:54:30	0	0	0	0	0
13:54:45	0	1	0	0	0
13:55:00	0	2	0	0	0
13:55:15	0	0	0	0	0
13:55:30	0	0	0	0	0
13:55:45	0	1	0	0	0
13:56:00	0	0	0	0	0
13:56:15	1	1	0	0	0
13:56:30	0	0	0	0	0
13:56:45	0	0	0	0	0
13:57:00	0	0	0	0	0
13:57:15	0	1	0	0	0
13:57:30	0	1	0	0	0
13:57:45	0	0	0	0	0
13:58:00	1	0	0	0	0
13:58:15	0	0	0	0	0
13:58:30	0	0	0	0	0
13:58:45	1	0	0	0	0
13:59:00	0	0	0	0	0
13:59:15	0	0	0	0	0
13:59:30	0	0	0	0	0
13:59:45	0	0	0	0	0
14:00:00	0	0	0	0	0
14:00:15	0	0	0	0	0
14:00:30	0	1	0	0	0
14:00:45	0	2	0	0	0
14:01:00	0	0	0	0	0

LOCAL: Ponte Cidade Universitária - Ponto C

Data: 27/05/2019

Hora: 14:05:00

Tempo	Ônibus	Caminhão			
14:05:00	0	1	0	0	0
14:05:15	0	1	0	0	0
14:05:30	0	0	0	0	0
14:05:45	0	0	0	0	0
14:06:00	0	0	0	0	0
14:06:15	1	2	0	0	0
14:06:30	1	1	0	0	0
14:06:45	0	0	0	0	0
14:07:00	0	0	0	0	0
14:07:15	0	2	0	0	0
14:07:30	0	0	0	0	0
14:07:45	0	0	0	0	0
14:08:00	0	0	0	0	0
14:08:15	0	0	0	0	0
14:08:30	0	0	0	0	0
14:08:45	0	0	0	0	0
14:09:00	0	2	0	0	0
14:09:15	0	1	0	0	0
14:09:30	0	1	0	0	0
14:09:45	0	1	0	0	0
14:10:00	0	0	0	0	0
14:10:15	0	0	0	0	0
14:10:30	0	1	0	0	0
14:10:45	0	0	0	0	0
14:11:00	0	2	0	0	0
14:11:15	0	0	0	0	0
14:11:30	0	0	0	0	0
14:11:45	0	0	0	0	0
14:12:00	0	0	0	0	0
14:12:15	0	0	0	0	0
14:12:30	2	1	0	0	0
14:12:45	0	0	0	0	0
14:13:00	1	1	0	0	0
14:13:15	0	1	0	0	0
14:13:30	0	1	0	0	0
14:13:45	0	1	0	0	0
14:14:00	1	0	0	0	0
14:14:15	0	0	0	0	0
14:14:30	0	0	0	0	0
14:14:45	0	0	0	0	0
14:15:00	0	0	0	0	0

LOCAL: Ponte Cidade Universitária - Ponto A

Data: 12/09/2019

Hora: 11:26:00

Tempo	VUC	Ônibus	Toco	Truck	Betoneira
11:26:00	0	0	0	0	0
11:26:05	1	0	0	0	0
11:26:10	1	0	0	0	0
11:26:15	0	0	0	0	0
11:26:20	1	0	0	0	0
11:26:25	0	0	0	0	0
11:26:30	0	0	0	0	0
11:26:35	0	0	0	0	0
11:26:40	1	0	0	0	0
11:26:45	0	0	1	0	0
11:26:50	0	0	0	0	0
11:26:55	0	0	0	0	0
11:27:00	0	0	0	0	0
11:27:05	0	0	0	0	0
11:27:10	0	0	0	0	0
11:27:15	0	0	0	0	0
11:27:20	0	0	0	0	0
11:27:25	1	0	0	0	0
11:27:30	0	0	0	2	0
11:27:35	2	0	0	0	0
11:27:40	2	0	0	0	0
11:27:45	0	0	0	0	0
11:27:50	0	0	1	0	0
11:27:55	1	0	0	0	0
11:28:00	0	0	0	0	0
11:28:05	0	0	0	1	0
11:28:10	0	0	0	0	0
11:28:15	1	0	0	0	0
11:28:20	0	0	0	1	0
11:28:25	2	0	0	0	0
11:28:30	0	0	1	0	0
11:28:35	0	0	0	1	0
11:28:40	0	0	0	0	0
11:28:45	0	0	1	0	0
11:28:50	1	0	0	0	0
11:28:55	0	0	0	0	0
11:29:00	0	0	0	0	0
11:29:05	0	0	0	0	0
11:29:10	0	0	0	0	0
11:29:15	0	0	0	0	0
11:29:20	0	0	0	0	0
11:29:25	0	0	0	0	0
11:29:30	0	0	0	0	0

11:29:35	0	0	0	0	0
11:29:40	1	0	0	0	0
11:29:45	0	0	0	0	0
11:29:50	0	0	0	0	0
11:29:55	0	0	0	0	0
11:30:00	0	1	1	0	0
11:30:05	0	0	0	0	0
11:30:10	0	0	0	0	0
11:30:15	0	0	0	0	0
11:30:20	0	0	0	0	0
11:30:25	0	0	0	0	0
11:30:30	0	0	0	0	0
11:30:35	0	0	1	0	1
11:30:40	0	0	0	0	0
11:30:45	0	1	0	0	0
11:30:50	0	0	0	0	0
11:30:55	0	0	0	0	0
11:31:00	2	0	0	1	0
11:31:05	1	0	1	1	0
11:31:10	0	0	0	0	0
11:31:15	0	0	0	0	0
11:31:20	1	0	0	0	0
11:31:25	1	0	0	0	0
11:31:30	0	0	0	0	0
11:31:35	1	0	1	0	0
11:31:40	1	0	0	0	0
11:31:45	0	0	0	0	0
11:31:50	1	0	0	0	0
11:31:55	0	0	0	0	0
11:32:00	0	0	0	1	0
11:32:05	0	0	0	1	0
11:32:10	0	0	0	0	0
11:32:15	1	0	0	0	0
11:32:20	0	0	0	0	0
11:32:25	1	0	0	0	0
11:32:30	0	0	0	0	0
11:32:35	0	0	0	0	0
11:32:40	0	0	0	1	0
11:32:45	0	0	0	0	0
11:32:50	0	0	0	0	0
11:32:55	1	0	1	0	0
11:33:00	0	0	0	0	0
11:33:05	0	0	0	0	0
11:33:10	1	0	0	0	0
11:33:15	0	0	0	0	0
11:33:20	2	0	0	1	0

11:33:25	0	0	0	0	0
11:33:30	1	0	0	0	0
11:33:35	0	0	1	1	0
11:33:40	0	0	0	0	0
11:33:45	0	0	0	0	0
11:33:50	0	0	0	1	0
11:33:55	1	0	0	1	0
11:34:00	0	0	0	0	0
11:34:05	0	0	0	1	0
11:34:10	0	0	0	0	0
11:34:15	0	0	0	1	0
11:34:20	0	0	0	1	0
11:34:25	0	0	0	0	0
11:34:30	0	0	0	0	0
11:34:35	0	1	0	0	0
11:34:40	1	0	0	0	0
11:34:45	0	0	0	0	0
11:34:50	0	0	0	0	0
11:34:55	0	0	0	0	0
11:35:00	0	0	0	0	0
11:35:05	0	0	1	0	0
11:35:10	0	0	0	0	0
11:35:15	0	0	0	0	0
11:35:20	0	0	0	0	0
11:35:25	0	0	1	0	0
11:35:30	0	0	0	0	0
11:35:35	0	0	0	0	0
11:35:40	2	0	0	1	0
11:35:45	0	0	0	0	0
11:35:50	0	0	0	0	0
11:35:55	0	0	0	1	0
11:36:00	1	0	0	0	0
11:36:05	0	0	0	1	0
11:36:10	0	1	0	1	0
11:36:15	0	0	0	0	0
11:36:20	1	0	1	0	0
11:36:25	0	0	0	0	0
11:36:30	1	1	0	0	0
11:36:35	0	0	0	0	0
11:36:40	0	0	0	0	0
11:36:45	0	0	1	0	0
11:36:50	1	0	0	1	0
11:36:55	2	0	0	0	0
11:37:00	1	0	0	0	0
11:37:05	0	0	0	0	0

LOCAL: Ponte Cidade Universitária - Ponto B

Data: 12/09/2019

Hora: 11:46:00

Tempo	VUC	Ônibus	Toco	Truck	Betoneira
11:46:00	0	0	0	0	0
11:46:05	0	0	0	0	0
11:46:10	1	0	0	0	0
11:46:15	0	0	1	0	0
11:46:20	1	0	0	0	0
11:46:25	1	0	0	0	0
11:46:30	0	0	0	1	0
11:46:35	0	0	0	0	0
11:46:40	0	0	0	0	0
11:46:45	1	0	0	0	0
11:46:50	0	0	0	0	1
11:46:55	0	0	0	0	0
11:47:00	0	0	0	0	0
11:47:05	1	0	1	0	0
11:47:10	0	1	0	0	0
11:47:15	1	0	0	0	0
11:47:20	1	0	0	0	0
11:47:25	1	0	1	0	0
11:47:30	1	1	0	0	0
11:47:35	0	0	0	0	0
11:47:40	0	0	1	0	0
11:47:45	1	0	0	0	0
11:47:50	0	0	0	0	0
11:47:55	0	0	1	0	0
11:48:00	0	0	0	0	0
11:48:05	0	0	0	0	0
11:48:10	0	0	0	1	0
11:48:15	2	0	0	0	0
11:48:20	0	0	0	0	0
11:48:25	1	0	1	0	0
11:48:30	0	0	0	0	0
11:48:35	0	0	0	0	0
11:48:40	1	1	2	0	0
11:48:45	0	0	0	0	0
11:48:50	0	0	0	0	0
11:48:55	1	0	1	0	0
11:49:00	0	0	1	0	0
11:49:05	0	0	0	0	0
11:49:10	0	0	0	0	0
11:49:15	0	0	2	0	0
11:49:20	1	0	0	0	0
11:49:25	1	0	0	0	0
11:49:30	2	0	1	0	0

11:49:35	0	0	0	0	1
11:49:40	0	0	1	0	0
11:49:45	0	0	0	0	0
11:49:50	0	0	1	0	0
11:49:55	0	0	0	0	0
11:50:00	0	0	0	0	0
11:50:05	0	0		0	0
11:50:10	1	1	0	0	0
11:50:15	0	0	0	0	0
11:50:20	1	0	0	1	0
11:50:25	0	0	0	0	0
11:50:30	0	0	0	0	0
11:50:35	0	0	0	0	0
11:50:40	0	0	0	0	0
11:50:45	0	0	1	0	0
11:50:50	0	0	0	0	0
11:50:55	0	0	1	0	0
11:51:00	0	0	0	0	0
11:51:05	0	0	0	0	0
11:51:10	0	0	0	0	0
11:51:15	0	0	0	0	0
11:51:20	0	0	0	0	1
11:51:25	0	0	0	0	0
11:51:30	0	0	0	0	0
11:51:35	1	0	0	0	0
11:51:40	0	0	0	0	0
11:51:45	0	0	0	0	0
11:51:50	1	2	0	0	0
11:51:55	0	1	0	0	0
11:52:00	0	0	0	0	0
11:52:05	0	0	0	0	0
11:52:10	0	0	1	0	0
11:52:15	0	0	1	0	0
11:52:20	1	1	0	0	0
11:52:25	0	0	0	0	0
11:52:30	0	0	0	0	0
11:52:35	0	0	0	0	0
11:52:40	0	0	0	0	0
11:52:45	0	0	0	0	0
11:52:50	0	0	0	1	0
11:52:55	1	0	0	0	0
11:53:00	0	0	1	0	0
11:53:05	1	0	0	0	0
11:53:10	0	0	0	0	0
11:53:15	0	0	1	0	0
11:53:20	0	0	0	0	0

11:53:25	0	0	0	0	0
11:53:30	0	0	0	0	0
11:53:35	0	0	0	0	0
11:53:40	0	0	0	1	0
11:53:45	0	0	0	0	0
11:53:50	0	0	1	0	0
11:53:55	1	0	0	0	0
11:54:00	1	0	0	0	0
11:54:05	0	0	1	0	0
11:54:10	0	0	0	0	0
11:54:15	0	0	1	0	0
11:54:20	0	0	1	0	0
11:54:25	0	0	0	0	0
11:54:30	1	0	0	0	0
11:54:35	0	0	0	0	0
11:54:40	0	0	0	0	0
11:54:45	0	0	0	0	0
11:54:50	1	0	0	0	0
11:54:55	0	0	0	0	0
11:55:00	1	1	0	0	0
11:55:05	0	0	0	0	0
11:55:10	0	0	1	0	0
11:55:15	0	0	1	1	0
11:55:20	1	0	0	0	0
11:55:25	1	0	1	0	0
11:55:30	0	0	0	0	0
11:55:35	2	0	0	0	0
11:55:40	0	0	0	1	0
11:55:45	0	0	1	1	0
11:55:50	0	0	0	1	0
11:55:55	0	0	1	0	0
11:56:00	0	0	0	1	0
11:56:05	1	0	0	0	0
11:56:10	0	0	0	0	0
11:56:15	0	0	0	0	0
11:56:20	2	0	0	0	0
11:56:25	0	0	0	0	0
11:56:30	0	0	0	0	0
11:56:35	1	0	0	0	0
11:56:40	0	0	0	0	1
11:56:45	0	0	0	0	0
11:56:50	0	0	0	0	0
11:56:55	0	0	0	1	0
11:57:00	0	0	0	0	1
11:57:05	0	0	0	1	0
11:57:10	0	0	0	0	0

LOCAL: Ponte Cidade Universitária - Ponto C

Data: 12/09/2019

Hora: 12:03:00

Tempo	VUC	Ônibus	Toco	Truck	Betoneira
12:03:00	0	0	0	1	0
12:03:05	0	0	0	0	0
12:03:10	0	0	0	0	0
12:03:15	0	0	0	0	0
12:03:20	0	0	0	0	0
12:03:25	0	0	0	0	0
12:03:30	0	0	0	0	0
12:03:35	0	0	0	1	0
12:03:40	0	0	1	0	0
12:03:45	0	0	1	1	0
12:03:50	1	0	1	1	0
12:03:55	0	0	0	0	0
12:04:00	0	0	1	0	0
12:04:05	1	0	0	0	0
12:04:10	0	0	1	0	0
12:04:15	0	0	1	1	0
12:04:20	0	0	1	0	0
12:04:25	1	0	0	0	0
12:04:30	0	0	0	0	0
12:04:35	0	0	1	0	0
12:04:40	0	0	0	1	0
12:04:45	0	0	0	1	0
12:04:50	0	0	1	0	0
12:04:55	1	0	1	0	0
12:05:00	0	0	0	0	0
12:05:05	0	0	2	0	0
12:05:10	0	0	1	0	0
12:05:15	0	0	0	0	0
12:05:20	0	1	0	0	0
12:05:25	0	0	0	0	0
12:05:30	0	0	0	0	0
12:05:35	0	0	0	1	0
12:05:40	1	1	0	0	0
12:05:45	0	0	0	0	0
12:05:50	0	0	0	0	0
12:05:55	0	0	1	1	0
12:06:00	0	0	1	0	0
12:06:05	0	0	0	0	0
12:06:10	0	0	0	0	0
12:06:15	0	0	0	0	0
12:06:20	0	0	0	1	0
12:06:25	0	0	0	0	0
12:06:30	0	0	1	0	0

12:06:35	0	0	0	0	0
12:06:40	1	0	1	0	0
12:06:45	0	0	2	1	0
12:06:50	0	0	0	0	0
12:06:55	0	0	0	0	0
12:07:00	1	0	0	1	0
12:07:05	0	0	0	0	0
12:07:10	0	1	0	1	0
12:07:15	0	0	0	0	0
12:07:20	0	0	0	0	0
12:07:25	0	0	0	0	0
12:07:30	0	0	1	0	0
12:07:35	0	0	0	0	0
12:07:40	0	0	0	0	0
12:07:45	0	0	0	0	0
12:07:50	0	0	0	0	0
12:07:55	0	0	1	1	0
12:08:00	0	0	0	0	0
12:08:05	0	0	0	0	0
12:08:10	0	0	0	0	0
12:08:15	0	0	0	0	0
12:08:20	0	0	0	0	0
12:08:25	0	1	0	0	0
12:08:30	0	0		1	0
12:08:35	0	0	0	0	0
12:08:40	0	0	0	0	0
12:08:45	0	0	0	0	0
12:08:50	0	0	0	0	0
12:08:55	0	0	0	0	0
12:09:00	0	0	0	0	0
12:09:05	0	0	0	0	0
12:09:10	0	0	1	0	0
12:09:15	0	0	0	1	0
12:09:20	0	0	0	1	0
12:09:25	0	0	0	0	0
12:09:30	1	0	0	0	0
12:09:35	1	0	1	0	0
12:09:40	0	0	0	0	0
12:09:45	0	0	0	0	0
12:09:50	0	0	0	1	0
12:09:55	0	0	0	0	0
12:10:00	0	0	0	0	0
12:10:05	0	0	0	0	0
12:10:10	0	0	0	1	0
12:10:15	0	0	1	0	0
12:10:20	0	0	0	0	0

12:10:25	0	0	0	0	0
12:10:30	0	0	0	0	0
12:10:35	0	0	0	0	0
12:10:40	0	0	0	0	0
12:10:45	1	0	0	0	0
12:10:50	0	0	0	0	0
12:10:55	0	0	0	0	0
12:11:00	0	1	0	0	0
12:11:05	1	0	0	1	0
12:11:10	0	1	0	0	0
12:11:15	0	0	0	0	0
12:11:20	0	0	1	1	0
12:11:25	0	0	0	0	0
12:11:30	0	0	0	0	0
12:11:35	0	0	0	1	0
12:11:40	0	0	2	1	0
12:11:45	0	0	0	1	0
12:11:50	0	0	0	1	0
12:11:55	0	0	1	0	0
12:12:00	0	0	0	0	0
12:12:05	0	0	1	0	0
12:12:10	0	0	0	0	0
12:12:15	0	0	0	0	0
12:12:20	0	0	0	0	1
12:12:25	1	0	0	0	0
12:12:30	0	0	0	0	0
12:12:35	0	0	0	0	0
12:12:40	0	0	1	0	0
12:12:45	1	0	0	0	0
12:12:50	0	1	0	0	0
12:12:55	0	0	0	1	0
12:13:00	0	0	0	0	0
12:13:05	0	0	0	0	0
12:13:10	1	0	0	0	0
12:13:15	0	0	0	0	0
12:13:20	0	0	0	0	0
12:13:25	0	0	0	0	0
12:13:30	0	0	0	1	0
12:13:35	0	0	0	0	0
12:13:40	0	0	0	1	0
12:13:45	0	0	0	0	0
12:13:50	0	0	0	0	0
12:13:55	0	0	1	0	0
12:14:00	0	0	0	0	0
12:14:05	0	0	0	0	0
12:14:10	0	0	0	0	0

12:14:15	1	0	0	0	0
12:14:20	0	0	0	0	0
12:14:25	0	0	1	0	0
12:14:30	0	0	0	1	0
12:14:35	0	0	0	0	0
12:14:40	0	0	0	0	0
12:14:45	1	0	0	0	0
12:14:50	0	0	0	0	0
12:14:55	0	0	0	0	0
12:15:00	0	0	0	1	0
12:15:05	0	0	0	0	0
12:15:10	0	1	0	0	0
12:15:15	0	0	0	2	0
12:15:20	0	0	0	0	0
12:15:25	1	0	0	0	0
12:15:30	0	0	0	0	0
12:15:35	0	0	0	1	0
12:15:40	1	0	0	0	0
12:15:45	1	0	0	0	0
12:15:50	1	0	0	0	0
12:15:55	1	0	0	0	0
12:16:00	0	0	0	0	0
12:16:05	0	0	0	1	0
12:16:10	0	0	0	0	0
12:16:15	0	0	0	0	0
12:16:20	0	0	0	0	0
12:16:25	1	0	0	0	0
12:16:30	0	0	0	0	0
12:16:35	1	0	0	0	0
12:16:40	0	0	0	0	0
12:16:45	1	0	1	0	0
12:16:50	0	0	1	0	0
12:16:55	0	0	0	0	0
12:17:00	0	0	1	0	0
12:17:05	0	0	0	0	0
12:17:10	0	0	0	0	0
12:17:15	0	0	0	1	0
12:17:20	0	0	0	0	0
12:17:25	0	0	0	0	0
12:17:30	1	0	0	0	0
12:17:35	1	0	0	0	0
12:17:40	0	0	0	1	1
12:17:45	0	0	0	0	0
12:17:50	0	0	0	0	0
12:17:55	0	0	0	0	0
12:18:00	0	0	0	0	0

12:18:05	0	0	0	0	0
12:18:10	0	0	0	0	0
12:18:15	1	0	1	0	0
12:18:20	1	0	0	0	0
12:18:25	0	0	0	0	0
12:18:30	0	0	0	0	0
12:18:35	0	0	0	0	0
12:18:40	0	0	0	0	0
12:18:45	1	0	0	0	0
12:18:50	0	0	0	0	0
12:18:55	0	0	1	0	0
12:19:00	0	0	0	0	0
12:19:05	0	0	0	0	0