

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

Área de concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente

Tese de Doutorado

AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO ESTRUTURAL DE DANOS
EM PONTES ATRAVÉS DE DADOS DE VIBRAÇÃO

Jorge Dalmas Braido

Passo Fundo

2021



CIP – Catalogação na Publicação

B814a Braido, Jorge Dalmas
Avaliação da condição estrutural de danos em pontes
através de dados de vibração / Jorge Dalmas Braido. – 2022.
277 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Zacarias Martin Chamberlain
Pravia.

Tese (Doutor em Engenharia) – Universidade de Passo
Fundo, 2022.

1. Pontes - Análise. 2. Pontes - Estruturas. 3. Calibração.
4. Smartphones. I. Chamberlain Pravia, Zacarias Martin,
orientador. II. Título.

CDU: 624.27

Catálogo: Bibliotecário Luís Diego Dias de S. da Silva – CRB 10/2241

Universidade de Passo Fundo
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
e Ambiental

Jorge Dalmas Braido

AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO ESTRUTURAL DE
DANOS EM PONTES ATRAVÉS DE DADOS DE
VIBRAÇÃO

Passo Fundo

2022

Jorge Dalmas Braido

Avaliação da condição estrutural de danos em pontes através de dados experimentais de vibração

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia, sob a orientação do Prof. Dr. Zacarias Martin Chamberlain Pravia.

Professor Doutor Zacarias Martin Chamberlain Pravia

Orientador

Universidade de Passo Fundo - UPF

Professor Doutor Moacir Kripka

Universidade de Passo Fundo - UPF

Professor Doutor Francisco Dalla Rosa

Universidade de Passo Fundo – UPF

Professor Doutor Francisco de Assis das Neves

Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP

Professor Doutor Inácio Benvegno Morsch

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é resultado também da participação de outras pessoas. Por isso, de forma especial:

Agradeço aos meus pais pela confiança durante o desenvolvimento deste trabalho;

Agradeço ao meu irmão, Rafael, pela disponibilidade em auxiliar-me durante as visitas aos viadutos;

Agradeço ao Prof. Zacarias por orientar-me durante este trabalho e por sua amizade;

Agradeço ao Prof. Francisco Dalla Rosa pelo auxílio em atividades executadas nos laboratórios;

Agradeço ao Matheus Carini;

Agradeço à banca examinadora pelas contribuições realizadas;

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – PPGEng – da Universidade de Passo Fundo;

Agradeço aos demais que contribuíram para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

O surgimento de danos em estruturas é considerado um fenômeno decorrente da ação de vários fatores. Em Obras de Arte Especiais, a correta identificação, análise e avaliação geralmente é realizada a partir das observações através da inspeção visual. Porém, esta metodologia apresenta falhas conhecidas, como a capacidade de reconhecer apenas danos aparentes. Uma alternativa é o uso do Monitoramento da Saúde Estrutural – *SHM* -, que abrange a inspeção visual e define parâmetros dinâmicos da vibração. As propriedades resultantes descrevem o comportamento dinâmico da estrutura como a frequência natural, forma modal e taxas de amortecimento e consideram também a magnitude das acelerações pico-a-pico. Este trabalho apresenta uma metodologia que inclui fases experimental e numérica compostas pela criação de modelos numéricos através de modelos em elementos finitos, processamento de amostras de aceleração, as quais são extraídas por um celular, correção de taxa de amostragem, calibração do dispositivo de aceleração e definição de índices de dano que consideram a magnitude da aceleração e as variações da frequência. Foca principalmente na avaliação da condição da estrutura através de mais de um indicador de dano. Utilizam-se três estudos de caso localizados na cidade de Passo Fundo: dois viadutos e uma viga T, todos em concreto armado. Os resultados obtidos apresentam que é possível avaliar a condição das pontes em concreto armado criadas a partir do sistema estrutural formado por duas longarinas e tabuleiro em balanço instaladas no Brasil a partir de 1940. Além disso, indica a possibilidade de utilizar mais de um parâmetro definidor de dano.

Palavras-chave: Aceleração; Smartphone; Calibração; Monitoramento da infraestrutura; Pontes

ABSTRACT

Damages are considered a phenomenon which has more than one source in structures. On bridges, visual inspection is the main source of data and helps to identify, analyze and assess the structures' actual condition. Although, this procedure has faults already known as the capacity to discover only apparent damages. Structural Health Monitoring, also known as *SHM*, shows visual inspection as the first investigation procedure on the methodology. To overcome this negative characteristic, usually natural frequencies, modal shapes damping rates, peak-to-peak acceleration are used to describe the structural dynamic behavior. This research has experimental and numerical phases which are composed by finite element models, acceleration samples extracted through a cell phone, sampling rates correction, smartphone calibration, damage indexes which considers the peak-to-peak acceleration magnitude and natural frequency variation. The main focus is to assess the structural condition from more than one damage indicator. Study cases are two bridges, in Passo Fundo/RS, and one T cross-section beam in reinforced concrete. Results shows that is possible to assess the Brazilian concrete bridges formed by two cantilever girders and deck installed on the highway system since 1940. Moreover, shows the necessity to use more than one damage index to define damages.

Key-words: Acceleration; Smartphone; Calibration; Infrastructure's monitoring; Bridges

Sumário de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1: Seção transversal padrão das pontes no Brasil | 29 |
| Figura 2: Modelo geral das pontes brasileiras | 30 |
| Figura 3: Distribuição de GVW para os agrupamentos dominantes. | 31 |
| Figura 4: Eflorescência | 36 |
| Figura 5: Reação álcali-sílica | 37 |
| Figura 6: Sequência de inspeção segundo o caminho das cargas | 41 |
| Figura 7: Hierarquia do <i>SHM</i> para pontes | 44 |
| Figura 8: Representação do desbalanceamento de motores acoplados a uma estrutura..... | 45 |
| Figura 9: Tipos de desequilíbrio | 47 |
| Figura 10: Posição dos sensores para conhecer as formas modais..... | 49 |
| Figura 11: Formas de amortecimento | 50 |
| Figura 12: Amortecimento para pontes contínuas e em arco | 52 |
| Figura 13: Amortecimento para pontes em pórticos rígidos e estaiadas | 52 |
| Figura 14: Amortecimento para pontes simplesmente apoiadas e suspensas | 52 |
| Figura 15: Amortecimento de 43 passarelas no Reino Unido..... | 54 |
| Figura 16: Identificação da frequência através do método Peak Picking..... | 56 |
| Figura 17: Pontos de meia potência para definição do amortecimento | 56 |
| Figura 18: Decaimento Logarítmico | 57 |
| Figura 19: Guia para a escolha do N de acordo com o amortecimento | 58 |
| Figura 20: Densidade espectral dos valores singulares | 63 |
| Figura 21: Diagrama de estabilização | 64 |
| Figura 22: Aceleração pico-a-pico..... | 66 |
| Figura 23: Máxima aceleração pico-a-pico em relação ao índice de dano DI..... | 67 |
| Figura 24: <i>DI</i> e danos em pontes | 68 |
| Figura 25: Próxima geração de sensores para o <i>SHM</i> | 73 |
| Figura 26: Sistema de gerenciamento de pontes com o uso de smartphones..... | 74 |
| Figura 27: Orientação dos eixos do sistema de coordenadas do Android | 77 |
| Figura 28: Método de calibração | 79 |
| Figura 29: Calibração - posições positivas. | 80 |
| Figura 30: Calibração - posições negativas..... | 81 |
| Figura 31 Ângulos Pitch e Roll | 83 |
| Figura 32: ângulos dos inclinômetros <i>MEMS</i> | 85 |

| | |
|---|-----|
| Figura 33: Registro do amortecimento ao longo do tempo | 91 |
| Figura 34: Influência do dano sobre as propriedades dinâmicas | 91 |
| Figura 35 : Funcionamento do filtro Butterworth..... | 93 |
| Figura 36: Magnitude da resposta do Filtro Butterworth com relação a ordem K..... | 93 |
| Figura 37: Separação da amostra através do <i>RDT</i> | 94 |
| Figura 38: Dimensões do elemento da malha a ser evitado | 99 |
| Figura 39: Viaduto V1 | 101 |
| Figura 40: Dimensões do viaduto V1 | 102 |
| Figura 41: Viaduto V2. | 103 |
| Figura 42: Dimensões do viaduto V2 | 103 |
| Figura 43: Viga T | 104 |
| Figura 44: Dimensões da viga T..... | 105 |
| Figura 45: Acelerômetro <i>WitMotion</i> | 107 |
| Figura 46: Acelerômetro ST | 108 |
| Figura 47: Propriedades do motor de vibração..... | 109 |
| Figura 48: Massa adicionada ao eixo central do motor | 110 |
| Figura 49: Peças para a calibração..... | 110 |
| Figura 50: Elemento SHELL181 | 112 |
| Figura 51: SOLID 185 | 114 |
| Figura 52: Máquina de corte | 116 |
| Figura 53: Viga T | 116 |
| Figura 54: Posição dos acelerômetros na fase de inserção de danos | 117 |
| Figura 55: Locais da inserção de danos..... | 117 |
| Figura 56: Regressão linear | 126 |
| Figura 57: Viaduto V1 - Modelo numérico | 127 |
| Figura 58: Restrições onde se localizam os pilares..... | 128 |
| Figura 59: Restrição nas transversinas de extremidade | 128 |
| Figura 60: Malha de uma transversina em V1 | 130 |
| Figura 61: Malha nas regiões de encontro entre longarinas e transversinas em V1 | 130 |
| Figura 62: Malha do tabuleiro e de uma transversina em V1..... | 131 |
| Figura 63: Amostras 1 a 8 após a aplicação do filtro Butterworth | 132 |
| Figura 64: <i>RDT</i> resultante das amostras 1 a 8 | 133 |
| Figura 65: <i>FFT</i> das amostras 1 a 8 | 133 |
| Figura 66: Amostras 9 a 16 após a passagem do filtro Butterworth..... | 135 |

| | |
|---|-----|
| Figura 67: <i>RDT</i> resultante - Amostras 9 a 16 | 135 |
| Figura 68: <i>FFT</i> resultante das amostras 9 a 16..... | 136 |
| Figura 69: Amostras 17 a 22 após a passagem do filtro Butterworth..... | 137 |
| Figura 70: <i>RDT</i> resultante - Amostras 17 a 22 | 138 |
| Figura 71: <i>FFT</i> resultante – amostras 17 a 22..... | 138 |
| Figura 72: <i>FFT</i> resultante das amostras extraídas as L/3 de V1 | 140 |
| Figura 73: Diagrama de estabilização - Amostra 1 | 142 |
| Figura 74: Densidade espectral dos valores singulares - V1 | 143 |
| Figura 75: Viaduto V2 - Modelo numérico | 144 |
| Figura 76: Malha em uma transversina de entrada em V2 | 145 |
| Figura 77: Malha nas regiões de encontro entre longarinas e transversinas em V2 | 146 |
| Figura 78: Malha do tabuleiro e de uma transversina em V2..... | 146 |
| Figura 79: Amostras 75 a 81 após a aplicação do filtro Butterworth | 148 |
| Figura 80: <i>RDT</i> resultante - amostras 75 a 81..... | 149 |
| Figura 81: <i>FFT</i> resultante – amostras 75 a 81..... | 149 |
| Figura 82: Amostras 82 a 87 após a aplicação do filtro Butterworth | 150 |
| Figura 83: <i>RDT</i> resultante - amostras 82 a 87..... | 151 |
| Figura 84: <i>FFT</i> resultante - amostras 82 a 87 | 151 |
| Figura 85: Amostras 88 a 94 após a aplicação do filtro Butterworth | 153 |
| Figura 86: <i>RDT</i> resultante - amostras 88 a 94..... | 153 |
| Figura 87: <i>FFT</i> resultante - amostras 88 a 94 | 154 |
| Figura 88: <i>FFT</i> das amostras extraídas em L/3 de V2..... | 155 |
| Figura 89: Diagrama de estabilização - amostra 75 | 157 |
| Figura 90: Densidade espectral dos valores singulares – V2 | 158 |
| Figura 91: Flecha da viga - BEAM189..... | 160 |
| Figura 92: Modelo numérico da viga T – SHELL181 | 161 |
| Figura 93: Restrição aplicada à viga | 161 |
| Figura 94: Malha do modelo de casca da viga T | 162 |
| Figura 95: Forma modal associada à frequência numérica de flexão – modelo de casca | 163 |
| Figura 96: Modelo numérico da viga T – SOLID185..... | 163 |
| Figura 97: Malha do modelo sólido da viga T | 164 |
| Figura 98: Forma modal associada à frequência numérica de flexão – modelo sólido | 165 |

| | |
|---|-----|
| Figura 99: Localização dos danos na viga T | 166 |
| Figura 100: Resposta obtida pelo <i>iDynamics</i> - Viga T | 167 |
| Figura 101: Resultado experimental preliminar - Viga T: <i>ST Microelectronics</i> | 168 |
| Figura 102: <i>FFT</i> resultante - amostra 149 | 169 |
| Figura 103: <i>FFT</i> resultate das amostras da viga T – acelerômetro <i>WitMotion</i> | 170 |
| Figura 104: Danos inseridos na viga à metade do vão..... | 171 |
| Figura 105: Diagrama de estabilização - amostra 147 | 181 |
| Figura 106: Densidade espectral dos valores singulares – Viga T | 183 |
| Figura 107: Distribuição normal da frequência antes dos danos - <i>Vibration Alarm</i> . 193 | |
| Figura 108: Distribuição normal da frequência antes dos danos - <i>WitMotion</i> | 193 |
| Figura 109: Distribuição normal da frequência após os danos - <i>Vibration Alarm</i> | 195 |
| Figura 110: Distribuição normal da frequência após os danos - <i>WitMotion</i> | 195 |
| Figura 111: Distribuição normal da frequência após os danos – <i>SSI-DATA</i> | 196 |
| Figura 112: Distribuição normal da frequência após os danos – <i>SSI-COV</i> | 196 |
| Figura 113: Distribuição normal da frequência após os danos – <i>EFDD</i> | 197 |
| Figura 114: Armadura utilizada na Viga T | 236 |
| Figura 115: V1 - Manchas de umidade | 269 |
| Figura 116: V1 – Indicativo de eflorescência | 269 |
| Figura 117: V2 - Manchas de percolação e armaduras expostas no tabuleiro | 273 |
| Figura 118: V2 - Eflorescência e corrosão no tabuleiro | 274 |
| Figura 119: V2 - Eflorescência | 274 |
| Figura 120: V2 - Erosão em um dos taludes | 275 |

Sumário de Tabelas

| | |
|--|-----|
| Tabela 1: Ocorrência de danos em elementos estruturais | 32 |
| Tabela 2: Danos e incidências em OAEs de concreto | 32 |
| Tabela 3: Casos, causas e duração dos danos em pontes | 33 |
| Tabela 4: Amortecimento material de diferentes materiais | 50 |
| Tabela 5: Amortecimento para pontes de acordo com o material e a tipologia | 53 |
| Tabela 6: Amortecimento das pontes de acordo com o tipo estrutural | 53 |
| Tabela 7: Valores comuns do amortecimento para passarelas | 55 |
| Tabela 8: Níveis de dano em função do índice de vibração V | 65 |
| Tabela 9: Aplicações de acordo com o acelerômetro | 71 |
| Tabela 10: Propriedades dos acelerômetros | 108 |
| Tabela 11: Relação frequência e potência do motor | 109 |
| Tabela 12: Propriedades aplicadas aos modelos numéricos dos viadutos | 113 |
| Tabela 13 : Propriedades aplicadas aos modelos numéricos da viga T | 114 |
| Tabela 14: Intervalos das taxas de amostragens | 124 |
| Tabela 15: Calibração do smartphone com o PCB Piezotronics 356A01 | 125 |
| Tabela 16: Aspect ratio – V1 | 129 |
| Tabela 17: Resultado numérico do viaduto V1 | 129 |
| Tabela 18: Resultados experimentais obtidos para V1 - Amostras 1 a 8 | 132 |
| Tabela 19: Resultados experimentais obtidos para V1 - Amostras 9 a 16 | 134 |
| Tabela 20: Resultados experimentais obtidos para V1 - Amostras 17 a 22 | 137 |
| Tabela 21: Resultados experimentais obtidos para V1 – Amostras 69 a 74 | 139 |
| Tabela 22: Valores de amortecimento e frequência natural para V1 | 140 |
| Tabela 23: Resultados <i>SSI-COV</i> e <i>SSI-DATA</i> - Viaduto V1 | 141 |
| Tabela 24: Resultados <i>EFDD</i> - Viaduto V1 | 143 |
| Tabela 25: Aspect ratio – V2 | 145 |
| Tabela 26: Viaduto V2 - resultados do modelo numérico | 145 |
| Tabela 27: Resultados experimentais obtidos para V2 - Amostras 75 a 81 | 148 |
| Tabela 28: Resultados experimentais obtidos para V2 - Amostras 82 a 87 | 150 |
| Tabela 29: Resultados experimentais obtidos para V2 - Amostras 88 a 94 | 152 |
| Tabela 30: Resultados experimentais obtidos para V2 - Amostras 141 a 146 | 155 |
| Tabela 31: Valores de amortecimento e frequência natural para V2 | 156 |
| Tabela 32: Resultados <i>SSI-COV</i> e <i>SSI-DATA</i> - Viaduto 2 | 156 |
| Tabela 33 : Resultados <i>EFDD</i> - Viaduto V2 | 158 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 34: Frequências naturais analíticas | 159 |
| Tabela 35: Flechas obtidas para os modelos criados..... | 160 |
| Tabela 36: Resultados numéricos do modelo de casca - Viga T | 162 |
| Tabela 37: Resultados numéricos do modelo sólido - Viga T | 164 |
| Tabela 38: Respostas obtidas pelo <i>iDynamics</i> | 166 |
| Tabela 39: Resultados experimentais preliminares - Viga T | 167 |
| Tabela 40: Resultados experimentais da viga T – <i>Vibration Alarm</i> | 169 |
| Tabela 41 : Resultados experimentais da viga T - o acelerômetro <i>WitMotion</i> | 170 |
| Tabela 42: L/2 -Resultados após inserir o corte de 2 mm – <i>Vibration Alarm</i> | 172 |
| Tabela 43: L/2 -Resultados após inserir o corte de 4 mm – <i>Vibration Alarm</i> | 172 |
| Tabela 44: L/2 -Resultados após inserir o corte de 5 mm – <i>Vibration Alarm</i> | 173 |
| Tabela 45: L/3 -Resultados após inserir o corte de 2 mm - <i>Vibration Alarm</i> | 173 |
| Tabela 46: L/3 -Resultados após inserir o corte de 4 mm – <i>Vibration Alarm</i> | 173 |
| Tabela 47: L/3 -Resultados após inserir o corte de 5 mm – <i>Vibration Alarm</i> | 174 |
| Tabela 48: 3L/4 - Resultados após inserir o corte de 2 mm – <i>Vibration Alarm</i> | 174 |
| Tabela 49: 3L/4 - Resultados após inserir o corte de 4 mm – <i>Vibration Alarm</i> | 175 |
| Tabela 50: 3L/4 - Resultados após inserir o corte de 5mm – <i>Vibration Alarm</i> | 175 |
| Tabela 51: Média das frequências naturais e amortecimento após danos – <i>Vibration Alarm</i> | 176 |
| Tabela 52: L/2 - Resultados após inserir o corte de 2 mm - <i>WitMotion</i> | 176 |
| Tabela 53: L/2 - Resultados após inserir o corte de 4mm - <i>WitMotion</i> | 177 |
| Tabela 54: L/2 - Resultados após inserir o corte de 5 mm - <i>WitMotion</i> | 177 |
| Tabela 55: L/3 - Resultados após inserir o corte de 2mm - <i>WitMotion</i> | 178 |
| Tabela 56: L/3 - Resultados após inserir o corte de 4 mm - <i>WitMotion</i> | 178 |
| Tabela 57: L/3 - Resultados após inserir o corte de 5 mm - <i>WitMotion</i> | 178 |
| Tabela 58: 3L/4 - Resultados após inserir o corte de 2 mm - <i>WitMotion</i> | 179 |
| Tabela 59: 3L/4 - Resultados após inserir o corte de 4 mm - <i>WitMotion</i> | 179 |
| Tabela 60: 3L/4 - Resultados após inserir o corte de 5 mm - <i>WitMotion</i> | 180 |
| Tabela 61: Média das frequências naturais e amortecimento após danos – <i>WitMotion</i> | 180 |
| Tabela 62: Resultados <i>SSI-COV</i> e <i>SSI-DATA</i> - Viga T | 181 |
| Tabela 63: Resultados <i>EFDD</i> – Viga T..... | 183 |
| Tabela 64: Médias da frequência natural e do amortecimento para a viga T antes do dano..... | 192 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 65: Médias da frequência natural e do amortecimento para a viga T após os danos | 194 |
| Tabela 66: Valores médios obtidos para os danos inseridos em L/2 – <i>Vibration Alarm</i> | 200 |
| Tabela 67: Valores médios obtidos para os danos inseridos em L/3 – <i>Vibration Alarm</i> | 202 |
| Tabela 68: Valores médios obtidos para os danos inseridos em 3L/4 – <i>Vibration Alarm</i> | 204 |
| Tabela 69: Valores médios obtidos para os danos inseridos em L/2 - <i>WitMotion</i> ... | 206 |
| Tabela 70: Valores médios obtidos para os danos inseridos em L/3 – <i>WitMotion</i> .. | 208 |
| Tabela 71: Valores médios obtidos para os danos inseridos em 3L/4 - <i>WitMotion</i> . | 209 |
| Tabela 72: Traço de cimento utilizado..... | 235 |
| Tabela 73: Traço utilizado para a viga T | 236 |
| Tabela 74: Propriedades do acelerômetro PCB Piezotronics | 237 |
| Tabela 75: Resultados experimentais obtidos para V1 - Amostras 23 a 28..... | 241 |
| Tabela 76: Resultados experimentais obtidos para V1 - Amostras 29 a 34..... | 242 |
| Tabela 77: Resultados experimentais obtidos para V1 - Amostras 35 a 40..... | 243 |
| Tabela 78: Resultados experimentais obtidos para V1 – Amostras 41 a 46..... | 244 |
| Tabela 79: Resultados experimentais obtidos para V1 – Amostras 47 a 52 | 245 |
| Tabela 80: Resultados experimentais obtidos para V1 – Amostras 53 a 58 | 246 |
| Tabela 81: Resultados experimentais obtidos para V1 – Amostras 59 a 63 | 247 |
| Tabela 82: Resultados experimentais obtidos para V1 – Amostras 64 a 68 | 248 |
| Tabela 83: Resultados experimentais obtidos para V2 - Amostras 95 a 100..... | 249 |
| Tabela 84: Resultados experimentais obtidos para V2 - Amostras 101 a 106..... | 250 |
| Tabela 85: Resultados experimentais obtidos para V2 - Amostras 107 a 112..... | 251 |
| Tabela 86: Resultados experimentais obtidos para V2 - Amostras 113 a 118..... | 252 |
| Tabela 87: Resultados experimentais obtidos para V2 - Amostras 119 a 124..... | 253 |
| Tabela 88: Resultados experimentais obtidos para V2 - Amostras 125 a 130..... | 254 |
| Tabela 89: Resultados experimentais obtidos para V2 - Amostras 131 a 135..... | 255 |
| Tabela 90: Resultados experimentais obtidos para V2 - Amostras 136 a 140..... | 256 |
| Tabela 91: Classificação da condição segundo a ABNT NBR 9452/2019 | 260 |
| Tabela 92: Classificação dos elementos com função estrutural segundo o DNIT... | 265 |
| Tabela 93: V1 - Ficha cadastral A1 | 266 |
| Tabela 94: V1 - Ficha cadastral A2 | 267 |
| Tabela 95: V1 - Ficha cadastral A3 | 268 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 96: V1 - Classificação..... | 268 |
| Tabela 97: V2 – Ficha cadastral A1 | 270 |
| Tabela 98: V2 – Ficha cadastral A2 | 271 |
| Tabela 99: V2 – Ficha cadastral A3 | 272 |
| Tabela 100: V2 - Classificação..... | 272 |

Sumário

| | | |
|------|---|-----|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 18 |
| 1.1 | Considerações iniciais | 18 |
| 1.2 | Problema de pesquisa | 20 |
| 1.3 | Justificativa | 23 |
| 1.4 | Objetivos..... | 26 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 28 |
| 2.1 | Considerações sobre as OAEs | 28 |
| 2.2 | Considerações sobre o tráfego de veículos | 30 |
| 2.3 | Considerações sobre os danos | 31 |
| 2.4 | A Inspeção visual..... | 39 |
| 2.5 | Monitoramento da Saúde Estrutural - <i>SHM</i> | 42 |
| 2.6 | Amortecimento | 49 |
| 2.7 | Metodologias para a medição do amortecimento | 55 |
| 2.8 | Frequência natural | 59 |
| 2.9 | Indicadores de dano..... | 65 |
| 2.10 | Acelerômetros | 69 |
| 2.11 | Uso do <i>SHM</i> utilizando celulares..... | 72 |
| 2.12 | Variação das propriedades dinâmicas com a presença do dano..... | 88 |
| 2.13 | Tratamento de dados antes do processamento | 92 |
| 2.14 | Uso de modelos numéricos e experimentais | 97 |
| 3 | METODOLOGIA | 100 |
| 3.1 | Estudos de caso | 101 |
| 3.2 | Materiais e métodos..... | 105 |
| 4 | RESULTADOS..... | 124 |
| 4.1 | Correção da taxa de amostragem..... | 124 |
| 4.2 | Calibração..... | 125 |
| 4.3 | Angulação | 126 |
| 4.4 | Viaduto V1 | 127 |
| 4.5 | Viaduto V2 | 143 |
| 4.6 | Viga T | 158 |
| 5 | DISCUSSÃO DE RESULTADOS..... | 184 |
| 5.1 | Correção da taxa de amostragem..... | 184 |
| 5.2 | Calibração e aceleração..... | 185 |
| 5.3 | Viaduto V1 | 185 |
| 5.4 | Viaduto V2 | 187 |
| 5.5 | Viga T | 190 |
| 6 | CONCLUSÕES..... | 210 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 6.1 | Metodologia executada nos viadutos | 210 |
| 6.2 | Metodologia executada na viga T..... | 212 |
| | Anexo A - Publicações | 234 |
| | Anexo B – Viga T: Dosagem de materiais..... | 235 |
| | Anexo C - Propriedades do acelerômetro PCB Piezotronics | 237 |
| | Anexo D – Viga T: Ensaio de esclerometria | 238 |
| | Anexo E – V1: Resultados experimentais | 241 |
| | Anexo F – V2: Resultados experimentais..... | 249 |
| | Anexo G - Inspeção visual segundo a NBR 9452/2019..... | 257 |
| | Anexo H – Inspeção visual segundo A DNIT 010/2004 PRO | 261 |
| | Anexo I – V1: inspeção visual | 266 |
| | Anexo J – V2: Inspeção visual | 270 |
| | Anexo L – Viaduto V1 | 276 |
| | Anexo M – Viaduto V2 | 277 |

Lista de abreviaturas e símbolos

| | |
|------------|--|
| AAR | Reação Álcali-Agregado |
| ARMA | <i>Auto Regressive Moving Average</i> |
| DNIT | Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte |
| E | Módulo de elasticidade |
| EFDD | <i>Enhanced Frequency Domain Decomposition</i> |
| EGR | Empresa Gaúcha de Rodovias |
| FFT | Transformada Rápida de Fourier |
| FWHA | <i>Federal Highway Administration</i> |
| GPS | <i>Global Positioning System</i> |
| GPR | Radar de Penetração no Solo |
| GVW | <i>Gross Vehicle Weight</i> |
| HIC | Fissura induzida pelo Hidrogênio |
| I | Momento de inércia |
| MEMS | <i>Micro-Electro-Mechanical System</i> |
| MPS | Sensoriamento com Smartphone |
| NDT | <i>Nondestructive testing</i> |
| OAE | Obra de Arte Especial |
| OMA | <i>Operational Modal Analysis</i> |
| QR | <i>Quick Response</i> |
| RDT | <i>Random Decrement Technique</i> |
| RMS | <i>Root Mean Square</i> |
| SCC | Fissura de corrosão devido à tensão |
| SGO | Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte |
| SHM | Monitoramento da Saúde Estrutural |
| SNR | Coeficiente Sinal-Ruído |
| SSI | <i>Stochastic Subspace Identificaion</i> |
| UTC | <i>Coordinated Universal Time</i> |
| UNIX | Sistema modular de medição do tempo |
| V | Índice de vibração adimensional |
| VGEO | Visualizador de Informações Geográficas |
| WIM | Pesagem em movimento |
| ω_r | Frequência natural |
| ω_a | Frequência natural de meia potência |

ω_b

Frequência natural de meia potência

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Com o início da expansão da malha rodoviária federal na década de 1940, as estruturas de concreto armado destinadas ao tráfego de veículos apresentaram variações de projeto significativas. A cada década é possível identificar a mudança da geometria da estrutura, a evolução e disposição dos carregamentos considerados para projeto. Algumas destas modificações podem ser vistas no Manual de inspeção de pontes rodoviárias do DNIT (2004). Portanto, o perfil das Obras de Arte Especiais – OAEs - na maioria das rodovias brasileiras é bastante heterogêneo.

Em contrapartida, segundo Araujo (2017), os primeiros estudos que envolvem a execução das atividades de inspeção e manutenção em Obras de Arte Especiais datam da década de 1980. O tardio surgimento das atividades de conservação das OAEs não é exclusividade do Brasil. No Reino Unido, até a década de 1960 era comum considerar que as pontes necessitavam de pouca manutenção ou inspeção. A partir da ocorrência de um alto número de falhas em pontes é que foi incentivado o desenvolvimento de rotinas de inspeção (McROBBIE; WRIGHT; CHAN; 2015).

Atualmente, as atividades de inspeção de OAEs obedecem o que é apresentado na norma ABNT NBR 9452/2019: Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto — Procedimento, a qual indica uma metodologia de investigação visual. Segundo Simões, Rodrigues e Pinheiro (2021), a publicação original da norma foi utilizada como texto base para outras duas normativas de inspeção: DNIT 010/2004 – PRO: Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido - Procedimento; e ARTESP ET-C21:2007: Controle das condições estruturais, funcionais e de durabilidade das obras de arte especiais. Além do Brasil, países como o Canadá, o Reino Unido, França, Finlândia, Estados Unidos, Alemanha e África do Sul também utilizam a mesma metodologia de inspeção (HURT e SCHROCK, 2016).

Obviamente, esta metodologia detecta apenas danos visíveis ou manifestações visuais de defeitos que não aparecem. É evidente, portanto, que qualquer problema que não for visível ou não interpretado através das irregularidades aparentes não será identificado.

Segundo Wenzel (2009), uma metodologia que apresenta o uso da inspeção visual junto à instrumentação da estrutura é o Monitoramento de Saúde Estrutural – *SHM* -, o qual é uma implementação de uma estratégia de identificação de dano para a infraestrutura civil.

O surgimento desta metodologia está vinculado à evolução, diminuição e redução de custos de hardwares de computação digital a partir da década de 1970. Na engenharia civil, os estudos da avaliação de dano com base na vibração para estruturas de pontes e edificações ocorreram desde o início dos anos 1980 (FARRAR e WORDEN, 2007).

O uso desta técnica é de vital importância em situações que envolvam pontes próximas ou que já atingiram o fim da vida útil de projeto. Além disso, tem chamado muita atenção na busca por métodos mais efetivos em aplicações ligadas ao comportamento estrutural (DAMMIKA et al, 2015; BERGSTRÖM, 2009).

Segundo Agdas et al (2016), a técnica difere dos ensaios não-destrutivos – NDE – por avaliar o comportamento em uma esfera global. É adequada para estruturas complexas ou de grande tamanho já que informações obtidas de pequenas partes da estrutura oferecem um diagnóstico em nível de sistema da condição estrutural.

Abrange um vasto número de práticas e métodos para avaliar a condição da estrutura através da extração de dados. Realiza uma combinação de estudos experimentais e modelagem numérica. Permite avaliar defeitos que não se manifestam, não são aparentes ou ocorrem no interior dos elementos estruturais. Segundo Frangopol, Dong e Sabatino (2017), também pode confirmar ou indicar a necessidade de aumentar fatores de carga, de resistência e fatores das combinações de projeto para um evento extremo.

O *SHM* possui vários níveis de investigação. O primeiro nível define a existência e o mais avançado define a localização de danos. A necessidade que merece maior importância é determinar a existência de dano na OAE de interesse. As outras questões que envolvem a localização e a severidade do dano, em circunstâncias normais, possuem menor importância.

No monitoramento estrutural a partir do uso de *smartphones* como equipamento básico, duas formas podem ser verificadas: direto e indireto. Na forma direta, os celulares são fixados à estrutura. Em casos onde o contato com a estrutura é eliminado e o celular ou acelerômetro está instalado em um veículo, o monitoramento é chamado de indireto. Outra forma de aplicação considera o conceito de

*crowdsourcing*¹, onde os dados são extraídos para a análise por um grupo de usuários (NOEL et al, 2017).

O resultado obtido nos ensaios de vibração é descrito em três propriedades dinâmicas: frequências naturais, formas modais e a taxa de amortecimento. A ideia fundamental é que o dano local causa um aumento local na flexibilidade, ou diminuição da rigidez, o qual modifica as propriedades modais. Estas propriedades podem ser obtidas através da medição da resposta dinâmica devido a um estímulo externo, tal qual uma força de excitação (HAFIZ e SCHUMACHER, 2019).

O uso das variações nas frequências naturais e formas modais é mais comum, a taxa de amortecimento modal é apenas um complemento devido à complexidade do mecanismo de dissipação de energia. A virtude da taxa de amortecimento é apresentar maior sensibilidade à presença de danos (CAO et al, 2017).

Com o contínuo desenvolvimento da tecnologia, o uso de celulares smartphones despertou o interesse como uma possível alternativa para eliminar o uso dos cabos, facilitar a inspeção e possuir maior economia. Em um estudo realizado por Agdas et al (2016), ao eliminar os cabos de acelerômetros utilizados no *SHM* tradicional foi possível atingir uma redução de custos em torno de 40%. Além disso, os *smartphones* são munidos de um conjunto de sensores com a capacidade de coletar dados para uma variedade de aplicações. O uso de celulares para a coleta de dados pode ser conhecido como *Mobile Phone Sensing – MPS* (KHAN et al, 2012).

A adoção de novas ferramentas permite a criação ou a melhoria da base de dados destas estruturas. Além disso, ao considerar dados do comportamento estrutural, minimiza a influência do inspetor sobre o resultado final da avaliação. Embora o foco deste estudo seja a avaliação, é importante destacar que todos os serviços de conservação de OAEs devem ganhar o mesmo nível de importância das atividades que a sociedade executa graças à existência desta categoria de estrutura da infraestrutura.

1.2 Problema de pesquisa

O problema de pesquisa pode ser descrito através de fatores vinculados às atividades e metodologias de investigação aplicadas às OAEs, cujo número oficial de

¹Conceito que descreve a colaboração coletiva responsável por gerar serviços, ideias ou conteúdos através de um grande grupo de pessoas.

estruturas existentes no país é desconhecido. Outras características são associadas à inspeção visual: o nível de conhecimento necessário da equipe de inspeção; a subjetividade desta metodologia; fatores que influenciam o resultado final; a qualidade dos dados e; o grau de efetividade. As demais são associadas ao ensaio de vibração: comportamento das propriedades modais; uso de sensores fixos e; a qualidade de sensores portáteis.

Segundo o Visualizador de Informações Geográficas – VGEO – do DNIT, existem 8373 OAEs no território nacional. O esforço necessário para inspecionar e avaliar essa quantidade de estruturas envolve o deslocamento da equipe responsável, o acesso aos locais onde estão elementos estruturais e a realização da inspeção visual. O VGEO não apresenta as OAEs sob responsabilidade estadual, o que significa que o número de OAEs pode ser ainda maior.

Para a execução da inspeção visual é desejável que os inspetores sejam capazes de detectar um grande número de defeitos potenciais. Porém, os defeitos apresentam frequentemente uma diferença sutil entre um e outro, considerando a aparência visual.

Segundo Mendes (2009), a subjetividade da inspeção não resulta em grandes variações na avaliação de pontes em bom estado de conservação. Porém, as diferenças de avaliação se acentuam em pontes classificadas como críticas ou ruins.

Megaw (1979) apresenta um levantamento de fatores que têm influência sobre o resultado das inspeções visuais. Os fatores identificados foram: a visão, as estratégias de escaneamento, iluminação, equipamentos utilizados, tempo disponível para a inspeção, área de visão, falhas de probabilidade, número de inspetores, falta de instrução, treinamento, padronização, tempo de execução de cada tarefa, pausas para descanso, privação do sono, idade, experiência, inteligência do inspetor, entre outros.

No Reino Unido, os engenheiros responsáveis pelas inspeções e manutenções de pontes foram consultados sobre a coleta e o uso dos dados resultantes da inspeção visual de pontes. O resultado da pesquisa indicou que a metodologia visual executa um papel chave no processo de gerenciamento de pontes. Entretanto, existem preocupações em relação aos dados produzidos, os quais podem ser incompletos, inconsistentes e subjetivos. Outra fonte de erro é o preenchimento de formulários de inspeção (McROBBIE; WRIGHT; CHAN; 2015; DING et al, 2016).

A baixa efetividade da inspeção visual junto ao estado de envelhecimento das infraestruturas de transporte representam necessidades de curto e longo prazo de

integridade estrutural, segurança e resiliência. Além disso, segundo Matarazzo et al (2020), as avaliações realizadas com base em inspeções visuais limitam de forma severa as frequências das avaliações de saúde estrutural, o valor da informação coletada e a capacidade de programar uma manutenção preventiva (AN et al, 2019; MORGENTHAL et al, 2019).

Quanto às normas de inspeção de OAEs nacionais, ambas são bastante semelhantes. Além disso, as OAEs cadastradas em rodovias nacionais e apresentadas no VGEO passam pela inspeção segundo a metodologia do DNIT, enquanto às situadas em rodovias estaduais passam pela norma nacional da ABNT NBR 9452/2019.

A busca por minimizar a baixa precisão da inspeção visual estimula o uso de técnicas e instrumentos variados. Entre os quais podem-se citar aquelas que utilizam a vibração da estrutura e as propriedades modais dinâmicas mais comuns: frequências naturais e formas modais. Porém, segundo Cao et al (2017), as frequências naturais possuem pouca sensibilidade à existência e a evolução dos danos, sendo úteis apenas em situações onde existe um dano moderado. Além disso, a sensibilidade das formas modais à presença de danos está diretamente relacionada a localização do dano e ao número de sensores, o que pode resultar na obtenção de modos de vibração locais (DAMMIKA et al, 2015).

Segundo Kim e Kim (2017), o amortecimento apresenta baixa qualidade, característica que pode estar associada às condições da análise modal operacional. Esta avalia apenas os dados de saída do sistema estrutural e considera as vibrações estacionárias. Porém, cargas como o tráfego causam uma vibração não-estacionária. Outro aspecto é que o amortecimento não apresenta qualquer relação com as características geométricas das pontes (CASTELLANOS-TORO et al, 2018).

O uso de sensores fixos e em rede são úteis desde a criação do *SHM*, embora sejam conhecidas as limitações. Demandam da instalação de aparelhos de armazenamento de informações, baterias de alimentação e possuem alto custo. Além disso, a grande maioria dos sensores fixos é utilizado por pesquisadores que já possuem os equipamentos e a experiência necessária para obter informações sobre a condição da infraestrutura. O uso não é disseminado para a realização de inspeções (MATARAZZO et al, 2017).

Ao utilizar acelerômetros de smartphones, conhecidos como Sistemas Micro-Eleto-Mecânicos – *MEMS*, existe a preocupação em relação à qualidade dos dados.

A faixa de resolução destes dispositivos é de +- $4g^2$, enquanto de sensores comerciais é de até $10^{-9}g$ e; a taxa de amostragem é imperfeita, apresentando variações, o que a torna menor que a definida em aplicativos de registro de acelerações (FELDBUSCH, SADEGH-AZAR e AGNE, 2017; OZER, FENG e FENG, 2017).

Para tornar os dados de sensores dos celulares uteis, estes devem ser precisos e indicar ou validar um comportamento estrutural. Se os dados registrados por dispositivos apresentarem uma grande quantidade de erro, as conclusões realizadas a partir da análise dos dados são colocadas em dúvida (KUHLMANN, GARAIZAR e REIPS, 2020).

O grande número de OAEs a serem inspecionadas, somado às variáveis que interferem sobre as inspeções, coloca em risco os usuários de estruturas de tráfego. A subjetividade destacada por pesquisadores reforça que a metodologia apresenta falhas.

Em relação aos sensores fixos profissionais, possuem barreiras econômica e de domínio da técnica para que seja popularizado. Em contrapartida, o uso de celulares é comum em atividades de rotina da sociedade, mas a precisão destes aparelhos no monitoramento estrutural gera preocupação.

Embora a realização da inspeção visual seja benéfica, o uso isolado desta metodologia minimiza a capacidade de definir divergências estruturais, funcionais e de durabilidade.

1.3 Justificativa

Segundo Bergström (2009), uma justificativa a ser citada é a busca contínua por uma sociedade mais sustentável. É importante manter e atualizar o que já existe e minimizar a construção de novas pontes. Nos Estados Unidos, com o envelhecimento desta categoria da infraestrutura, a manutenção das estruturas existentes tem ganhado maior atenção que a construção de novas pontes (ASCE, 2021).

Na Europa, a maioria dos países deve investir na manutenção para garantir as condições de serviço e segurança de pontes. Isto inclui o aumento do número de inspeções, investimento em sistemas de monitoramento *SHM* e preferência por

² g é a aceleração da gravidade.

intervenções em estruturas críticas com soluções de readequação sustentável (GKOUMAS et al, 2021).

Em relação à sustentabilidade da estrutura, a mesma pode ser quantificada em relação ao auxílio às outras atividades que visam aumentar a economia e permitir o desenvolvimento das ações da sociedade. Geralmente, a sustentabilidade deve ser quantificada em termos econômicos, sociais e ambientais.

De ordem geral, uma estrutura é sustentável se o custo do ciclo de vida é adequado, com baixo gasto de energia, emissão de dióxido de carbono. O ciclo de vida é composto pelas etapas de projeto, construção, inspeção, manutenção, reparo, ruína, custos de substituição de uma ponte e disposição final dos resíduos.

A componente econômica abrange a importância da ponte para a rede de transporte. É comum a estrutura atuar como uma ligação entre redes de estradas e ser utilizada para o escoamento das cargas, assim, deve apresentar um funcionamento adequado (BUKSHH et al, 2019).

A componente social pode estar associada ao tempo em que uma ponte em manutenção permanece fechada para o tráfego, dificultando as atividades da sociedade. Neste quesito, também é considerado o trecho do desvio a ser percorrido pelos usuários da ponte para chegar ao mesmo local de destino.

A componente ambiental inclui a energia consumida, a contribuição para o aquecimento global e as emissões de gases poluentes referentes a atividades de reparo, entre outros.

A metodologia que busca identificar anomalias estruturais utiliza parâmetros de vibração experimentais, os quais alteram na presença de danos na estrutura. Estes parâmetros apresentam diferenças quando comparados entre si: a frequência natural é facilmente associada com o vão, é mais estável, porém, apresenta baixa sensibilidade e; o amortecimento é mais sensível aos danos, porém, não é possível associa-lo com outra característica da estrutura até o momento. Portanto, o uso destas propriedades em conjunto busca se beneficiar do comportamento de ambas frente aos danos.

Riera et al (2007) demonstraram que o uso da taxa de amortecimento para a avaliação estrutural apresenta maior sensibilidade à presença de danos. Esta afirmativa se dá quando comparado aos métodos que utilizam a variação da frequência. Por exemplo, a presença de fissuras na estrutura causa uma variação maior no amortecimento que na frequência. A maior sensibilidade do amortecimento

comparado às frequências naturais também foi obtido por Nakajima et al (2014), Saaed et al (2015) e Curadelli et al (2008).

Segundo Wenzel (2009), o uso dos dados de vibração experimental não elimina a necessidade de executar a inspeção visual, a qual é a primeira categoria de investigação do *SHM*. Assim, existem instrumentos e metodologias para o levantamento de dados - qualitativos e quantitativos - que ofereçam maior respaldo na tomada de decisões. O uso da técnica minimiza a subjetividade da inspeção visual e permite o conhecimento em torno das condições existentes, as quais contribuem para o gerenciamento, manutenção e reparo dos sistemas de infraestrutura (SHABAN, AVSAR e CANER, 2020).

Para solucionar ou minimizar os efeitos da falta de tempo e do uso e operação inadequada de equipamentos podem-se utilizar aparelhos celulares. Segundo Zhao et al (2016), os celulares podem ser úteis para desenvolver uma técnica *SHM* rápida. É possível realizar uma avaliação inicial do dano e obter um status de segurança devido ao baixo custo e a fácil instalação do aparelho na estrutura. O estudo demonstrou que é possível utilizar *smartphones* para a realização do *SHM*.

Segundo Matarazzo et al (2017), o uso de equipamentos populares para a realização do *SHM* permite detectar insuficiências estruturais com maior rapidez, economia e tornar a técnica mais acessível para uso profissional. A justificativa é que alguns sensores de celulares são encontrados apenas em laboratórios controlados. Além disso, devido à natureza competitiva do mercado, a variedade e precisão destes sensores tendem a aumentar consideravelmente em cada novo modelo de *smartphone*.

A principal vantagem destes dispositivos são a portabilidade, o processamento rápido e integrado, e os serviços adicionais, por exemplo, a câmera e o registro da voz. Estes dispositivos são uma ferramenta adequada para a inspeção estrutural incluindo a análise da vibração e o monitoramento dinâmico. Porém, a calibração se faz necessária para garantir o correto funcionamento dos instrumentos de medição.

O contínuo desenvolvimento da computação e da comunicação pode ser explicada através da Lei de Moore, a qual indica que a capacidade de processamento dos equipamentos deste segmento tende a aumentar e em contrapartida diminuir de preço. Estima ainda que a cada dois anos, as capacidades dos computadores, aproximadamente, dobra sem o aumento de preço (DEITEL e DEITEL, 2001).

As técnicas de medição da vibração evoluíram ao ponto de o contato direto entre aparelho e estrutura ser dispensado. Porém, segundo Kromanis (2020), não existe

uma solução mais indicada ao se tratar do monitoramento estrutural em pontes. O mesmo autor indica que ao utilizar *smartphones* de última versão, fixados a um elemento de ponte por adesivo ou fita dupla face, podem-se obter resultados com alta taxa de precisão. Isto os torna confiáveis e precisos para o monitoramento dinâmico de pontes e componentes como cabos e tabuleiros. Além disso, pode-se obter resultados precisos especialmente abaixo de 20 Hz. Outro fator de interesse, este método é prático e fácil, o que pode ser útil para criar uma base de dados devido à simplicidade (GIBBS, KWON e KAREEM, 2019).

No caso do *SHM*, o uso de aplicativos que registram a vibração e a aceleração dispensa o uso de equipamentos de armazenamento, diminui o custo e facilita a execução dos ensaios de vibração. Porém, existem limitações que podem envolver a duração da bateria de alimentação, o que o inviabiliza para ensaios de vibração de maior duração.

O uso de acelerômetros no monitoramento de doze pontes com faixas de frequência de 0,5 Hz a 30 Hz pode ser visualizado em Castellanos-Toro et al (2018). Já o uso de diferentes aparelhos móveis pode ser visualizado em Feng et al (2015). Isto é, a aplicação desta alternativa não fica restrita a uma marca ou modelo e a faixa de aplicação é adequada para a maioria das estruturas civis.

Portanto, o uso da variação de dados experimentais como ferramenta adicional para a definição de danos busca atingir uma maior precisão na metodologia de identificação de divergências estruturais. Segundo Feldbusch, Sadegh-Azar e Agne (2017), a partir da aplicação em inspeções, o celular ganha uma nova utilidade por simplificar o registro dos dados de aceleração e permite realizar medições espontâneas em qualquer parte do dia. Por fim, o conhecimento do estado de saúde da estrutura pode ser definido a partir das propriedades de vibração da estrutura e, quando complementada de modelos numéricos, ainda podem ser úteis para análise do desempenho da estrutura.

1.4 Objetivos

Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é apresentar um procedimento que utilize amostras de aceleração dos tabuleiros das OAEs, retiradas com o uso de *MEMS* de celulares e defina o dano em pontes, viadutos e passarelas.

Objetivos específicos

Para que o objetivo geral seja atendido deve-se concluir os objetivos específicos que seguem:

- a) Determinar as taxas de amortecimento modal e as frequências naturais através da fase experimental;
- b) Calibrar os modelos numéricos a partir das respostas experimentais;
- c) Definir a existência de danos a partir da adoção de indicadores de aceleração pico-a-pico; frequência natural e; amortecimento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações sobre as OAEs

Segundo Oliveira, Greco e Bittencourt (2019), a maioria das pontes do inventário do DNIT são em concreto armado (99,2%). O sistema mais utilizado é o de vigas em concreto (58% - 2764 pontes), seguidas pelas pontes em lajes de concreto (777 pontes), e sistemas pós-tensionados (622 pontes).

A maioria das pontes instaladas em rodovias federais foram construídas sobre rios (74% - 3789 pontes). É possível verificar também a ocorrência de 752 instaladas sobre outras estradas e 153 instaladas sobre ferrovias.

Apenas 1032 pontes (22%) apresentavam registros da idade. Destas, 256 foram construídas antes de 1960. Além disso, foram construídas 531 entre 1960 e 1975. Estas estruturas possuem, segundo projeto, capacidade de carga de 36 toneladas, tabuleiro com largura de 10 metros e passeios laterais obsoletos com 0,90 metros.

A análise do inventário também indicou as cargas acidentais utilizadas nos projetos. Foram identificadas 256 pontes projetadas com carregamento de até 24 toneladas e; 1256 projetadas com 36 toneladas.

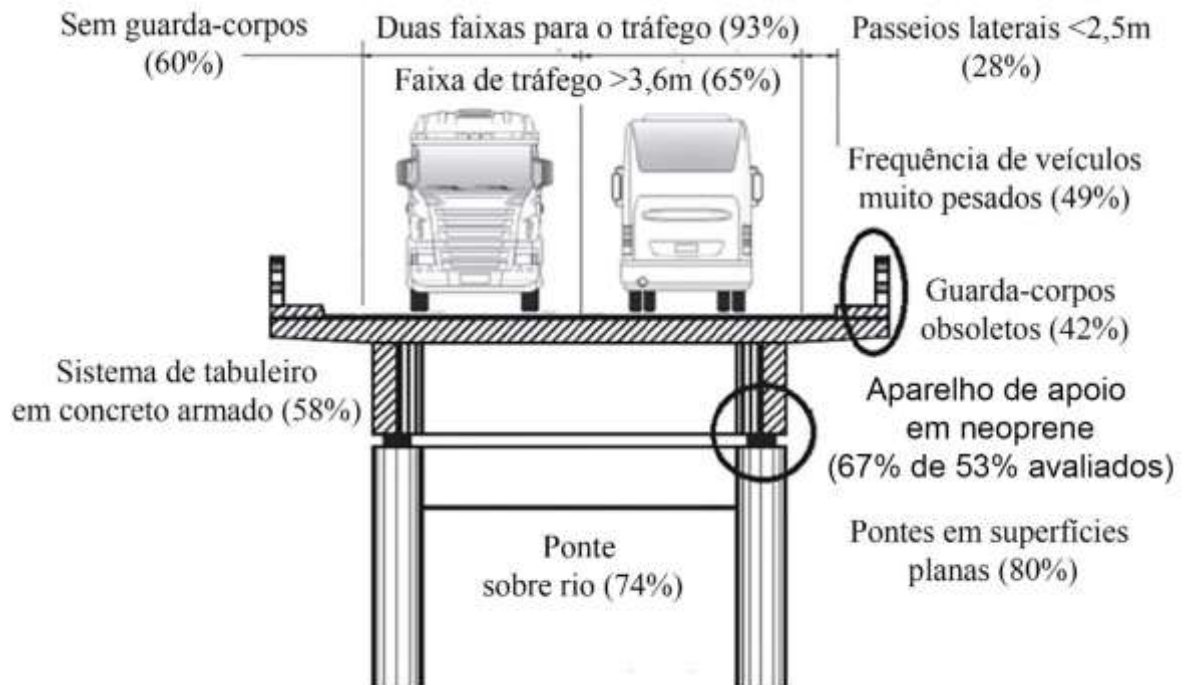
A maioria das pontes (80%) são instaladas em superfícies planas e; mais de 93% apresentam duas vigas. A largura das faixas de tráfego são iguais ou menores a 3,60 metros para 65% das pontes. Entretanto, existem 1419 ou 35% onde a largura das faixas são insuficientes – menores que 3,60 m para cada via de rolamento em estradas com duas mãos.

Como não é comum o uso de equipamentos de acesso durante as inspeções, 2229 (47%) possuem os aparelhos de apoio sem definir tipo, função e estado de dano.

A deficiência mais observada foram guarda-corpos obsoletos, registrados em 2095 pontes. A pesquisa também registrou a falta dos passeios laterais em 2849 e; 3271 com passeios laterais menores que 2,50 m.

A drenagem foi considerada insuficiente em 681 pontes. Um alto nível de tráfego de veículos pesados foi observado em 2923 (49%) pontes, um fato que afeta as taxas de deterioração dos elementos estruturais. A Figura 1 apresenta a seção transversal das pontes que é padrão no Brasil.

Figura 1: Seção transversal padrão das pontes no Brasil



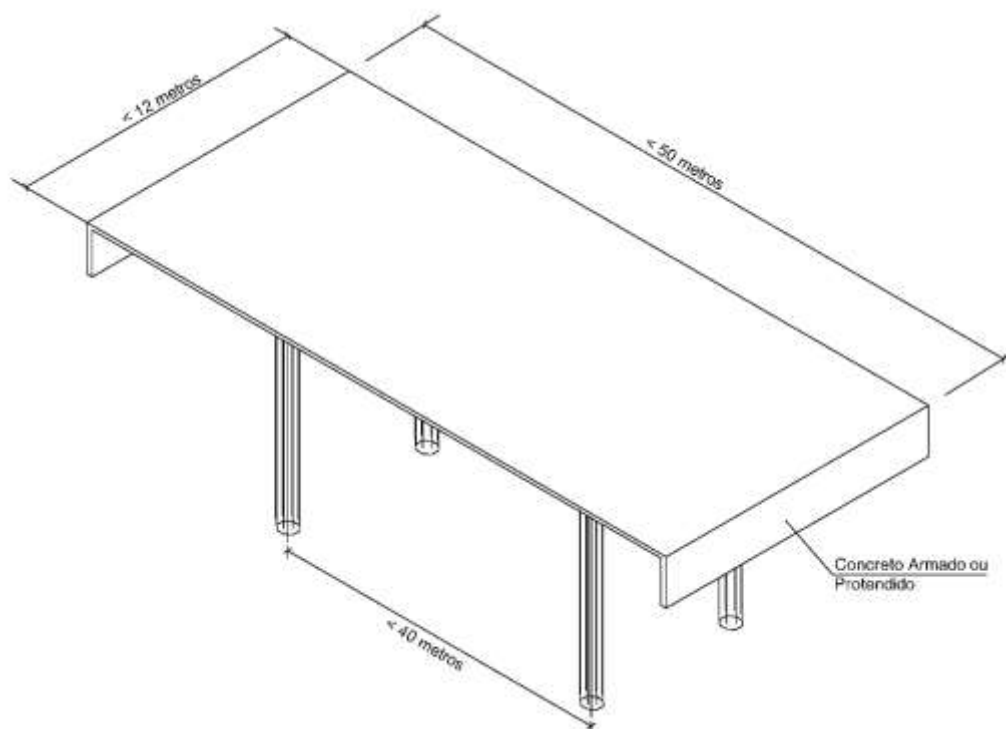
Fonte: Adaptado de Oliveira, Greco e Bittencourt (2019).

Além destas informações, é possível determinar outras características do padrão de pontes brasileiras a partir de Mendes (2009):

- 63% das pontes tem comprimento inferior a 50 metros;
- 79% das pontes possuem largura total inferior a 12 metros;
- 50% das pontes possuem um vão ou um vão com dois balanços e;
- 93% das pontes possuem vão inferior a 40 metros.

A Figura 2 apresenta o modelo geral das pontes brasileiras.

Figura 2: Modelo geral das pontes brasileiras



Fonte: Adaptada de Mendes (2009).

2.2 Considerações sobre o tráfego de veículos

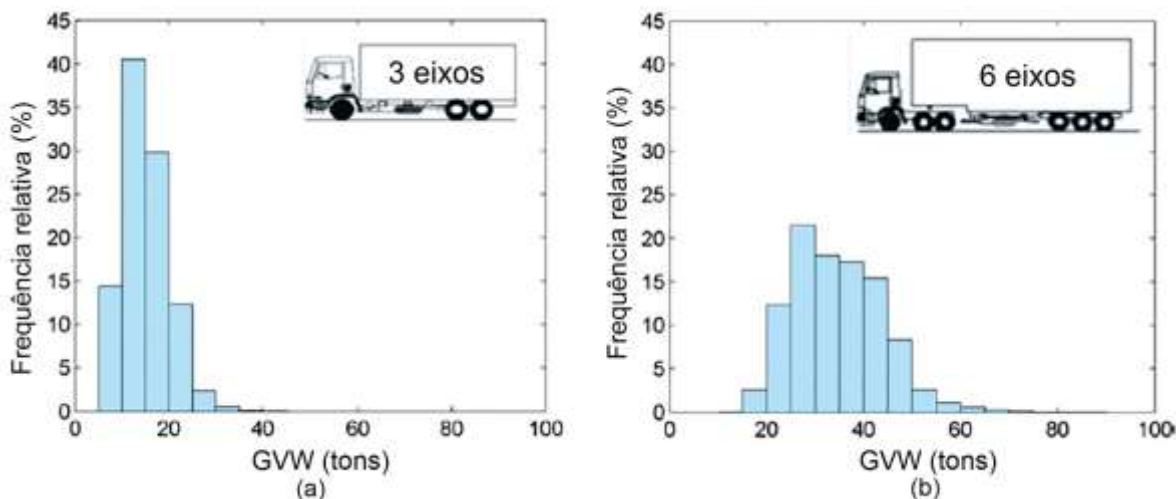
Em um estudo realizado na rodovia Fernão Dias, a qual liga a capital São Paulo à Belo Horizonte, Portela et al (2017) caracterizaram as cargas acidentais atuantes nas estradas do Brasil através da pesagem em movimento - *WIM*. O estudo teve duração de um ano e ocorreu entre Setembro de 2015 e Setembro de 2016. Um total de 1.145.766 caminhões foram considerados para a análise, a qual obteve os seguintes resultados:

- Volume médio diário entre 1972 a 3743 caminhões, com um coeficiente de variação aproximado entre 21% e 53%;
- Em relação à ocorrência, os caminhões com três eixos são os mais comuns ou que mais se repetem. Este agrupamento também inclui os caminhões com um eixo e um tandem; os quais representam 24% do tráfego pesado. Outro importante agrupamento é o de caminhões com 6 eixos, os quais representam 17% do tráfego pesado;

A Figura 3 apresenta a distribuição do peso bruto por veículos – *GVW* - para os dois grupos com maiores frequências registradas oriundas do mesmo estudo. Pode-se identificar a distribuição unimodal em (a) e em (b), o que é uma característica do

tráfego interestadual, com rotas que envolvem grandes distâncias. Predominam caminhões de 3 eixos – com peso bruto de aproximadamente 15 toneladas – e com 6 eixos – com peso bruto de aproximadamente 35 toneladas;

Figura 3: Distribuição de GVW para os agrupamentos dominantes.



Fonte: Adaptado de Portela et al (2017).

2.3 Considerações sobre os danos

Ao citar novamente a análise do inventário do DNIT, a maioria dos danos que prevalecem sobre pontes podem ser associados à corrosão da armadura e a degradação do concreto. Em seguida, pode-se citar a expansão das juntas como evento de maior ocorrência (OLIVEIRA, GRECO e BITTENCOURT, 2019).

O elemento mais prejudicado pela existência de danos é o tabuleiro. Isto ocorre devido à exposição direta às cargas de tráfego e aos fatores de degradação ambiental. Neste elemento estrutural é comum verificar a ocorrência de eflorescências e lixiviação do concreto, seguido pelo vazamento de água através de fissuras, lascas de concreto, exposição e corrosão das barras de aço. Mendes (2009) também constata a maior ocorrência destes danos.

O segundo elemento com maior ocorrência de danos são as vigas longitudinais ou longarinas. Danos como lascas de concreto e exposição de barras de aço, eflorescências, lixiviação de concreto são comumente encontradas.

O terceiro elemento com maior incidência de danos são as paredes de concreto. O vazamento de água através das fissuras de concreto, eflorescências e lixiviação do

concreto também podem ser encontradas nesses elementos. A Tabela 1 apresenta a ocorrência de danos nos elementos estruturais.

Tabela 1: Ocorrência de danos em elementos estruturais

| Elemento | Ocorrências |
|-----------------------|-------------|
| Parede de concreto | 1804 |
| Viga caixão | 345 |
| Longarinas | 2376 |
| Guarda-corpos | 495 |
| Transversinas | 737 |
| Pilares | 947 |
| Tabuleiro em concreto | 4983 |

Fonte: Oliveira, Greco e Bittencourt (2019).

A Tabela 2 apresenta os danos verificados nas inspeções realizadas por Mendes (2009) e a incidência nas OAEs. As incidências não se referem as OAEs metálicas ou mistas.

Tabela 2: Danos e incidências em OAEs de concreto

| Dano | Número de incidências |
|--|-----------------------|
| Armadura principal exposta e deteriorada | 68 |
| Deterioração acentuada dos materiais de construção | 62 |
| Quadro de fissuração intenso | 17 |
| Trinca ou fissura de grande abertura | 15 |
| Ruptura do elemento | 11 |
| Deformação excessiva | 5 |
| Risco para o usuário | 3 |
| Desconfinamento lateral de estaca da fundação | 3 |
| Perda ou comprometimento do apoio | 3 |
| Vibração ou impacto excessivo | 2 |
| Pilar com desaprumo acentuado | 1 |

Fonte: Mendes (2009).

Em relação aos problemas ligados à estabilidade ou conservação precária de pontes, a maioria dos casos são da década de 1950 e 1960. Não existem, portanto, pontes consideradas sofríveis com idades menores que 10 anos. As pontes consideradas precárias não apresentam idades menores que 20 anos. Além disso, a maioria dos danos atuais associados à durabilidade do concreto foram identificados no início dos anos 1970 (BARR e LAWAL, 2018).

Nos Estados Unidos, pontes construídas durante a década de 1920 e 1940 apresentaram uma deterioração avançada na década de 1980. No Japão, pontes construídas entre 1950 e 1980 apresentaram problemas próximos ao ano de 2010 (LIN e YODA, 2017).

Segundo Rodrigues, Casas e Almeida (2013), a ocorrência de danos pode estar associado ao arranjo estrutural. A análise de quarenta pontes brasileiras indicou que

a solução de concreto armado formada por duas longarinas com balanços nas extremidades e tabuleiro é deficiente. Nesta configuração estrutural ocorrem deslocamentos significativos nas extremidades das longarinas em balanço.

Além dos deslocamentos, as condições de aterramento do solo em talude podem resultar em um pavimento com rugosidade de baixa qualidade na zona de transição, entre a ponte e o talude. Isto provoca o choque com os veículos ao entrarem na ponte e modifica imediatamente as condições de carregamento experimentadas pela ponte. O resultado é a redução da vida útil frente à fadiga.

A mesma observação é realizada pelo Manual de Inspeção de Pontes do DNIT (2004) em relação a esta solução estrutural. O funcionamento do conjunto formado por aterro e obra-de-arte-especial é deficiente devido à má compactação e ausência de proteções adequadas nos aterros. Em consequência, o assentamento dos aterros de acesso provoca o choque dos veículos ao adentrarem nas estruturas.

De acordo com Kamiński (2016), o surgimento dos danos é uma parte inevitável na vida da estrutura. O mesmo autor apresenta uma correlação entre os casos, as possíveis causas e a duração da ação do dano que pode ser vista na Tabela 3. A divisão dos danos que tem início em A e finaliza em H pode ser adotada para qualquer tipo de estrutura por ser uma ferramenta de gerenciamento para pontes. É possível observar que a maioria dos danos ocorre em vigas principais ou suportes.

Tabela 3: Casos, causas e duração dos danos em pontes

| Danos | | Causa | | | | | | | | | | | |
|-------|---|-------------------------|--------|-------------------------|------|------------|------------|-------------|------------------------|----------|------------------|----------------------|------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| | | Impacto de um objeto | Fadiga | Fadiga e idade corrosão | Fogo | Inundações | Sobrecarga | Erro humano | Terrorismo, vandalismo | Explosão | Falha Estrutural | Efeitos de mineração | Atividade Bélica |
| | | Duração da ação do dano | | | | | | | | | | | |
| | | C | L | L | M | M | C | L | M | C | L | L | M |
| A | Perda de material em uma viga principal | F | | F | | | | | F | F | R | | F |
| B | Fissura em uma viga principal | F | F | | | | F | F | | F | F | F | R |
| C | Degradação material da viga principal | | F | F | F | | | F | | | F | | |
| D | Deformação da seção transversal de uma viga principal | F | | | F | R | R | | F | F | | R | R |
| E | Deformação de um suporte de treliça | F | | | | | F | | F | F | | R | R |
| F | Fratura de um suporte | F | F | F | F | | F | F | F | F | F | | F |
| G | Rompimento de uma coluna | F | F | F | R | F | F | F | F | F | F | F | F |
| H | Deslocamento de um suporte/vão | F | | | | F | R | F | | | R | F | |

Notação: C – curta; M – Moderada; L – Longa; F – Frequente relação; R – Rara relação

Fonte: Adaptada de Kamiński (2016).

Segundo Moriyoshi et al (2021), uma das causas dos danos em estruturas em concreto com pavimento asfáltico é a presença de traços de matéria orgânica. Este componente indesejado penetra no concreto por ações de respiração da estrutura, que ocorrem devido à variação de temperatura e umidade relativa do ar. Além disso, a matéria orgânica tem caráter cumulativo e somado à umidade do ar causam vários tipos de dano – desagregação, deterioração, descascamento da superfície e fissura – à estrutura e ao pavimento asfáltico. Este efeito pode ser mais severo onde a poluição do ar é maior.

Em relação ao comportamento dinâmico estrutural, segundo Rahmatalla et al (2014), o principal dano físico na ponte está associado principalmente com o modo de flexão, o qual é normalmente excitado pelo tráfego.

OAEs em concreto

Os cuidados com as estruturas de concreto devem começar desde a fase do projeto. Segundo a ABNT NBR 6118/2014, deve ser previsto o acesso para a inspeção e manutenção de partes da estrutura com vida útil inferior ao todo, por exemplo, aparelhos de apoio, caixões, insertos, impermeabilizações, entre outros. Porém, é comum a preocupação com a saúde da OAE a partir da quantidade das manifestações aparentes e de outros fenômenos que possam comprometer a operação como o deslocamento e a vibração.

A FHWA através do *Bridge Inspector's Reference Manual* (2012) elenca os possíveis danos encontrados em pontes em concreto armado: fissuras; escamação ou quebra da superfície; delaminação; depressões; contaminação por cloretos; congelamento e descongelamento; eflorescência; reação álcali-silica; formação de etringita; vazios de concretagem; fragmentação; desgaste; colisão; abrasão; sobrecarga; corrosão interna do aço da armadura; carbonatação; variações de temperatura; ataque químico; absorção de umidade; movimento diferencial da fundação; deficiências de projeto e construção; objetos não identificados no concreto e; fogo. A lista de danos que atingem as OAEs em concreto pode ser adicionado também a perda de aderência entre concreto e armaduras (DNIT - Manual de inspeção de pontes rodoviárias, 2004).

Em relação às OAEs em concreto protendido, estas deterioram em uma maneira semelhante aos elementos em concreto armado. Porém, os efeitos são mais prejudiciais e incluem: fissuras estruturais em elementos de concreto protendido;

tensões de protensão aparentes; corrosão dos tendões em zonas de ligação; perda de curvatura devido à diminuição da força de protensão e fluência.

Para a apresentação dos danos foram considerados estudos que apresentam a influência dos mesmos sobre os parâmetros dinâmicos de vibração.

Delaminação

É a separação das camadas do concreto no nível, ou próximo à camada mais externa, da armadura de reforço. A principal causa deste dano é a expansão da armadura de reforço oxidada, causando a quebra na ligação entre o concreto e o aço. É causado pela penetração de cloretos, sais ou o excesso de tensões em um elemento. As áreas separadas em camadas emitem um som oco quando golpeadas com um martelo.

Segundo Xing, Halling e Barr (2012), a delaminação em lajes de concreto é responsável pela maior amplitude dos deslocamentos quando comparada a lajes sem danos e com as mesmas propriedades. Nestes casos, é possível observar a diminuição das frequências naturais, enquanto o amortecimento apresenta uma tendência de aumento. Estas variações são mais agudas em modos de vibração mais altos e em casos onde o dano é mais grave.

Os mesmos autores ressaltam que para pontes reais, diferentes tipos de danos ou combinações de danos podem existir. É desafiador distinguir as mudanças nas características modais causadas por tipos de danos diferentes. Se a área de delaminação é pequena, pode ser difícil determinar se as mudanças nas características modais ocorrem devido a este dano em vez de outros. Investigações mais detalhadas podem ser necessárias para atribuir uma mudança à delaminação.

Eflorescência

A presença de fissuras permite a absorção e o aumento do fluxo da umidade dentro do concreto, o qual é evidenciado pelos depósitos brancos sobre a superfície chamada de eflorescência. O fenômeno é uma combinação de carbonato de cálcio percolado pela pasta de cimento e outros compostos de carbonato recristalizado e cloretos. A Figura 4 apresenta o fenômeno da eflorescência.

Pode ocorrer também devido a reação álcali – sílica (*ASR*), a qual também é considerada uma reação álcali-agregado. Forma estalactite ou estalagmite (MACDONALD, 2003).

Figura 4: Eflorescência



Fonte: FHWA (2012).

Reação álcali-sílica

Também conhecida como reação álcali-agregado (*AAR*), é uma reação expansiva que forma um gel responsável pelo inchaço e aumento do volume de concreto.

Envolve a reação entre álcalis de sódio e potássio, os quais são comuns no cimento, e sílica, esta comum nos agregados. A reação pode ser promovida pela presença de umidade para uma estrutura já afetada pela reação álcali-sílica.

Os indicadores típicos são as fissuras de mapa, as depressões e, em casos mais avançados, juntas fechadas e a superfícies de concreto danificada. Em outros casos ocorre a percolação em forma de fluido viscoso com origem nas fissuras. O fissuramento pode aparecer em áreas onde a umidade ocorre frequentemente.

É responsável pela redução da resistência, elasticidade e durabilidade do material (DNIT - Manual de inspeção de pontes rodoviárias, 2004).

Não existe um indicador precoce para a reação álcali-sílica, assim um ensaio é necessário para confirmar a presença da reação. A Figura 5 apresenta a manifestação da reação álcali-sílica, o conhecido fissuramento de mapa, resultado da pressão exercida pelo gel sobre o concreto (SHABAN, AVSAR e CANER, 2020).

Figura 5: Reação álcali-sílica



Fonte: FHWA (2012).

O fissuramento resultante da expansão *AAR*, reduz a rigidez mecânica e, conseqüentemente, as frequências naturais do elemento. Estas fissuras podem ser consideradas parte de um sistema interconectado imperfeito, o qual também inclui interfaces entre os agregados e a argamassa ou pasta de cimento, bem como outros defeitos (CAVALCANTI et al, 2021).

Formação de etringita

A formação de etringita é uma deficiência interna que ocorre no concreto através da reação de sulfatos, aluminatos de cálcio e água. A etringita é um mineral cristalino que expande de volume e deteriora o concreto devido ao surgimento de forças de grande intensidade. A única maneira de identificar a etringita é através de métodos de inspeção avançados como a análise petrográfica. A sua formação pode estar ligada a reação álcali-sílica.

Segundo Liu et al (2020), íons de sulfato penetram no concreto e reagem com produtos hidratados como o hidróxido de cálcio – CH, hidrato de aluminato de cálcio – CAH, hidrato silicato cálcio – CSH, o que gera um número de substâncias expansivas, tal qual a etringita e o gesso dihidratado – Gipsita.

Com as substâncias expansivas, as fissuras e poros do concreto são preenchidos, o que melhora a compactação do material. Assim, o módulo de elasticidade dinâmico do concreto, o qual é atacado por uma solução de sulfato, aumenta. Uma vez que os poros e fissuras no concreto não podem mais acomodar substâncias expansivas, maiores tensões de tração são geradas, as quais resultam em microfissuras no concreto. Nas peças de concreto utilizadas por Liu et al (2020),

com a presença do sulfato, a taxa de amortecimento aumentou inicialmente e, posteriormente, diminuiu.

Corrosão interna do aço

Segundo Macdonald (2003), a corrosão do aço é precedida por outros dois mecanismos de deterioração: a carbonatação e; o ataque por cloretos. As barras de aço são protegidas pelo concreto presente no entorno das mesmas. Porém, esta proteção é eliminada através da invasão de cloretos, os quais permitem que a água e oxigênio ataquem as barras de aço, formando o óxido de ferro – ferrugem - que é um produto da corrosão. Os íons de cloreto tem origem na névoa marinha, nos resíduos industriais ou agentes de degelo e atingem o aço através das fissuras. A identificação da corrosão é possível graças a mancha de ferrugem, a qual ocorre antes das quebras no material.

Em um ensaio controlado realizado por Razak e Choi (2001), a corrosão da armadura de reforço em vigas de concreto causou a mudança significativa da capacidade estrutural e dos parâmetros modais de frequências naturais e taxas de amortecimento.

O mesmo comportamento é verificado por Zhang et al (2020), os quais indicam que antes mesmo de causar fissuras, a corrosão faz com que o valor da frequência natural diminua. Além disso, a frequência do segundo modo é mais indicada para apontar a presença deste dano, pois, é sensível à formação de fissuras no concreto que são induzidas pela corrosão do aço. Este fenômeno causa a redução da rigidez à flexão de vigas, do módulo de elasticidade equivalente e da capacidade de carga da estrutura.

Carbonatação

Reação química entre o dióxido de carbono presente no ar com o hidróxido de cálcio e o silicato de cálcio hidratado no concreto. Reduz o pH e tem início na superfície do elemento estrutural, facilita o surgimento das fissuras. Se dirige vagarosamente para o interior do concreto onde eventualmente atinge a armadura de reforço. Quando atinge a armadura de reforço dá início a corrosão.

Para estruturas em concreto armado expostas ao ambiente, o primeiro passo de deterioração é a carbonatação do concreto. O tempo para esta manifestação atingir a superfície do aço de reforço é, em geral, décadas.

Em um ensaio controlado utilizando vigas de concreto armado Zhang e Sun (2017) apresentam que existe uma tendência de diminuição das frequências naturais com o aumento da profundidade da carbonatação. Este efeito danoso causa o aumento na massa por unidade de comprimento, que reduz as frequências naturais.

Com base nos danos apresentados, o Quadro 1 relaciona as patologias e as propriedades modais.

Quadro 1: Relação dos danos com as propriedades modais

| Dano | Efeito | Resultado esperado |
|----------------------------|---|--|
| Delaminação | Maior amplitude de deslocamento em lajes. | -Diminuição das frequências naturais; - Amortecimento tende a aumentar. |
| Reação Álcali-Sílica (AAR) | Diminui a rigidez. | Diminuição das frequências naturais. |
| Formação de Etringita | Fissuração e preenchimento dos poros do concreto. | Aumento e diminuição do amortecimento. |
| Corrosão interna do aço | Fissuramento. | Diminuição das frequências naturais. |
| Carbonatação | Aumento de massa por unidade de comprimento. | Diminuição das frequências naturais. |

Fonte: Autor

2.4 A Inspeção visual

Uma das metodologias aplicadas para definir a existência de danos em estruturas é a inspeção visual. O procedimento é bastante simples, inclui o uso de martelos, binóculos, fitas de medição e instrumentos de prumo. Além disso, é dependente da capacidade do inspetor em identificar danos ou indícios de irregularidades aparentes em estruturas. O diagnóstico visual de OAEs é amplamente difundido em vários países. Existem, porém, variações de agrupamento dos elementos e da nota final obtida pela estrutura de acordo com o país onde a se executa (MOORE et al, 2001).

Segundo McRobbie, Wright, Chan (2015), a importância da inspeção visual é vital, pois é a principal fonte de informação das condições das Obras-de-Arte-Especiais. Pode ser considerada uma metodologia não destrutiva e básica, a qual tem capacidade para indicar a necessidade de realização de ensaios complementares. Frequentemente, esta é a única metodologia de inspeção utilizada.

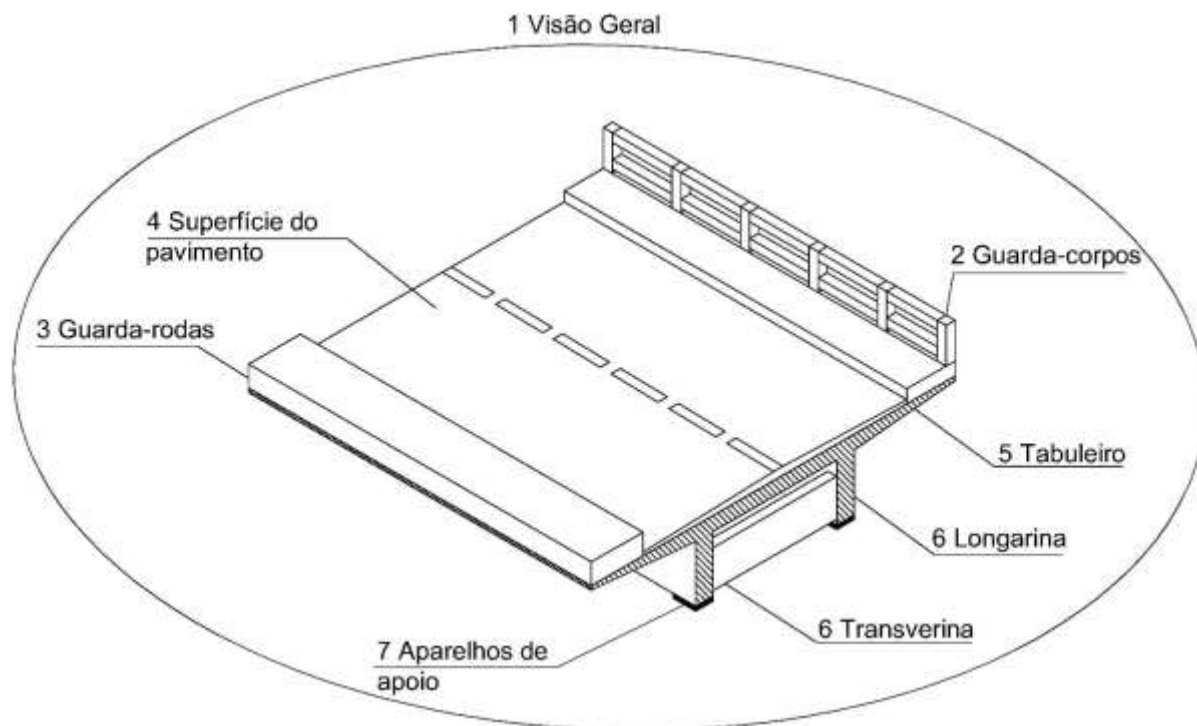
Para que consiga garantir a segurança para seus usuários, a inspeção deve ser planejada e deve abranger todos os grupos ou elementos estruturais. Segundo Lin e

Yoda (2017), um inspetor deve começar no topo da ponte e conduzir o trabalho de inspeção no sentido do caminho percorrido pelas cargas, desta maneira pode se garantir a inspeção total da estrutura. O caminho das cargas se refere à analogia com a ordem do carregamento da estrutura em serviço: as cargas oriundas do tráfego são aplicadas ao tabuleiro, na sequência os esforços seguem para as vigas e transversinas, aparelhos de apoio, pilares e, por último, fundação, chegando ao solo, respectivamente. Assim, a ordem da inspeção seria:

- 1) Observar a ponte como um todo;
- 2) Observar os guarda-corpos;
- 3) Observar os guarda-rodas;
- 4) Observar a superfície do pavimento;
- 5) Observar o tabuleiro da ponte;
- 6) Observar as longarinas e transversinas;
- 7) Observar os aparelhos de apoio;
- 8) Observar os pilares;
- 9) Observação final da ponte como um todo.

A Figura 6 apresenta a sequência da inspeção através do caminho das forças. Não foram representados os passos (8) referentes aos pilares e (9) observação final da ponte como um todo. O guarda-corpo foi representado apenas em uma lateral para melhor compreensão da sequência de inspeção de acordo com o caminho das cargas. As longarinas e transversinas pertencem ao mesmo grupo.

Figura 6: Sequência de inspeção segundo o caminho das cargas



Fonte: Adaptada de Lin e Yoda (2017).

Os mesmos autores apresentam os objetivos a serem atingidos pelos processos de inspeção para que seja sinônimo de efetividade:

- 1) Garantir a segurança das pontes;
- 2) Registrar a condição das pontes de maneira sistemática e periódica;
- 3) Encontrar anormalidades e prever o dano;
- 4) Fornecer dados necessários para tomar decisões que consideram os reparos, o reforço e a substituição;
- 5) Configurar uma manutenção adequada e com base nos dados de inspeção;
- 6) Analisar os resultados de inspeções acumulados para tornar o projeto e a construção de pontes mais adequado.

Embora o planejamento da inspeção tenha por objetivo investigar a condição de todos os elementos, o resultado final pode ser influenciado por fatores como: o número de falhas; de áreas a serem inspecionadas e; as normas utilizadas. Quanto maior o número de falhas, mais difícil de se obter um resultado adequado de investigação. Quanto maior o número de pontos a serem inspecionados, pior o desempenho. A complexidade das normas utilizadas para definição da condição também pode representar dificuldades para o inspetor (GALLWEY e DRURY, 1986).

Em um estudo com resultado satisfatório, Tenžera, Puž e Radić (2012) fazem considerações sobre a inspeção visual. Indicam que a resposta de cada inspetor pode

variar frente as mesmas sensações e excitações externas. A percepção é individual e portanto, não é objetiva, é dependente da experiência e da interpretação do observador.

Segundo Shaban, Avsar e Caner (2020), inspetores com menor experiência tendem avaliar as pontes com notas menores que profissionais mais experientes. Além disso, existe uma tendência de pontes antigas receberem notas menores que em comparação com novas, mesmo se não apresentarem problemas de maior severidade.

Segundo Omar e Nehdi (2018), embora apresente característica subjetiva e limitações inerentes ao processo, a inspeção visual pode oferecer resultados consistentes, os quais são dependentes da motivação e equipamentos utilizados durante a investigação.

No Brasil, existem duas normas de inspeção: a ABNT NBR 9452/2019 – Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto – Procedimento, apresentada no Anexo G - Inspeção visual segundo a NBR 9452/2019 e; a norma DNIT 010/2004 – PRO: Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido – Procedimento, apresentada no Anexo H – Inspeção visual segundo A DNIT 010/2004 PRO.

A exposição de metodologias complementares à investigação visual é apresentado no Manual de inspeção de obras de arte da Empresa Gaúcha de Rodovias – EGR – (2018). São exemplos de ensaios: Radar de penetração no solo (GPR); Ultrassom com Laser; Avaliação de Fadiga das Armaduras; Detecção de Cloretos; Ensaio de carbonatação; Emissões Acústicas. São previstos em pontes de concreto armado, protendido e em aço. Existem também ensaios destinados às fundações.

2.5 Monitoramento da Saúde Estrutural - SHM

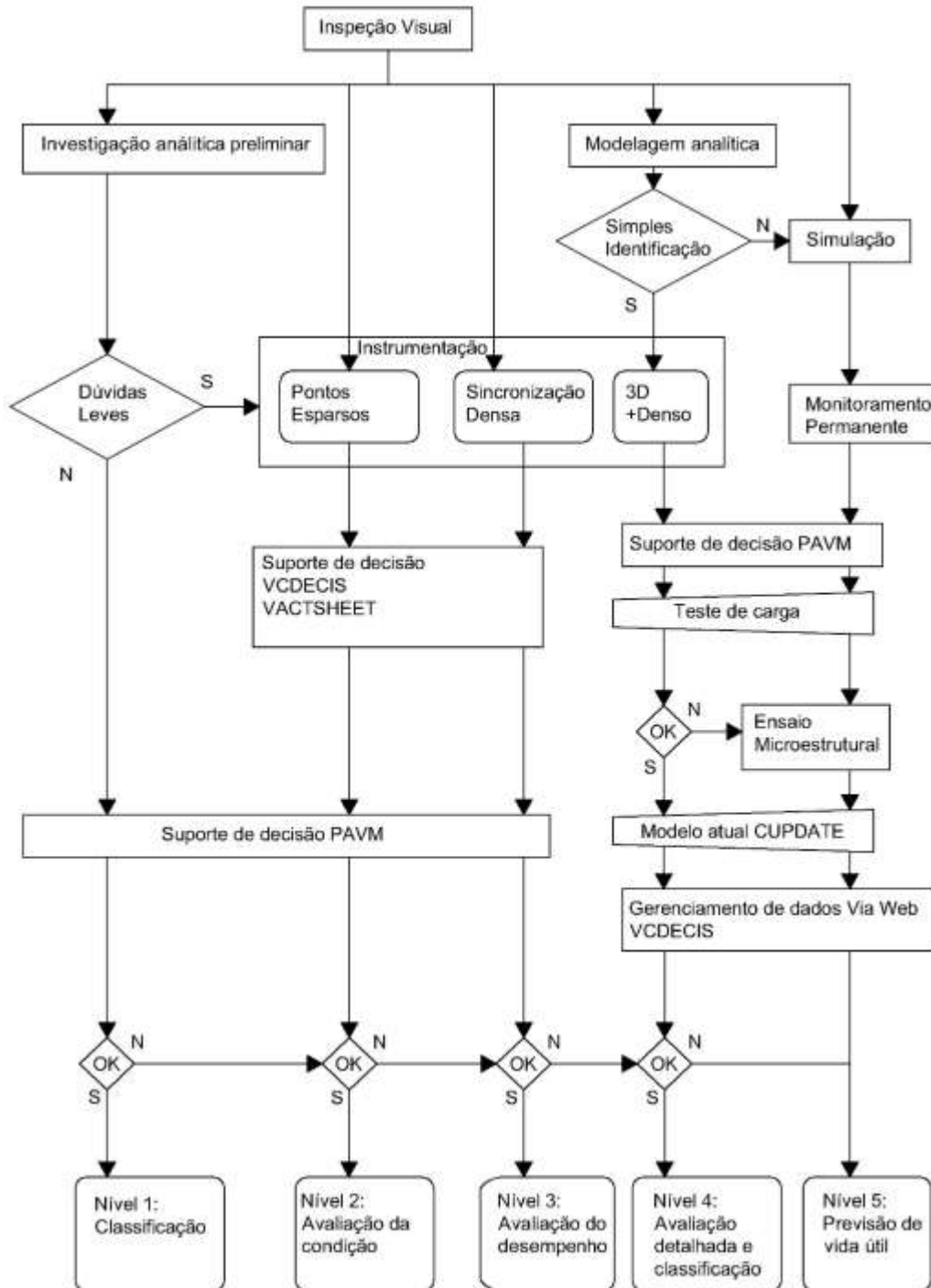
O *SHM* é um tipo de ensaio não destrutivo – *NDT* - mais avançado e é normalmente aplicado com a objetivo de caracterizar os principais parâmetros modais, os quais estão ligados ao modelo estrutural. Permite avaliar o nível de segurança de uma ponte existente frente ao carregamento estático e dinâmico, os quais são geralmente ligados à classificação quantitativa da condição. O indicador quantitativo mais comum tem origem na inspeção visual (ZANINI, FALESCHINI e CASAS, 2019).

Segundo Gatti (2019), os ensaios estático e dinâmicos são complementares. Os estáticos são divididos em diagnóstico e comprovação. O ensaio de diagnóstico é utilizado para medir respostas estruturais sob cargas externas conhecidas e fornece um indicativo do comportamento da ponte. Mede a rotação, o deslocamento e outras propriedades que colaboram para o conhecimento do comportamento estrutural. Além disso, permite o ajuste de um modelo em elementos finitos, o qual deve ser testado e validado.

O ensaio de comprovação aplica uma carga definida para diretamente demonstrar que a ponte pode suportar as cargas acidentais prescritas em normas sem sinal de perigo. Qualquer indicativo de desconformidade antes da carga limite ser atingida pode definir um nível de carga atuante menor sem comprometer o funcionamento da estrutura (ALAMPALLI et al, 2021).

A Figura 7 apresenta a hierarquia da metodologia do *SHM* para pontes. É possível constatar que a inspeção visual faz parte desta metodologia e é a primeira a ser aplicada. A medida que evoluem os níveis de investigação modificam-se a instrumentação e as técnicas utilizadas.

Figura 7: Hierarquia do SHM para pontes



Fonte: Adaptada de Wenzel (2009).

Fonte de excitação

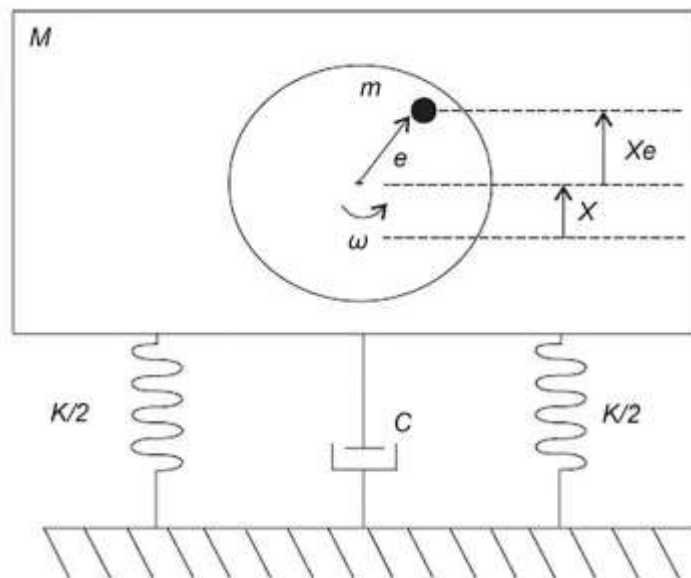
A necessidade de realizar ensaios dinâmicos exige o uso de uma fonte de excitação aplicada à estrutura sob investigação. Neste caso se tem duas alternativas: operacional e; experimental.

A forma operacional se refere aos métodos de vibração onde não existe informação sobre a excitação de entrada. Estas fontes podem ser verificadas no cotidiano como: o tráfego de veículos pesados; o vento; os trens; a temperatura e; entre outros. Também são conhecidos como sistemas para modelos de resposta (BREWICK, 2014; AN et al, 2019).

A forma experimental exige o conhecimento da excitação de entrada para ser utilizada. Pode ser executada pelo uso de motores de vibração ou martelos de impacto. A aplicação também é verificada em ensaios realizados em laboratório.

A Figura 8 apresenta um exemplo de fonte de excitação experimental onde é possível verificar o uso do motor de vibração com massa M , rigidez K e amortecimento do material C acoplado a uma estrutura. O desbalanceamento ou desequilíbrio, que é responsável pela excitação de vibração, é provocado por uma massa m , colocada em uma posição de excentricidade e do disco – distância da massa m ao eixo do motor, que está girando a uma velocidade angular ω . É possível ainda identificar o deslocamento da posição de equilíbrio estático do motor X e o deslocamento X_e da massa m (de SOUZA, CICOGNA e CHIQUITO, 2007).

Figura 8: Representação do desbalanceamento de motores acoplados a uma estrutura



Fonte: Adaptado de de Souza, Cicogna e Chiquito (2007).

O deslocamento X_e é fornecido pela Equação (1):

$$X_e = X + e \sin(\omega t) \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

X_e é o desbalanceamento da massa m ;

X deslocamento da posição de equilíbrio estático do motor;

e é a excentricidade;
 ω é a velocidade angular.

De acordo com a segunda lei de Newton, a força F_e causada pelo desbalanceamento é fornecido pela Equação (2):

$$F_e = ma = -me\omega^2 \sin(\omega t) \quad \text{Equação (2)}$$

A equação diferencial que governa o sistema é dada pela Equação (3):

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + Kx = (me\omega^2) \sin(\omega t) \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

M é a massa do motor;
 c é a constante de amortecimento do material;
 K é a constante da mola.

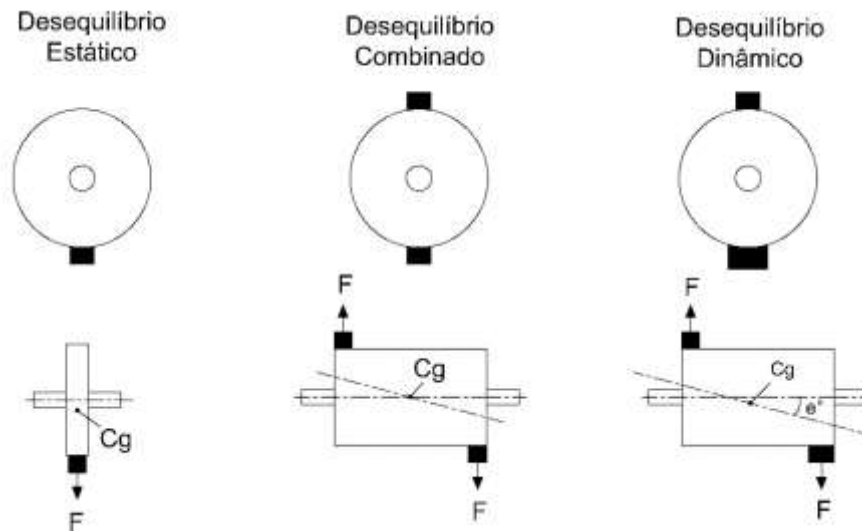
O uso de massas desbalanceadas pode ser realizado através de configurações diferentes em relação à quantidade e a posição das massas. É possível obter os desequilíbrios: estático; combinado e; dinâmico (ZAINAL, 2020).

O desequilíbrio estático acontece quando o eixo central é deslocado paralelamente à linha de centro de rotação. O lado mais pesado do rotor irá girar para baixo. Pode ser modificado ao adicionar ou remover peso em um plano de correção.

O desequilíbrio combinado ocorre quando duas massas iguais de desequilíbrio atuam com uma diferença de 180° em planos diferentes. Este desequilíbrio atua sobre o eixo da massa principal e atravessa a linha central de rotação. É marcado por uma rotação da máquina e o fenômeno do desequilíbrio é reconhecido ao comparar as leituras da amplitude de vibração do eixo e fase em cada extremidade do motor. Os dados obtidos desse desequilíbrio apresentam amplitudes de vibração idênticas com a fase, a qual difere 180° .

O desequilíbrio dinâmico ocorre devido à não-sobreposição da linha de centro da máquina de rotação e o eixo principal central. É uma combinação dos fenômenos de desequilíbrios estático e combinado. Este desequilíbrio resulta no eixo principal central em ambas inclinação e deslocamento da linha de centro de rotação. A correção é realizada ao aplicar um peso em um mínimo de dois planos. A Figura 9 apresenta as tipologias de desequilíbrio de acordo com a quantidade, posição e tamanho de massas. Onde C_g é o centro de gravidade; F é a força e; θ° é a angulação.

Figura 9: Tipos de desequilíbrio



Fonte: Adaptado de Zainal (2020) apud Kiral e Karagülle (2006).

Em relação ao uso de martelos de impacto, esta é a forma mais simples de aplicar uma excitação experimental à estrutura. Geralmente, a estrutura instrumentada sofre impactos por um martelo de vibração modal, que possui um sensor de força integrado à ponta. A função da resposta da frequência entre o sensor de impacto e cada resposta obtida nos sensores é computada. Este processo é repetido várias vezes em diferentes locais para criar uma caracterização completa da estrutura na faixa de frequência de interesse (SRINIVAS et al, 2012).

Segundo Ewins (2000), a faixa de frequência, a qual é efetivamente excitada por este tipo de dispositivo, é controlada pela rigidez das superfícies de contato e a massa da cabeça do martelo. Quanto maior a rigidez do material, menor será a duração do pulso e maior será a faixa de frequência coberta pelo impacto. Similarmente, quanto mais leve a massa do impacto, maior a faixa de frequência efetiva. É por isso que um conjunto de diferentes extremidades de martelo e cabeças são utilizadas para permitir a regulação da faixa de frequência a ser compreendida.

Ao ser atingida pelo martelo, a estrutura experimentará um pulso de força, o qual é substancialmente aquele da meia forma de onda. Estas fontes de impulso são chamadas de sinais curtos com alta amplitude, causadas por martelos, queda de peso e entre outros (TOMCZYK e LAYER, 2015).

Uma das dificuldades de aplicar a excitação utilizando um martelo é a garantia que cada impacto é essencialmente o mesmo que o anterior, não em termos de magnitude, como em posição e orientação relativa à superfície. Ao mesmo tempo, os múltiplos impactos ou o “pulo do martelo” deve ser evitado pois, dificulta a fase de processamento do sinal.

Local da extração de amostras

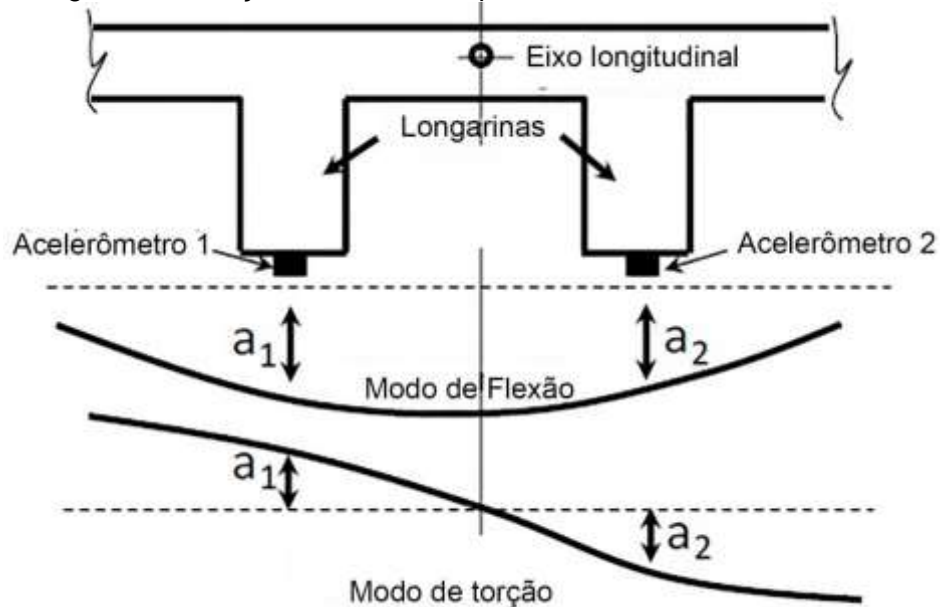
A localização dos sensores na estrutura pode variar de acordo com a necessidade de se obter um modo de vibração específico para a análise. Ao se tratar especificamente de acelerômetros, Zhang et al (2020) utilizou duas vigas em concreto como estudo de caso e posicionou sensores a $1/3$ do vão à esquerda e; outro à metade do vão. Os golpes foram aplicados à $1/4$ do vão à direita por um martelo.

Em pontes, a ABNT NBR 15307/2005: Ensaaios não destrutivos – Provas de cargas dinâmicas em grandes estruturas – Procedimento, indica que a posição igual a $1/3$ do comprimento do vão tem por objetivo medir a resposta de cada laje. Posições sobre os pilares têm o objetivo de identificar o comportamento dos pilares e identificar também o comportamento da fundação. Segundo Morghental et al (2019), posições iguais a $1/3$ do vão são usadas pois apresentam vários modos da estrutura.

Segundo Ghatti (2019), sensores à metade do vão são utilizados para avaliar o primeiro modo de vibração, enquanto aqueles localizados a $1/4$ e $1/3$ do comprimento do vão avaliam o segundo e terceiro modos, respectivamente. Além disso, sensores sobre os pilares podem ser úteis para indicar a existência de uma restrição em vãos adjacentes.

O uso de sensores a $1/4$ do vão também pode ser visualizado em Consuegra e Santos (2015). Estes autores utilizam outra configuração de posição para dois sensores, mais precisamente sob as longarinas, no centro da viga, na mesma seção da ponte, de cada lado do eixo longitudinal. O objetivo era distinguir entre os modos de torção e flexão através dos dados de aceleração registrados. As acelerações – a_1 e a_2 - para o modo de flexão em pontos onde estão os sensores são similares em magnitude e sinal (a_1+a_2) enquanto as acelerações para o modo de torção são de magnitudes similares e sinais opostos (a_1-a_2). A Figura 10 apresenta as posições dos sensores para a identificação de formas modais.

Figura 10: Posição dos sensores para conhecer as formas modais



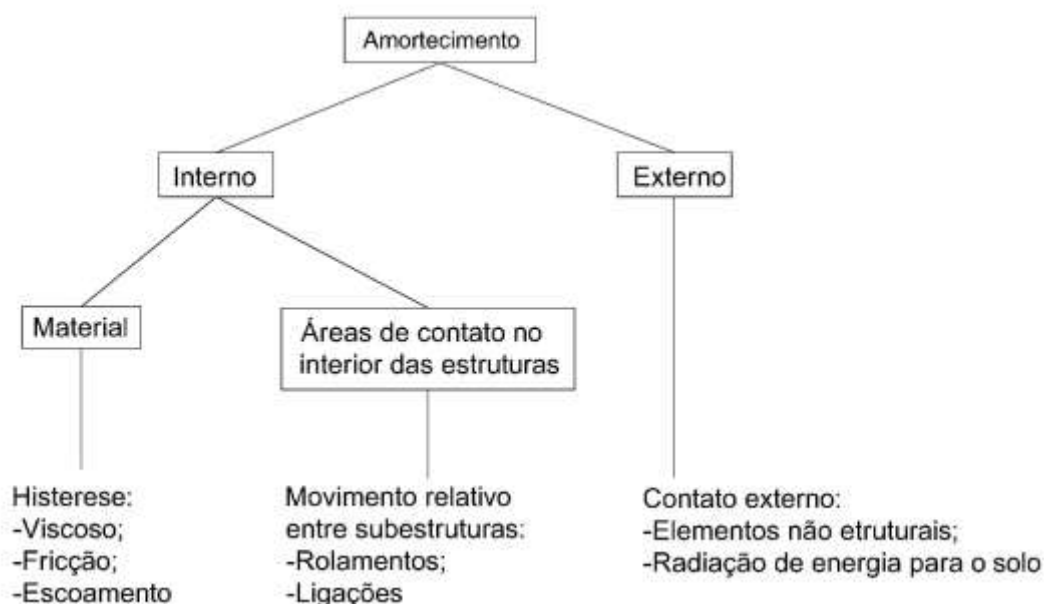
Fonte: Adaptado de Consuegra e Santos (2015).

2.6 Amortecimento

Segundo Chopra (2012), o amortecimento é o processo pelo qual a vibração diminui a amplitude. Este processo ocorre principalmente pela transformação da energia mecânica em calor, onde geralmente mais de um dispositivo de dissipação ocorre ao mesmo tempo. São exemplos de dispositivos de dissipação as fricções existentes entre a estrutura, os elementos não estruturais e também a abertura e o fechamento de micro fissuras no concreto. Portanto, o amortecimento global de uma estrutura é a soma das contribuições do amortecimento estrutural, dos elementos não estruturais e também através da radiação de energia para o solo.

A classificação do amortecimento pode ser realizada de acordo com a Figura 11.

Figura 11: Formas de amortecimento



Fonte: Adaptada de Bachmann et al (1995).

Ocorrência do amortecimento em elementos estruturais

O amortecimento total de uma estrutura é a soma da contribuição dos amortecimentos existentes. A parcela referente ao amortecimento estrutural sempre ocorre, já aquelas com origem em elementos não-estruturais e através da radiação de energia para o solo podem apresentar diferentes magnitudes ou simplesmente não estarem presentes.

A Tabela 4 apresenta a taxa de amortecimento viscoso equivalente para diferentes tipos de materiais de construção.

Tabela 4: Amortecimento material de diferentes materiais

| Material | ξ (%) |
|--|-----------|
| Concreto armado | |
| - Tensão de baixa intensidade (sem fissuras) | 0,7 – 1,0 |
| - Tensão de média intensidade (totalmente fissurado) | 1,0 – 4,0 |
| - Tensão de alta intensidade (totalmente fissurado), sem escoamento da armadura de reforço | 0,5 - 0,8 |
| Concreto protendido (sem fissuras) | 0,4 – 0,7 |
| Concreto parcialmente protendido (levemente fissurado) | 0,8 – 1,2 |
| Materiais compostos | 0,2 – 0,3 |
| Aço | 0,1 – 0,2 |

Fonte: Adaptada de Bachmann et al (1995).

Em OAEs expostas à vibração vertical, elementos não-estruturais como o pavimento ou trilhos apresentam geralmente baixa influência sobre o amortecimento.

A radiação de energia para o solo através de ondas também pode contribuir significativamente para a taxa de amortecimento modal equivalente. No caso de

apoios em aço, pouca influência é exercida sobre o amortecimento. Enquanto estruturas de suporte em contato direto com o solo, como é o caso de colunas ou pilares, possuem média ou grande influência.

Segundo Battista (2021), devido à dependência de vários parâmetros, o amortecimento tende a apresentar uma dispersão acentuada. Além disso, destaca que em relação à amplitude dos deslocamentos dinâmicos, a dispersão é facilmente identificada em medições onde a fonte de excitação é operacional e induzida pelo tráfego de veículos. Isto se deve às características dos veículos como a suspensão e as rodas, as quais formam um sistema massa-mola-amortecedor que atua como um excitador e atenuador de amplitudes.

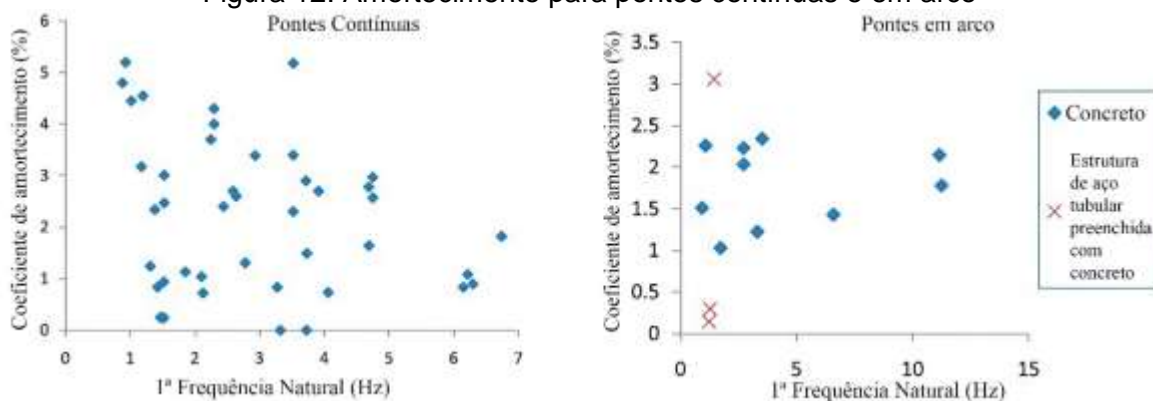
As magnitudes do deslocamento dinâmico produzido pelo tráfego dos veículos em um tabuleiro de ponte tende a ser menor que os produzidos por um único veículo pesado sobre a ponte. É possível, portanto, que o amortecimento definido a partir do tráfego de vários veículos apresente além da dispersão valores menores de amortecimento.

Amortecimento em pontes obtido por outros autores

Li et al (2014) apresentam um estudo com uma coleção de taxas de amortecimento e frequências naturais de 114 pontes na China – destas 43 eram pontes contínuas, 35 simplesmente apoiadas, 11 em pórticos rígidos contínuos, 13 em arco, 9 com estais e, 3 suspensas. Em relação ao material, 20 pontes em aço, 87 em concreto armado e 7 mistas, as quais apresentavam também concreto armado. O maior vão principal possuía 620 metros e o menor 4,70 metros.

A Figura 12 apresenta as taxas de amortecimento para a primeira frequência natural de pontes contínuas e em arco, construídas em concreto ou em aço e concreto.

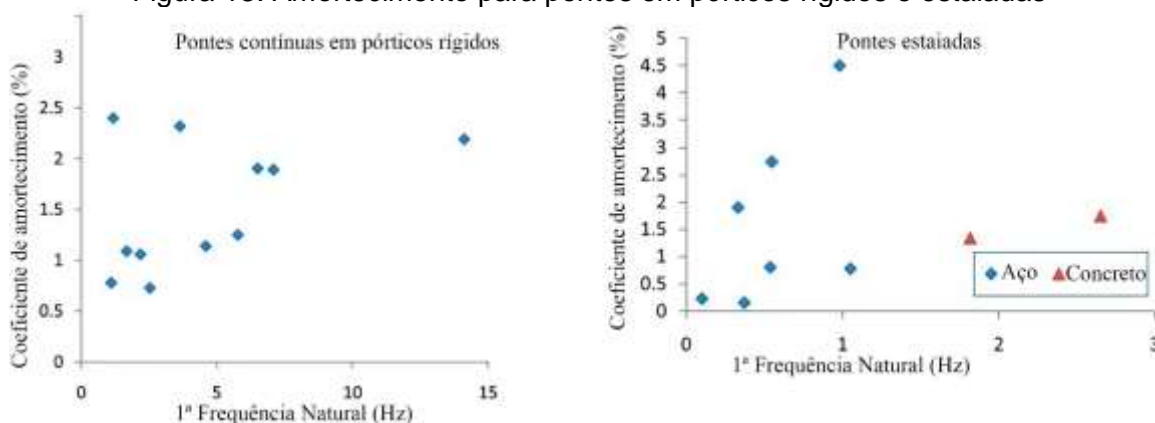
Figura 12: Amortecimento para pontes contínuas e em arco



Fonte: Adaptada de Li et al (2014).

A Figura 13 apresenta as taxas de amortecimento para a primeira frequência natural de pontes contínuas em pórticos rígidos e estaiadas, construídas em concreto ou aço.

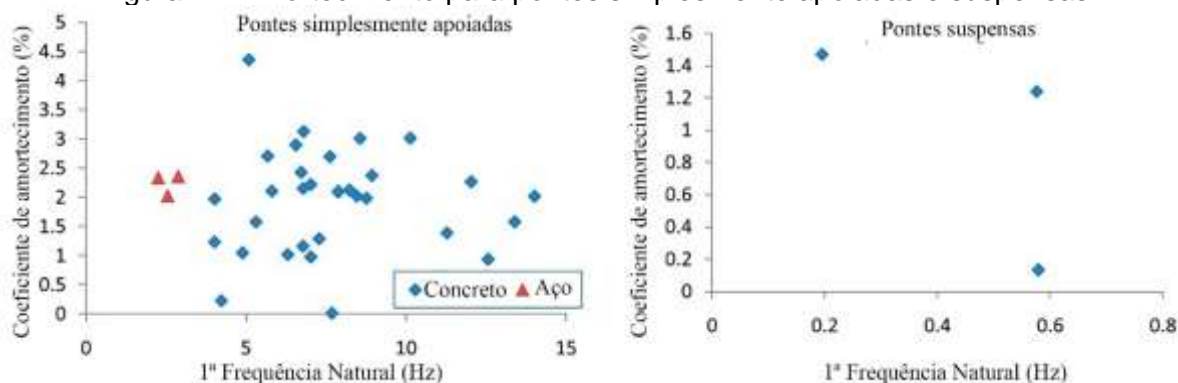
Figura 13: Amortecimento para pontes em pórticos rígidos e estaiadas



Fonte: Adaptada de Li et al (2014).

A Figura 14 apresenta as taxas de amortecimento para pontes simplesmente apoiadas e suspensas, construídas em aço e concreto.

Figura 14: Amortecimento para pontes simplesmente apoiadas e suspensas



Fonte: Adaptada de Li et al (2014).

O mesmo autor apresenta também uma relação de taxas de amortecimentos obtidas e o comprimento do vão principal das pontes ensaiadas. Geralmente, é possível observar que as taxas de amortecimento do primeiro modo são dispersos para todos os ensaios em pontes. O mesmo vale para a relação das taxas de amortecimento com o comprimento do vão principal. Portanto, não existe uma relação específica entre a taxa de amortecimento do primeiro modo e a frequência natural do primeiro modo e os comprimentos dos vãos principais.

Para pontes em aço, a taxa de amortecimento de 2% aparentemente é favorável. Para pontes em concreto armado, os valores das taxas de amortecimento devem ser considerados de acordo com o tipo de ponte. A Tabela 5 apresenta a faixa de valores propostos para a taxa de amortecimento para as pontes, considerando a tipologia e o material.

Tabela 5: Amortecimento para pontes de acordo com o material e a tipologia

| Tipo de ponte | Aço (%) | Concreto armado (%) | Concreto-aço (%) |
|-------------------------------|---------|-------------------------|------------------|
| Contínua | 2,34 | < 6 (4) ^a | - |
| Simplemente apoiada | 2 e 2,5 | < 3,5 (3,5) | - |
| Arco | - | $1 < \xi < 2,5$ (2,5) | 0,3 e 3,06 |
| Contínua com pórticos rígidos | - | $0,5 < \xi < 2,5$ (2,5) | - |
| Estaiadas | < 4,5 | 1,745 e 1,339 | - |
| Suspensas | < 1,5 | - | - |

^aValores em parênteses são valores propostos para a taxa de amortecimento

Fonte: Adaptada de Li et al (2014).

Segundo Battista (2021), existem valores usuais para o amortecimento de pontes de acordo com o tipo estrutural apresentado na Tabela 6.

Tabela 6: Amortecimento das pontes de acordo com o tipo estrutural

| Tipo estrutural | ξ (%) | |
|---|--|-----|
| Pontes de aço | Chapas soldadas, pavimento asfáltico | 0,8 |
| | Chapas soldadas, pavimento em concreto | 1,0 |
| | Peças parafusadas (ligação por atrito) | 1,5 |
| | Peças rebitadas | 1,5 |
| Pontes em concreto | Armado | 2,5 |
| | Protendido (protensão completa) | 2,0 |
| | Protendido (protensão parcial) | 2,5 |
| Pontes mistas aço-concreto | Vigas de alma cheia | 1,5 |
| | Vigas treliçadas | 2,0 |
| Pontes de ligas de alumínio | 2,0* | |
| Pontes de madeira | 8,0* | |
| Pontes de material compósito (matriz polimérica + fibras de vidro ou carbono) | 6,0* | |

*Valores apenas indicativos

Fonte: Adaptado de Battista (2021).

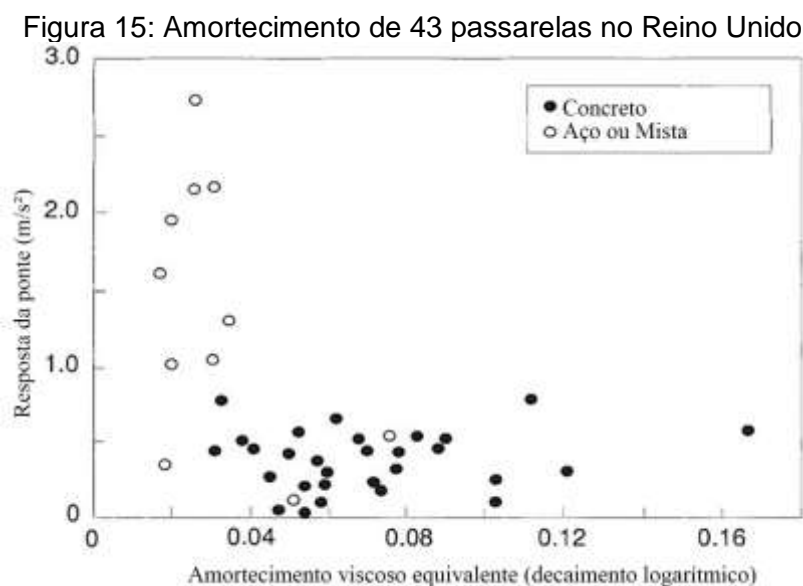
Porém, segundo Bachmann et al (1995), de modo geral, o amortecimento de uma ponte não deve exceder 2%. Assim, a dissipação de energia em uma ponte é classificada como baixo amortecimento, que compreende uma faixa de estruturas com amortecimento (ξ) menor que 20% (CLOUGH e PENZIEN, 2003).

Segundo Castellanos-Toro et al (2018), o amortecimento não apresenta nenhuma relação com as características geométricas das pontes ou com materiais. Além disso, em pontes e passarelas, quase 60% dos amortecimentos variam de 1% a 5% para as frequências verticais. Sugere, porém, que um amortecimento menor que 1% não é comum para a maioria das pontes veiculares.

De acordo com Newmark e Hall (1982), o amortecimento é dependente do nível de deformação e deslocamento de uma estrutura. Além disso, sugerem que os valores para o amortecimento crítico são fornecidos para casos onde os níveis de tensão de trabalho não sejam superiores à metade da tensão do escoamento. Neste caso, os valores do amortecimento crítico para estruturas de concreto com fissuramento considerável varia de 3% a 5% quando expostas a sismos.

Amortecimento em passarelas

As passarelas em aço e concreto protendido possuem um amortecimento da vibração muito baixo. Como resultado, as vibrações podem se acentuar bastante durante a passagem de um pedestre. A Figura 15 apresenta o valor da taxa de amortecimento para 43 passarelas localizadas no Reino Unido.



Fonte: Adaptada de Bachmann et al (1995).

A Tabela 7 apresenta outros valores comuns para as passarelas. Problemas com a vibração não possuem grande possibilidade de ocorrerem se a taxa de amortecimento for maior que 0,6% (BACHMANN et al, 1995).

Tabela 7: Valores comuns do amortecimento para passarelas

| Tipo de construção | Taxa de amortecimento ξ (%) | | |
|---------------------|---------------------------------|-------|--------|
| | Mínimo | Médio | Máximo |
| Concreto armado | 0,8 | 1,3 | 2,0 |
| Concreto protendido | 0,5 | 1,0 | 1,7 |
| Passarela mista | 0,3 | 0,6 | - |
| Aço | 0,2 | 0,4 | - |

Fonte: Bachmann et al (1995).

A grande variedade de fontes de dissipação e elementos que tem influência sobre o amortecimento explica porque diferentes estruturas ou tipologias estruturais construídas com os mesmos materiais podem ter diferentes valores de amortecimento.

2.7 Metodologias para a medição do amortecimento

Para a definição do amortecimento em sistemas dinâmicos, uma representação microscópica detalhada não é vista como boa prática. Entretanto, são utilizados modelos simplificados que representam várias formas de dissipação de energia e envolvem pequenos deslocamentos.

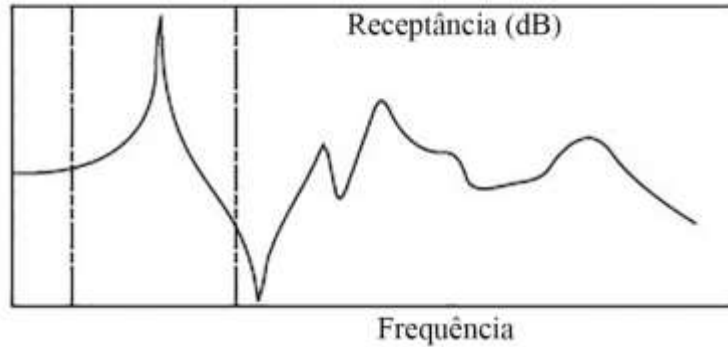
É comum expressar o amortecimento de sistemas reais em termos da taxa de amortecimento viscoso equivalente ξ , o qual demonstra taxas de queda similares às obtidas em condições de vibração livre (CLOUGH e PENZIEN, 2003).

Para a obtenção do amortecimento normalmente se empregam os métodos da metade da potência ou da queda logarítmica. Respectivamente, o primeiro método citado é em domínio de frequência, enquanto o segundo é em domínio de tempo.

Método de meia potência

Segundo He e Fu (2001), este método determina o valor da frequência natural através da identificação do valor de pico no gráfico de frequência natural x magnitude. Figura 16 apresenta um gráfico de frequência onde é possível visualizar um pico predominante referente a frequência natural de um conjunto de dados.

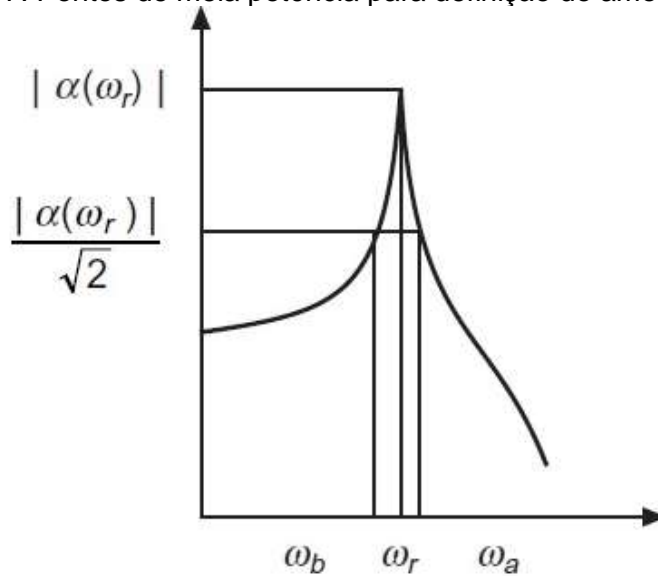
Figura 16: Identificação da frequência através do método Peak Picking



Fonte: Adaptada de He e Fu (2001).

O amortecimento pode ser determinado através da definição dos valores iguais à metade do pico da frequência natural, em ambos os lados. A Figura 17 apresenta o pico de frequência natural ω_r , e os pontos de meia potência ω_b e ω_a – localizados em cada lado do pico proeminente. Em geral, os pontos de meia potência apresentam 3 dB de diferença com o pico de frequência natural.

Figura 17: Pontos de meia potência para definição do amortecimento



Fonte: Adaptada de He e Fu (2001).

Onde as amplitudes das frequências ω_a e ω_b são definidos pela Equação (4).

$$\omega_a = \omega_b = \frac{|\alpha(\omega_r)|}{\sqrt{2}} \quad \text{Equação (4)}$$

A Equação (5) determina a taxa de amortecimento.

$$\xi_i = \frac{1}{2} \frac{\omega_a - \omega_b}{\omega_r} \quad \text{Equação (5)}$$

Devido a notável simplicidade, este método pode oferecer resultados rápidos. Entretanto, possui limitada precisão. É dependente do valor de pico da frequência, o qual é muito difícil de medir com precisão. É comum o amortecimento resultante ser superestimado.

Frequentemente os pontos referentes à metade da potência passam por uma interpolação pois não coincidem com dados realmente medidos. Assim, falta estabilidade e confiabilidade nos resultados obtidos por este método.

Segundo Li et al (2014), é mais adequado quando é necessário determinar a taxa de amortecimento de um grande volume de dados. Segundo Wu (2015), este método é válido para taxas de amortecimento menores que 0,1%.

Método do decaimento logarítmico

Este método determina a taxa do amortecimento em domínio de tempo. É definido através de um intervalo de tempo considerado, onde é necessário identificar a amplitude dos picos inicial e final. Considera um número N de períodos consecutivos, positivos e inteiros além do valor das amplitudes dos picos de início e fim (CANTIENI, 1984).

Em primeiro momento, deve-se determinar o coeficiente de decaimento logarítmico (δ) a partir da Equação (6). O resultado é adimensional.

$$\delta = \frac{1}{N} \ln \frac{A_0}{A_n} \quad \text{Equação (6)}$$

Onde:

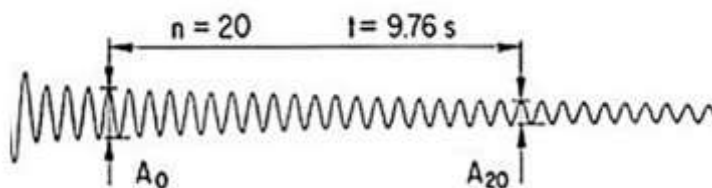
N - número de picos considerados no período de tempo;

A_0 – amplitude do primeiro pico;

A_n – amplitude do último pico.

A Figura 18 apresenta um trecho de aceleração considerado para o qual são estimados 20 picos e as amplitude inicial (A_0) e final (A_{20}), respectivamente.

Figura 18: Decaimento Logarítmico

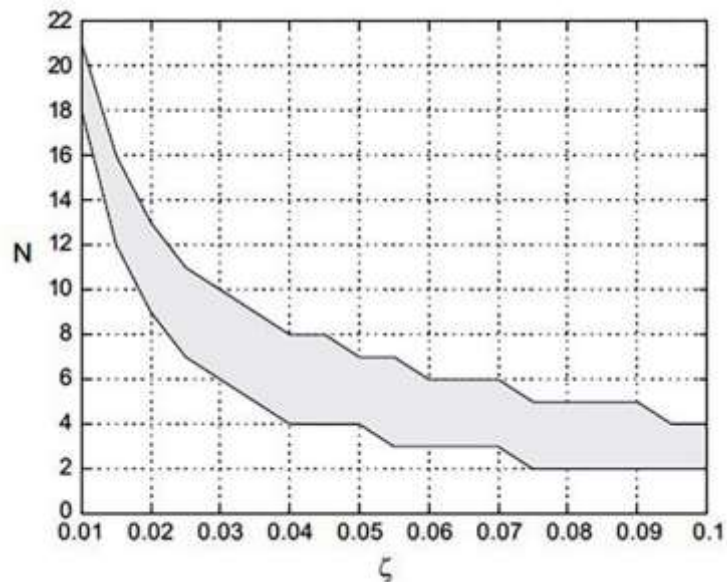


Fonte: Adaptada de Cantieni (1984).

O aumento do número de períodos N entre o primeiro e o último pico verificado melhora a estimativa da taxa do amortecimento. Porém, não melhora a qualidade da resposta de maneira contínua. A existência de ruído nas amostras experimentais interfere na qualidade do resultado.

Para minimizar a influência do ruído sobre o resultado, é possível utilizar o guia para a escolha ideal de períodos N sugerido por Tweten, Ballard e Mann (2014). A Figura 19 apresenta o número de períodos N para uma faixa de amortecimento que varia de $0,01 < \xi < 0,1$. É possível identificar que existe um N mínimo e máximo para cada faixa da taxa de amortecimento.

Figura 19: Guia para a escolha do N de acordo com o amortecimento



Fonte: Adaptada de Tweten, Ballard e Mann (2014).

Determinado o decaimento logarítmico δ , a taxa de amortecimento ξ pode ser conhecida obtido através da Equação (7) (RAO, 2010).

$$\xi = \frac{\delta}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta^2}} \quad \text{Equação (7)}$$

Outra maneira de estimar de maneira mais rápida a taxa do amortecimento é através da Equação (8).

$$\xi = \frac{\delta}{2\pi} \quad \text{Equação (8)}$$

Normalmente, é apresentado na forma adimensional.

A taxa do amortecimento obtido através da queda logarítmica é dependente da amplitude de ciclos consecutivos. Assim, ciclos que ocorrem na porção inicial

fornecerão uma resposta de amortecimento diferente daquela que ocorre em ciclos na porção final da amostra da vibração. Geralmente nestes casos, a taxa de amortecimento diminui com a diminuição da amplitude (CLOUGH e PENZIEN, 2003).

A efetividade deste método é diminuída em sistemas que apresentam duas ou mais frequências naturais. Assim, é altamente recomendado utilizar um filtro passa-banda³ antes de processar os dados. Estes necessitam de uma ordem n para serem aplicados e bons resultados podem ser obtidos para um filtro de primeira ordem. Filtros de maior ordem aumentam a discrepância da resposta.

Segundo Wenzel (2009), o *Random Decrement Technique* – *RDT* - e o método de *Stochastic Subspace Identification* – *SSI* – aparentam ser efetivos. Porém, o mesmo autor cita que o *RDT* apresenta falhas em sistemas com mais de uma frequência e seu uso fica atrelado ao uso de um filtro de passagem de frequências aplicado previamente.

2.8 Frequência natural

Segundo An et al (2019), a frequência natural é considerada um parâmetro global junto às formas modais e a matriz de flexibilidade pois representam um comportamento da estrutura em nível de sistema. O termo global indica que o valor assumido por esta propriedade é função das características físicas da estrutura. Portanto, mudanças nas características físicas induzem a mudança nas frequências (TAROZZI, PIGNAGNOLI e BENEDETTI, 2020).

De acordo com a teoria de vigas de Euler-Bernoulli, a frequência natural de uma viga simplesmente apoiada pode ser conhecida ao utilizar a Equação (9). É frequentemente aplicada na análise dinâmica de vigas com massa constante ao longo do comprimento, bem como valor constante de rigidez EI e um número infinito de graus de liberdade n (ATMACA, 2019; MAKARIOS, 2020).

$$\omega_n = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} \text{ (rad/s)} \quad \text{Equação (9)}$$

Onde:

n é o número do modo;

³ Dispositivo utilizado para isolar ou filtrar frequências que pertencem a uma banda ou faixa de frequências específicas.

L é o comprimento (m);

E é o módulo de elasticidade do material (kN/m²);

I é o momento de inércia da seção transversal (m⁴);

\bar{m} é a massa por unidade de comprimento.

Para uma estimativa inicial, a frequência natural é frequentemente associada ao comprimento do vão. Neste caso, a primeira frequência natural de uma viga simplesmente apoiada – simplificação do modelo de uma ponte - é inversamente proporcional ao comprimento. Além disso, o modo de vibração fundamental é de flexão. A relação também é válida para vigas contínuas (AKBARI, MAADANI e MAALEK, 2018).

Esta constatação também é apresentada em Bachmann et al (1995), que apresenta uma relação para a frequência fundamental de pontes rodoviárias que considera o comprimento do vão. A Equação (10) apresenta a estimativa da frequência fundamental.

$$f = \frac{100}{L} \text{ (Hz)} \quad \text{Equação (10)}$$

Onde:

L é o comprimento em metros.

Além do comprimento, a frequência natural é também associada ao dano estrutural. Esta relação se dá pois o dano altera o módulo de elasticidade E e/ou o momento de inércia I , os quais definem o valor assumido pela rigidez, e conseqüentemente alteram a frequência natural.

Assim, quando a frequência natural apresentar valores menores que o estimado, a estrutura pode apresentar menor rigidez, o que pode ser um indicativo de diminuição de desempenho ou a existência de dano. Em casos onde os valores medidos são maiores que os previstos por modelos numéricos ou funções matemáticas, a estrutura pode apresentar uma redundância do desempenho estrutural (SHABAN, AVSAR e CANER, 2020).

O uso da frequência como indicador de dano apresenta aspectos negativos:

- 1) É necessária uma base de dados estabelecidos que retratam a estrutura intacta e que permitam a comparação com valores atuais, o que é frequentemente impossível;
- 2) Por ser um parâmetro global, não apresenta sensibilidade a um dano local;

- 3) Pode sofrer a influência das condições ambientais como temperatura e umidade;
- 4) Não pode ser utilizado como único meio de identificação de dano;
- 5) As variações não podem ser sempre detectadas devido às restrições de medição e erros de processamento.

Porém, de forma geral, ao menos que ocorram danos de alta magnitude, a frequência possui baixa sensibilidade (ZHU et al, 2019; DAMMIKA et al, 2015).

Na detecção de danos, segundo Tarozzi, Pignagnoli e Benedetti (2020), a frequência do segundo modo é muito sensível aos danos locais. Esta reduz quase que linearmente com a severidade do dano. A mesma observação é realizada por Zhang et al (2020), o qual verifica a variação da frequência do segundo modo devido à ação de fissuras com origem na corrosão do aço de reforço.

Segundo Salgado et al (2014), que estudou a variação das frequências devido à inserção de cortes de serra transversais ao eixo longitudinal de vigas de aço, a identificação de dano foi possível de ser realizada a partir de mudanças maiores que 5%. Variações próximas a este valor podem ocorrer devido aos fatores ambientais e devido à precisão do instrumento utilizado.

Além disso, este parâmetro é útil para definir a calibração do modelo numérico, parte fundamental da análise. A validação do modelo ocorre ao comparar o modelo virtual com resultados experimentais. O ideal é que estes resultados apresentem pouca variação entre si.

Métodos para identificação da frequência

Na análise modal existem vários métodos que podem ser aplicados aos dados para definição dos parâmetros de vibração de interesse. Estes se separam em dois domínios: tempo e frequência. Dentre todos os métodos, neste texto se apresentam os métodos em domínio de frequência de Identificação de picos ou Método básico da frequência, o método de Decomposição dos Domínios da Frequência Melhorado – *EFDD*, e os métodos de Identificação do Subespaço Estocástico – *SSI* – em domínio do tempo.

Segundo He e Fu (2001), o método de Identificação de picos é o mais simples a ser empregado. Ao utiliza-lo, a frequência é definida a partir da identificação dos picos no gráfico em domínio de frequência. O amortecimento é definido a partir da definição de dois pontos auxiliares chamados de pontos de meia potência.

O lado negativo deste método é que caso as frequências não estejam bem separadas levarão à resultados equivocados. Outra desvantagem é que a seleção das frequências pode se tornar subjetiva se os picos do espectro não são bastante claros, além de não possuir um mecanismo próprio para minimizar o ruído (PEETERS e DE ROECK, 2001^a).

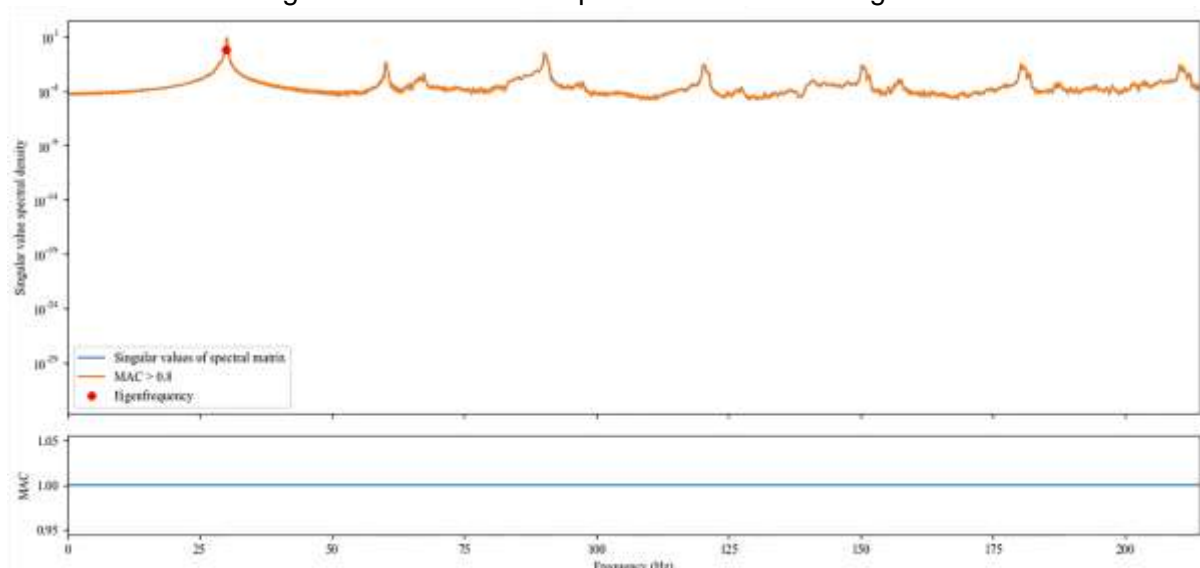
Assim como o método de Decomposição do Domínio da Frequência – *FDD*, o método de Decomposição do Domínio da Frequência Melhorado – *EFDD* – utiliza a decomposição do valor singular – *SVD* – sobre a matriz de energia espectral para separar a resposta do sistema em várias outras respostas com apenas um grau de liberdade. A melhoria do método ocorre através da conversão da resposta para domínio do tempo através da Transformada Rápida de Fourier inversa.

Deste modo, obtém-se como resposta uma função em domínio do tempo com comportamento em queda livre, a qual permite identificar a frequência natural e o amortecimento para o modo considerado (BRINCKER; VENTURA e ANDERSEN, 2001).

Além disso, o método utiliza o Critério de Concordância Modal – *MAC* – para avaliar a correlação entre vetores. O *MAC* considera valores entre 0 – representando inconsistência – e 1 – representando consistência. Valores maiores que 0,9 representam correspondência e que a frequência identificada realmente corresponde a uma resposta ao sistema (PASTO, BINDA e HARČARIK, 2012).

A Figura 20 apresenta o resultado obtido através da aplicação do *EFDD*. É possível identificar os valores singulares da densidade espectral. O trecho onde o *MAC* é maior que 0,8 é indicado na cor laranja (CARINI, 2021).

Figura 20: Densidade espectral dos valores singulares



Fonte: Autor

Para os métodos de Identificação do Subespaço Estocástico – *SSI*, o problema consiste em identificar um modelo estocástico que melhor representa o sistema através dos dados de saída. Uma vez que este modelo paramétrico é identificado e está disponível, os parâmetros modais podem facilmente ser derivados de modelos de matrizes.

Segundo Peeters e De Roeck (2001)^a, a implementação do método de Identificação do Subespaço Estocástico guiado por Covariância - *SSI-COV* - consiste na estimativa das covariâncias e, ao fim do processo, obter a matriz de transição do estado do sistema e a matriz de saída que especifica como os estados internos são transformados para a resposta. Os parâmetros modais são definidos a partir destas mesmas matrizes.

Oposto ao *SSI-COV*, o *SSI-DATA* impede a definição da covariância entre as saídas. Permite diminuir as dimensões das matrizes através da introdução da ideia de sensores de referência. Por sensores de referência entende-se aqueles dispositivos que apresentam sinais com melhor qualidade. Estes sensores capturam sinais com todos os modos. Se os melhores forem selecionados como referências, a qualidade da identificação do sistema não é comprometida (PEETERS e DE ROECK, 1999).

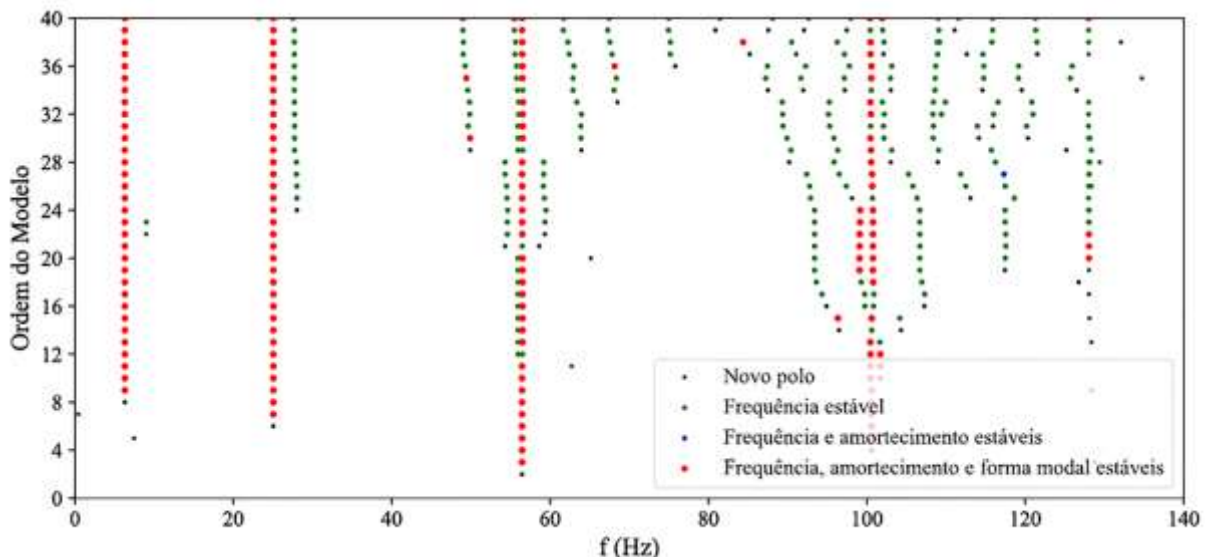
O algoritmo *SSI-DATA* tem início através da projeção de linhas de espaço das saídas do futuro em uma linha de espaço do passado que se refere aos sensores. A ideia por trás dessa projeção é que mantêm todas as informações no passado que são úteis para prever o futuro (WENZEL e PICHLER, 2005).

Tanto *SSI-COV* quanto *SSI-DATA* fornecem um gráfico conhecido como diagrama de estabilização, o qual é uma importante ferramenta na identificação de um sistema.

Este diagrama permite a comparação de modelos de ordens diferentes. Caso a frequência natural, a taxa do amortecimento e a forma modal considerada sejam estáveis dentro de um limite pré-estabelecido, estes são indicadores verdadeiros do comportamento da estrutura. Modos que não estabilizaram totalmente durante o processo podem ser excluídos dos parâmetros modais de forma facilitada (PEETERS, DE ROECK, 2001^a).

A Figura 21 apresenta um diagrama de estabilização. No diagrama os pontos na cor preta representam um novo modo; pontos na cor verde representam apenas a estabilização da frequência; pontos na cor azul representam a estabilização da frequência e do amortecimento e; pontos na cor vermelha representam a estabilização da frequência natural, amortecimento e forma modal (CARINI, 2021).

Figura 21: Diagrama de estabilização



Fonte: Carini (2021).

Segundo Peeters e De Roeck (2001)^b, os métodos *SSI* apresentam vantagens quando comparados ao método de Identificação de picos:

- As frequências são selecionadas com base nos diagramas de estabilização em vez da busca por picos nas densidades espectrais dos sinais;
- As estimativas de amortecimento são mais confiáveis;
- Modos que ocorrem próximos podem ser separados.

2.9 Indicadores de dano

Além da variação das propriedades modais, é possível realizar a estimativa do dano a partir do uso de métodos com base na vibração. Pode-se citar a intensidade de vibração, também conhecido como índice V , o qual é apresentado na ABNT NBR 15307:2005 - Ensaio não destrutivo – Provas de cargas dinâmicas em grandes estruturas – Procedimento e; a relação entre aceleração pico-a-pico e índice de dano DI .

ABNT NBR 15307/2005: Ensaio não destrutivo – Provas de cargas dinâmicas em grandes estruturas – Procedimento

Esta norma estabelece o procedimento para realização de provas de carga dinâmicas em grandes estruturas e a classificação do dano a partir da magnitude da vibração V .

O índice de vibração V é um parâmetro empírico utilizado para estimar o nível de dano em estruturas. A norma padroniza a execução de um ensaio de carga dinâmica em grandes estruturas através da medição da vibração operacional, ou seja, sem a indução de fontes de vibração artificiais ou controladas para a realização do ensaio. O valor de V é empírico e expresso em relação à amplitude do deslocamento através da Equação (11).

$$V = 10 \log(160\pi^4 a^2 f^3) \quad \text{Equação (11)}$$

Onde:

a é amplitude da vibração em centímetros;

f é a frequência em Hertz.

A classificação do dano é realizada a partir da Tabela 8, a qual relaciona o índice V ao nível de dano existente:

Tabela 8: Níveis de dano em função do índice de vibração V

| V | Nível de dano |
|-------|---------------|
| 10-30 | Nenhum dano |
| 30-40 | Danos leves |
| 40-50 | Danos severos |
| 50-60 | Colapso |

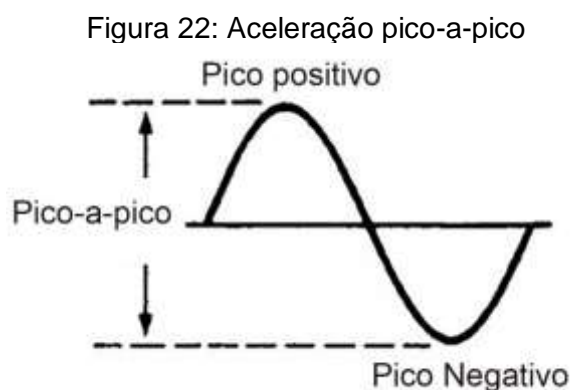
Fonte: ABNT NBR 15307/2005.

Segundo Casas e Rodrigues (2015), a intensidade da vibração não possui a habilidade de apresentar as diferenças entre condições boas ou ruins. Além disso, em alguns casos, este valor adimensional apresentou a tendência de diminuir o índice de dano com o aumento da vibração, o que não é adequado.

Segundo Wenzel (2005), a avaliação da intensidade da vibração para uma estrutura poderia fornecer informação considerável sobre fadiga, inclusive problemas relacionados a este efeito. Em pontes onde uma alta intensidade de vibração é registrada, problemas locais ligados às juntas de dilatação, apoios e resistência a água provavelmente se desenvolveram.

Aceleração pico a pico e índice de dano

Segundo Rawlins (2000), o valor da aceleração pico-a-pico é simplesmente uma medição da amplitude de uma forma de onda considerada do pico positivo ao pico negativo. A Figura 22 apresenta a aceleração de pico-a-pico.



Fonte: Adaptado de Rawlins (2000).

O valor da aceleração de pico-a-pico é apresentado na Equação (12)

$$Aceleração_{pico-a-pico} = ac_{max+} - ac_{ma-} \quad \text{Equação (12)}$$

Onde:

ac_{max+} é a aceleração máxima positiva;

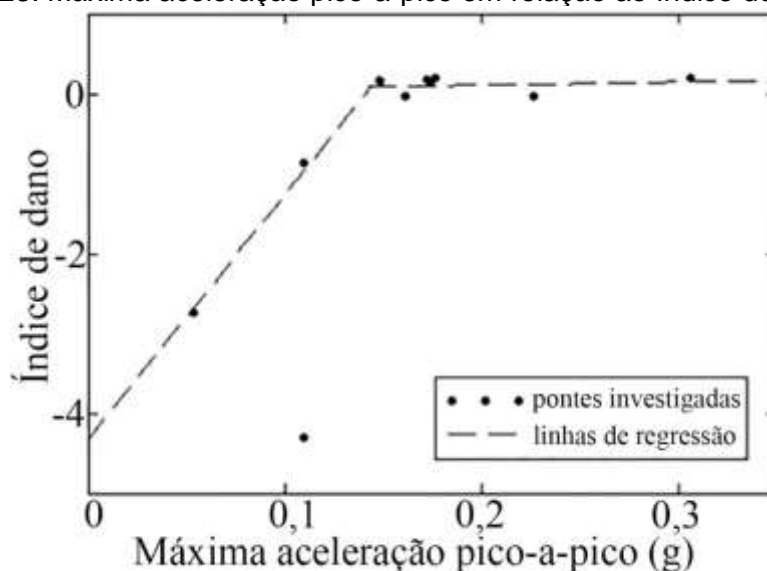
ac_{max-} é a aceleração máxima negativa.

Casas e Moughty (2017) apresentam uma relação entre a magnitude do dano e a intensidade da vibração que considera a aceleração pico-a-pico. Esta observação foi realizada a partir da passagem de um veículo com 450 kN em condição de tráfego normal em doze pontes em concreto armado com características brasileiras como estudos de caso.

Neste experimento pôde-se observar a existência de um limite de aceleração em torno de 0,15g, o qual poderia ser indicado como um fator de projeto para garantir a segurança e a durabilidade de tabuleiros de pontes. Valores abaixo deste limite possuem um índice de dano - *DI* - negativo e representam uma ponte saudável. Valores de aceleração maiores que 0,15g indicam um nível de dano e *DI* positivo. Além disso, valores de aceleração pico-a-pico próximos de 0,17g podem indicar danos relacionados à fadiga.

A Figura 23 apresenta a máxima aceleração pico-a-pico em relação ao índice de dano *DI*. É possível identificar uma mudança na taxa de dano a partir da aceleração igual a 0,15g.

Figura 23: Máxima aceleração pico-a-pico em relação ao índice de dano *DI*.



Fonte: Adaptado de Casas e Moughty (2017).

As linhas de regressão calculadas para obter índices de dano *DI* a partir da aceleração máxima de pico-a-pico são apresentadas nas Equações (13) e (14). A Equação (13) representa a linha ascendente do gráfico, onde as acelerações máximas de pico-a-pico são menores que 0,15g; enquanto a Equação (14) representa o trecho retilíneo onde as acelerações máximas de pico-a-pico maiores que 0,15g até 0,30g.

A Equação (14) apresenta uma correlação de 96%, a qual demonstra uma boa confiabilidade em termos de relação entre dano e a máxima aceleração pico-a-pico.

$$DI = 30,613 \times ac_{max,p-p} - 4,308 \quad \text{Equação (13)}$$

$$DI = 0,381 \times ac_{max,p-p} + 0,044 \quad \text{Equação (14)}$$

Onde:

DI é o índice de dano;

$a_{C_{max,p-p}}$ é a aceleração máxima pico-a-pico em g.

A Figura 24 apresenta alguns dos estudos de caso avaliados a partir da aplicação do índice de dano DI por Casas e Moughty (2017). É possível observar em (a) a existência de danos facilmente identificáveis a partir da inspeção visual e DI positivo; em (b) existem manchas, porém não são identificadas quebras de material e DI também positivo; em (c) é possível verificar algumas manchas que podem indicar desconformidades e um DI negativo, ou seja, sem danos e; em (d) a manifestação de manchas que também podem indicar danos, porém com DI negativo.

Figura 24: DI e danos em pontes



Adaptado de Casas e Moughty (2017).

Os mesmos autores ressaltam que este parâmetro é um melhor indicador de dano que as medições de intensidade da vibração através do índice V . Além disso, alertam para a necessidade de revisar a norma ABNT NBR 15307/2005.

Índice de dano em relação à frequência

O índice de dano – DI_{freq} - utiliza a primeira frequência natural de flexão determinada nos ensaios dinâmicos e a frequência correspondente ao primeiro modo de flexão quando a ponte estava em bom estado. Esta relação é apresentada na Equação (15).

$$DI_{freq} = 1 - \left(\frac{f_{atual}}{f_{ref}} \right)^2 \quad \text{Equação (15)}$$

Onde:

DI_{freq} é o índice de dano da estrutura. Foi propositalmente chamado assim para diferenciar do índice de dano DI que utiliza a aceleração pico-a-pico;

f_{atual} é a frequência natural do primeiro modo de flexão identificada nos ensaios dinâmicos em Hz;

f_{ref} é a frequência natural de flexão estimada quando a ponte estava em bom estado.

Segundo Casas e Moughty (2017), como a frequência natural de pontes em bom estado ou no início da vida útil geralmente não é conhecida, a frequência natural do primeiro modo de flexão pode ser obtida através dos modelos em elementos finitos das pontes.

Ao adotar este procedimento é sabido que a frequência de referência f_{ref} pode não apresentar boa precisão, o que resulta em valores inadequados com DI_{freq} negativo. Porém, os mesmos autores observaram que para pontes sem qualquer dano e em boa condição, valores negativos de DI_{freq} foram obtidos. Enquanto que para pontes que apresentam dano, valores de DI_{freq} maiores que zero foram obtidos. Estas conclusões foram realizadas a partir da inspeção visual.

2.10 Acelerômetros

Os acelerômetros são dispositivos para a medição e sensoriamento da aceleração em um movimento linear, uma oscilação e a vibração de estruturas mecânicas. Utiliza a força da gravidade padronizada g para queda livre como uma unidade de medida: $1 g = 9,81 \text{ m/s}^2$ (NAWROCKI, 2016).

Existem três tipos principais destes equipamentos. Os *MEMS* capacitivos – Sistemas Micro-Eletrônico-Mecânicos -, piezoelétrico e piezoresistivo. A escolha depende das características a serem medidas. A faixa de medição, frequência de aquisição, sensibilidade triaxial, resolução e o ruído são importantes parâmetros para considerar durante a seleção do acelerômetro (SHIFERAW, 2021).

O *MEMS* é referido como capacitivo, porém esta definição pode ser utilizada também para acelerômetros piezoresistivos. Esta categoria de acelerômetro tornou os custos de manufatura mais baixos e permitiu que estes dispositivos apresentassem menores tamanhos. São frequentemente encontrados em telefones móveis, consoles de videogames e Dispositivos Montados em Plataformas – *SMD*.

Os acelerômetros piezoresistivos são bastante comuns e possuem resposta em corrente contínua - *DC*. Possuem ampla faixa de frequência com amortecimento por gás ou fluídos, que protege o acelerômetro. Possuem maior custo que o acelerômetro *MEMS*.

Os acelerômetros piezoelétricos são muito populares e disponíveis em diferentes níveis de sensibilidades, pesos, tamanhos e formas. Podem ser considerados os acelerômetros com maior durabilidade devido à habilidade de tolerância em condições ambientais hostis, incluindo temperaturas extremas -200°C a +400°C. Necessita de um cabeamento especial para evitar o ruído. O sistema necessário para sua operação é mais complicado e apresenta maior custo.

Usos de acordo com o tipo de acelerômetro

Os acelerômetros capacitivos *MEMS* apresentam resposta em corrente contínua - *DC*, os quais são mais adequados para medição da vibração em frequências baixas, movimentos e acelerações em estado estacionário. Apresentam um coeficiente sinal-ruído de baixa qualidade, frequência limitada e geralmente se restringem a níveis de aceleração menores que 200g.

Os acelerômetros piezoresistivos são os melhores em casos onde se deseja verificar o impulso/impacto, em casos com faixa de frequência e amplitude normalmente altos. Como exemplos pode-se citar o teste de colisão em carros e ensaios em armas. Medem frequências abaixo de zero Hertz e podem ser utilizados também para calcular informações referentes à velocidade ou deslocamento. Possuem baixa sensibilidade, o que o torna menos interessante para a realização de ensaios de vibração onde uma maior precisão é necessária. Apresentam sensibilidade à variação de temperatura, o que exige uma compensação térmica. Geralmente são utilizados para casos de ensaios de amplitude ou baixa frequência.

Os acelerômetros piezoelétricos são amplamente utilizados para ensaios e medições devido a ampla faixa de frequência, boa sensibilidade e fácil instalação. Possuem baixos níveis de ruído e devem ser considerados para casos de impacto e ensaios de vibração de todos os tipos. Não são indicados para casos onde os dados de velocidades e deslocamento são necessários devido à resposta em corrente alternada - *AC*. Não medem o valor da aceleração da gravidade em uma condição de repouso e a vibração abaixo de poucos Hertz. Exigem um amplificador de carga o qual pode se tornar saturado quando os níveis de aceleração atingem níveis fora do alcance, assim é importante selecionar um acelerômetro com uma faixa de medições

maiores que os níveis de acelerações esperados. A Tabela 9 apresenta as aplicações para cada tipo de acelerômetro.

Tabela 9: Aplicações de acordo com o acelerômetro

| Aplicação | Piezoelétrico | MEMS | Piezo-resistivo |
|--|---------------|------|-----------------|
| Aceleração estática (0 Hz, 1g) - Gravidade, orientação do sensor | | X | X |
| Força G (0 Hz, <25g) - Naves espaciais, centrífugas, aeronaves | | X | X |
| Sismos (<1Hz, <1g) - Terremotos, ondas, pontes | X | | |
| Vibração de baixa frequência (<5 Hz, <25 g) - Movimento humano, robótica | X | X | X |
| Vibração em geral (5 Hz a 500 Hz, <25 g) - Motor elétrico, suspensão de automóveis | X | X | |
| Vibrações de alta frequência (>500 Hz, <25 g) - Análise de ruído em motores, monitoramento em turbinas | X | | |
| Impactos em geral (<100 Hz, >200 g) - Ensaios em geral, ensaios de absorção de impacto | X | X | X |
| Alto impacto (<250 Hz, >200 g) - Ensaio de queda livre | X | | X |
| Impacto extremo (>1000 Hz, >200g) - Ensaios de colisão de veículos, metal em metal | X | | X |

Fonte: Adaptada de Hanly (2016).

Fixação do acelerômetro do celular à estrutura

O método de fixação do acelerômetro à superfície de medição é um dos fatores mais críticos na obtenção de resultados precisos. Pode resultar em uma redução na frequência de ressonância de fixação do acelerômetro, a qual limita de maneira severa a largura de banda útil. As fornecedoras consideram três tipos de fixação: parafusada; adesiva – incluindo cimento ou cera - e; magnética.

Segundo Ewins (2000), a montagem parafusada é raramente utilizada fora de uma condição de monitoramento regular ou frequente, onde o parafuso pode estar permanentemente instalado e que exige precisão em altas frequências. Enquanto isso, o uso de adesivos ou cera são menos confiáveis.

Para aplicações que envolvem o dano estrutural, o conforto humano e o ruído terrestre ou estrutural, a montagem adesiva ou magnética são não-destrutíveis e também mais convenientes (MILLER, SBURLATI e DUSCHLBAUER, 2018).

Quando os acelerômetros não estão instalados de maneira adequada na superfície de uma estrutura são produzidos erros nos sinais medidos, os quais degradam significativamente a precisão da medição. Se o movimento da estrutura não é corretamente transmitido ao sensor, devido à baixa qualidade da fixação, não pode ser medido verdadeiramente e pode ser responsável por dados sem precisão. A acoplagem não-rígida do acelerômetro à estrutura pode causar uma aceleração medida que não representa a estrutura (SHOKROLLAHIA, ADELA e AHMADIANB, 2017).

A fixação deficiente também pode ser a responsável pela existência de ângulos de inclinação. De acordo com Kuhlmann, Garaizar e Reips (2020), ângulos de 0,5° a 3° podem comprometer a precisão dos dados extraídos. Além disso, segundo Zhu et al (2020), as estruturas civis apresentam pequenas deformações, as quais correspondem a faixa de angulação de -5° a 5°. Assim, em situações extremas, onde o dispositivo foi instalado de forma inadequada, os dados extraídos podem corresponder a um ângulo de 8°. Outro fator de preocupação é a incorreta operação do dispositivo, o que pode resultar na perda de amostras extraídas com o smartphone (CAO e CHEN, 2020).

2.11 Uso do *SHM* utilizando celulares

Segundo Noel et al (2017), o uso de sensores wireless, tal qual é um celular, teve início devido ao alto custo de instalação dos tradicionais sensores com cabos. Esta metodologia também é chamada de *Mobile Phone Sensing* – MPS – e pode ser utilizado em áreas como o monitoramento de tráfego, ambiental, da interação social, do comportamento humano, no comércio, entre outros. É indicado para monitoramentos de curto prazo (KHAN et al, 2012).

Os sistemas wireless utilizam basicamente os mesmos dispositivos de medição que os sistemas com cabos. A comparação de custos entre estes sistemas é específico para o local, mas geralmente a eliminação de cabos é visto como positiva (FHWA, 2014).

A escolha por este equipamento ocorre devido a uma série de sensores instalados sobre a mesma plataforma como: acelerômetros, GPS, câmeras, microfones e sensores de proximidade. Um exemplo de variedade de sensores do smartphone pode ser observado no aplicativo *phyphox*, desenvolvido inicialmente para o ensino de física. Este aplicativo fornece aplicações para aceleração, giroscópio, GPS, luz, magnetômetro, pressão, acústica, mecânica, entre outros (STACKS et al, 2018).

Além deste, outro exemplo de aplicação é o *myFrequency – Vibration Analysis*, desenvolvido pela *APPtodate*, que mede a vibração de objetos e analisa o comportamento em termos de frequências e espectro de frequência. Permite a medição, armazenamento e análise dos dados de vibração a partir da instalação do dispositivo sobre o objeto que se deseja analisar. Os criadores deste dispositivo

indicam que existe uma variação de 1,1% entre os resultados quando comparados aos obtidos por sensores profissionais (APPTodate, 2017).

Segundo Kromanis (2020), estes aparelhos são considerados a próxima geração de sensores inteligentes junto com outros aparelhos e técnicas: sensoriamento robótico; sensoriamento wireless; GPS; visão de máquina; câmera de alta velocidade; câmera digital; vídeo-câmera; serviço de nuvem e; veículo aéreo não-tripulado - UAV. A Figura 25 apresenta os sensores *SHM* para a próxima geração (SONY, LAVENTURE e SADHU, 2019; MANIKANDAN et al, 2020).

Figura 25: Próxima geração de sensores para o *SHM*



Fonte: Adaptado de Sony, Laventure e Sadhu, 2019.

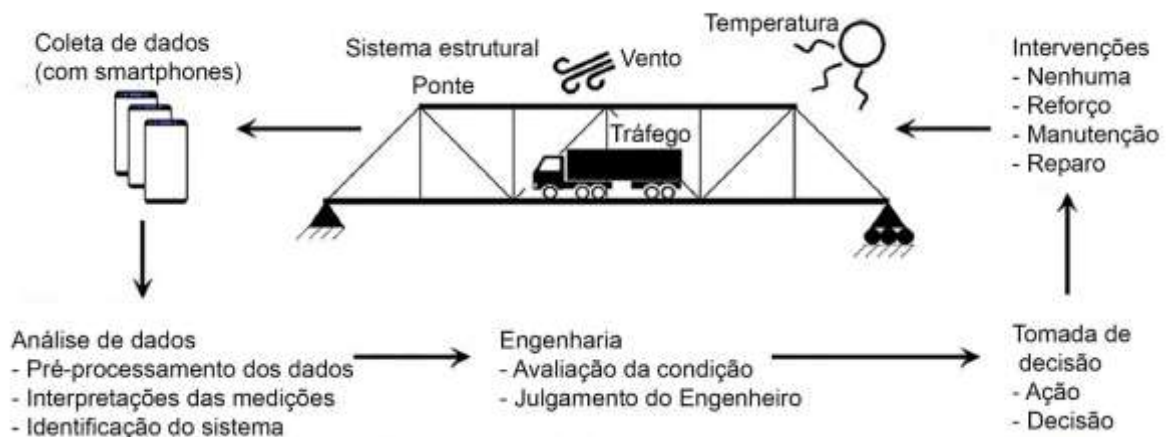
O uso do *SHM* através de celulares foi apresentado como uma nova ideia por Yu, Zhao e Ou (2012). Também é possível visualizar o uso deste dispositivo em Yoon et al (2014) e Pravia e Braido (2015). Estes estudos viabilizam o uso do celular e destacam a facilidade de operação, a possibilidade do uso em passarelas em aço, viadutos em concreto e a capacidade de popularizar a técnica.

A efetividade do uso dos acelerômetros de celulares pode ser comprovada através de Tozetto (2016), que estabeleceu um novo sistema de monitoramento de vibrações e comparou os resultados obtidos pelo uso de smartphones. A diferença entre os resultados de frequência comparados aos obtidos por um acelerômetro de celular foram inferiores a 3%. Além disso, segundo Kuyuk et al (2014), os acelerômetros de smartphones podem determinar, além das frequências naturais, a taxa do amortecimento de maneira muito aproximada àquela realizada pelo acelerômetro profissional.

O uso deste dispositivo móvel associado a um aplicativo de inspeção de pontes pode ser verificado em Ding et al (2016), os quais desenvolveram um sistema de inspeção visual a partir do registro fotográfico e notas atribuídas aos elementos estruturais. As fotos podem ser facilmente editadas ou adicionadas ao arquivo da ponte sendo investigada. Cada estrutura recebe um *QR (Quick Response) code* onde é possível obter informações detalhadas. O uso do smartphone substitui o registro de informações no papel. As informações coletadas no local da inspeção são enviadas para uma central de dados onde podem ser analisados e guiar futuras inspeções.

Um sistema de gerenciamento de pontes com o uso de celulares é apresentado na Figura 26, onde uma ponte, submetida aos carregamentos com origem no tráfego de veículos, vento e temperatura, possui geometria e condições de contorno definidas e oferece segurança para os usuários. Este sistema mede a resposta de pontes – deslocamentos ou sinais – obtidos devido às ações que a estrutura está sujeita - tráfego de veículo com carga, vento e temperatura - com pré-processamento e interpretação de dados para identificar as propriedades do sistema estrutural. Em relação aos deslocamentos estáticos, a temperatura é um agente principal, pois pode oferecer deslocamentos maiores que aqueles oriundos do tráfego de veículos sobre a ponte.

Figura 26: Sistema de gerenciamento de pontes com o uso de smartphones



Fonte: Adaptado de Kromanis (2020).

Ao utilizar smartphones para o monitoramento de pontes, pode-se considerá-los como:

- Sensores diretos, ou de contato, quando são fixados à ponte ou a um componente;

- Sensores indiretos, ou sem contato com a estrutura de interesse, quando se registram vídeos, imagens ou capturam dados da estrutura quando instalados em veículos;
- Parte de uma rede de smartphones ou *crowdsourcing*, na qual os parâmetros dinâmicos de pontes são coletados de um grupo de usuários.

O uso do sensoriamento direto é o mais simples, pode-se citar como exemplo Castellanos-Toro et al (2018). O uso concomitante do sensoriamento direto e do *crowdsourcing* pode ser visualizado em Cao e Chen (2020), onde voluntários realizavam a medição da vibração em edificações, passarelas, pontes e outras estruturas. Os dados extraídos eram enviados para uma nuvem para posterior análise.

Segundo Ercolessi, Fabbrocino e Rainieri (2021), o uso de medições indiretas na análise modal operacional é promissora. A aplicação desta técnica junto ao conceito *crowdsourcing* pode ser visualizado em Mei e Gül (2019) e Matarazzo et al (2020), os quais utilizam smartphones em veículos para extrair dados de aceleração e definir propriedades dinâmicas dos estudos de caso. No estudo de Mei e Gül (2019), foi observado que smartphones Android geralmente possuem uma amostra da frequência imperfeita, isto é, os intervalos de tempo desviariam de valores pré-definidos. Este comportamento também foi verificado por Ozer, Feng e Feng (2017).

No caso específico de Matarazzo et al (2020), foram utilizadas 174 viagens - 102 de teste e 74 com motoristas de UBER® - sobre a ponte *Golden Gate* em condição de operação normal. Os resultados apresentaram erros de 1,9% e 1,2% para as propriedades identificadas através dos celulares iPhone 5 e iPhone 6 nas viagens de teste. Nos carros UBER®, foram identificadas a frequência natural fundamental e outros quatro novos modos de vibração. Os smartphones utilizados pelos motoristas do UBER® foram: 19 viagens apresentavam dados de um modelo iPhone – do iPhone 5s ao iPhone X; Em 51 viagens, o dispositivo era um modelo Samsung - com o Galaxy S5 e Note 4 os mais populares; 2 viagens apresentavam dados do Pixel 2.

Outro exemplo de sensoriamento indireto é apresentado em Muliterno, Muliterno e Pravia (2019), os quais avaliaram a rugosidade longitudinal de pavimentos sobre pontes em concreto com diferentes smartphones instalados no interior de um veículo: um próximo ao assento do passageiro, fixo no chão e; outro na bandeja externa, na parte frontal do veículo, próximo à roda.

Configuração para o uso de acelerômetros *MEMS* de celulares na infraestrutura civil

As características dos acelerômetros instalados em smartphones diferem dos sensores de aceleração profissional, pois apresentam menor resolução. Assim, é necessário fazer correções ao utiliza-los.

Segundo Feldbusch, Sadegh-Azar e Agne, (2017), os quais desenvolveram o aplicativo *iDynamics*, utilizado para a análise da vibração de estruturas, é necessário o uso de um filtro passa alta de primeira ordem devido à baixa qualidade em uma faixa de frequência igual a 0,5 Hz, a qual corresponde a um ruído rosa. Segundo Ribeiro e Lameiras (2019), é necessário utilizar um filtro passa-alta de 1 Hz para eliminar a influência de picos de baixas frequências.

Além disso, resultados mais precisos podem ser obtidos para dados de aceleração com maiores amplitudes. No caso de estruturas relativamente flexíveis como passarelas, torres altas ou construções com grandes vãos, um sistema de identificação é possível sob condições ambientais, sem excitação artificial.

Outra característica se refere a não-homogeneidade da taxa de amostragem, a qual varia de acordo com o relógio interno do smartphone. Segundo Ozer, Feng e Feng (2017), este erro tem origem nos relógios utilizados pelo smartphone: UNIX e; Sistema Universal de Coordenadas – UTC, os quais não apresentam sincronia. O formato UNIX possui precisão e retorna as frações de dígitos após o separador decimal, enquanto o UTC corrige para um valor inteiro, neste caso, segundos. O processo para corrigir a taxa de amostragem e remover os defeitos de atraso de amostragem devido ao relógio do smartphone pode ser realizado através das Equações (16) e (17):

$$k_{correção} = \frac{f_{obtida}}{f_{desejada}} \quad \text{Equação (16)}$$

$$f_{real} = f_{identificada} * k_{correção} \quad \text{Equação (17)}$$

Onde:

$K_{correção}$ é coeficiente de correção da amostra;

f_{obtida} é taxa de amostra obtida;

$f_{desejada}$ é taxa de amostra visada;

f_{real} é a frequência natural real;

$f_{identificada}$ é a frequência natural identificada pelo sensor do smartphone.

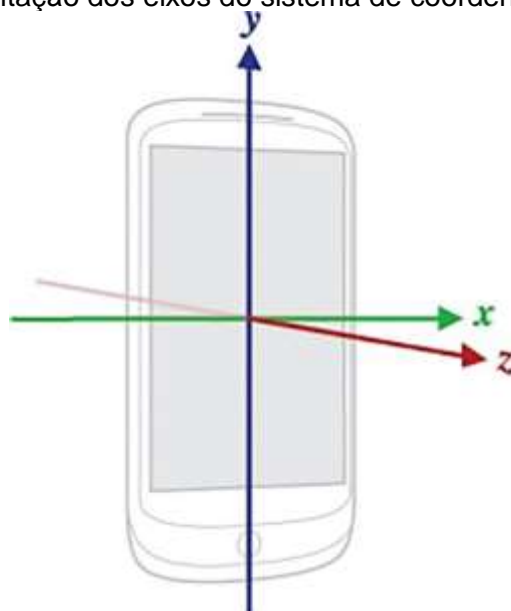
Estas imperfeições podem ser verificadas observando os passos-do-tempo obtidos através da leitura dos sensores. A taxa de amostra obtida tende a ser menor que a taxa desejada, o que causa a mudança dos picos no espectro.

A correção pode ser realizada após a aplicação da Transformada de Fourier. Pode ser observado que as respostas não diferem em termos de valores de picos de frequência, mas na magnitude dos valores da amplitude.

É fundamental verificar a orientação dos eixos das coordenadas do sistema do smartphone. No caso do Android, o sistema de coordenada é definido em relação à tela do dispositivo. O padrão é: eixo X é horizontal e que aponta para a direita; o Y é vertical e aponta que para cima e; o eixo Z aponta para fora da tela. As coordenadas atrás da tela possuem valor de Z negativo. O mais importante é que os eixos do sistema de coordenadas não alteram a posição quando ocorre a rotação da tela do dispositivo (ANDROID DEVELOPERS, sem data).

A Figura 27 apresenta a orientação dos eixos do sistema de coordenadas do Android.

Figura 27: Orientação dos eixos do sistema de coordenadas do Android



Fonte: Android Developers (201-).

Calibração de acelerômetros celulares

Os aparelhos celulares apresentam diferentes tipos de imprecisão, tais como: deslocamento de nível zero; sensibilidade; desalinhamento em relação aos eixos; variações de temperatura e; ruído.

O erro do deslocamento se refere ao desvio da resposta dos sensores sob uma condição zero g .

O erro de sensibilidade consiste no erro causado pelas sensibilidades dos eixos transversais e vertical. Refere-se ao coeficiente entre o valor de entrada e o valor de saída do acelerômetro, enquanto que nos eixos transversais a sensibilidade é um coeficiente de acoplamento entre os valores de saída do eixo considerado e do restante dos eixos (ZHU et al, 2020).

É desejável que a sensibilidade seja a maior possível, pois a vibração em sistemas *SHM* é pequena. Com maior sensibilidade, o sinal produzido é maior que o coeficiente-de-ruído – *SNR*. Por outro lado, nos eixos transversais a alta sensibilidade é indesejada, pois permite que um eixo considerado sofra a contaminação por acelerações que ocorrem em direções ortogonais, o que pode criar falsos modos de vibração (RIBEIRO e LAMEIRAS, 2019).

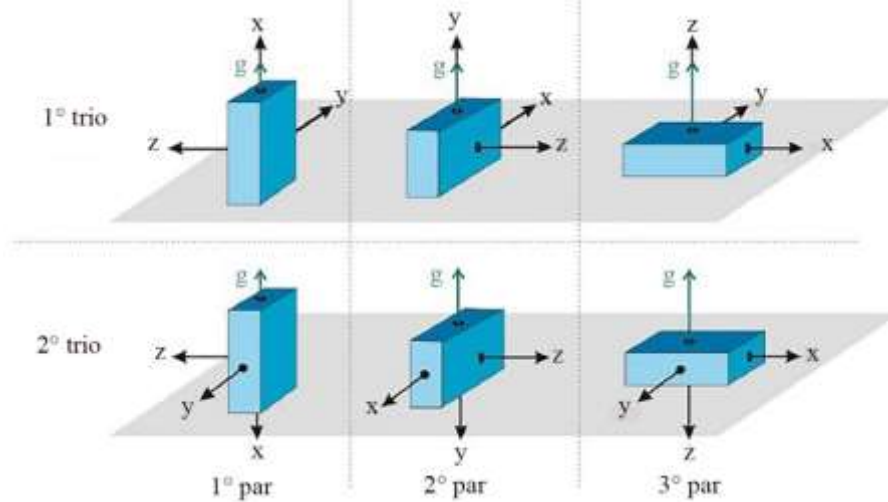
Os efeitos de temperatura causam a mudança do deslocamento e sensibilidade durante as medições, as quais levam aos erros. Para minimizar a influência destas falhas é necessário aplicar um método de calibração. Para isto, geralmente utiliza-se a premissa que a aceleração da gravidade age naturalmente sobre o eixo vertical – direção normal à superfície horizontal - e apresenta um valor de magnitude igual a $9,81 \text{ m/s}^2$ ou 1 g quando o sensor está em repouso (ST, 2014; ARCHER, 2017).

Um método de calibração que considera a constante gravitacional é o apresentado por Stančin e Tomažič (2014), o qual pode ser utilizado para corrigir as leituras do acelerômetro e do giroscópio. Faz uso de nove elementos de uma matriz de calibração \mathbf{C}_s e três do deslocamento de nível zero \mathbf{a}_0 através do vetor de aceleração e valores detectados pelo sensor. Pode ser realizado por um indivíduo sem treinamento e é eficaz para compensação estática das medições, as quais consideram que as fontes de erros são invariantes no tempo.

Para estimar os valores da calibração executam-se medições enquanto o sensor permanece em repouso sobre uma superfície horizontal em seis diferentes orientações. Estas medições são divididas em dois trios – positivo e negativo-, como apresenta a Figura 28.

O dispositivo ilustrado contém o sensor e os eixos das coordenadas são alinhados com os eixos do próprio sensor. Se o dispositivo contém superfícies arredondadas, uma cobertura/capa deve ser utilizada para precisamente posicionar o sensor nas posições indicadas.

Figura 28: Método de calibração

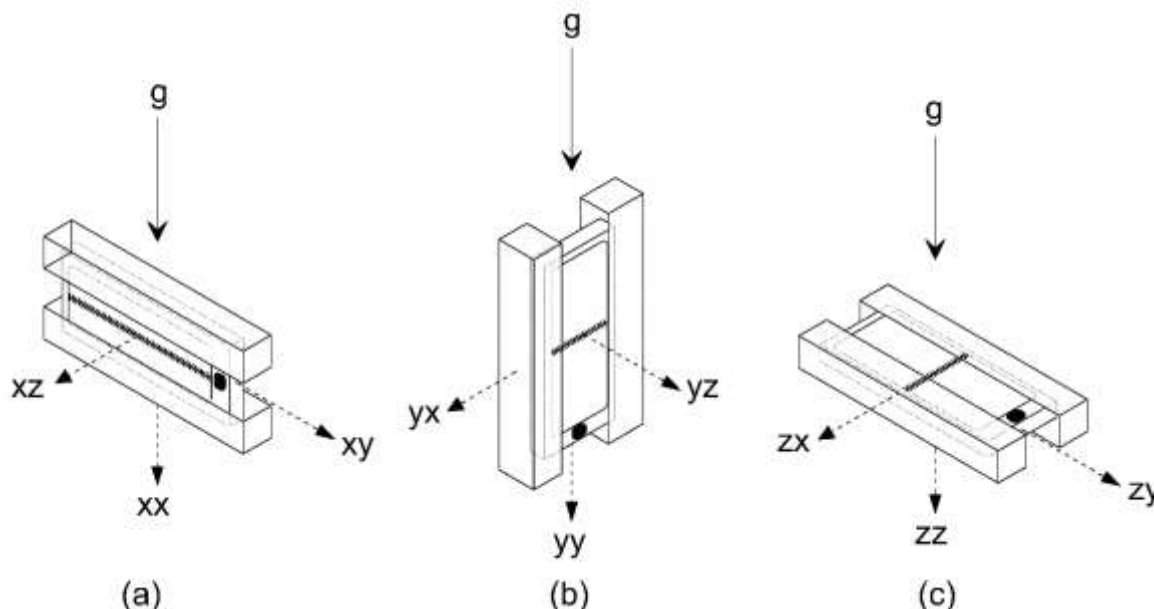


Fonte: Adaptado de Stančin e Tomazič (2014).

Para o primeiro conjunto de medições, cada um dos três eixos do sensor X, Y e Z são alinhados com a direção de g . No segundo conjunto, o mesmo processo é repetido, mas com direção oposta a g . As primeiras medições em ambos os conjuntos de medição representam o par para o eixo X, o mesmo é válido para os dois eixos remanescentes.

Para as leituras do primeiro trio, denota-se uma matriz gravitacional de ordem 3x3 como \mathbf{A}_+ . Nesta matriz, as colunas são os vetores de aceleração gravitacional no sistema de coordenadas intrínseco do sensor para cada uma das três medições, e as linhas representam os eixos das coordenadas intrínsecas e a respectiva sensibilidade. A Figura 29 apresenta as posições tomadas pelo celular graças ao auxílio de peças que garantem o alinhamento com os eixos X, Y e Z positivos. Em (a) a gravidade g coincide com o eixo positivo X; em (b) g coincide com o eixo positivo Y e; em (c) g coincide com o eixo positivo Z.

Figura 29: Calibração - posições positivas.



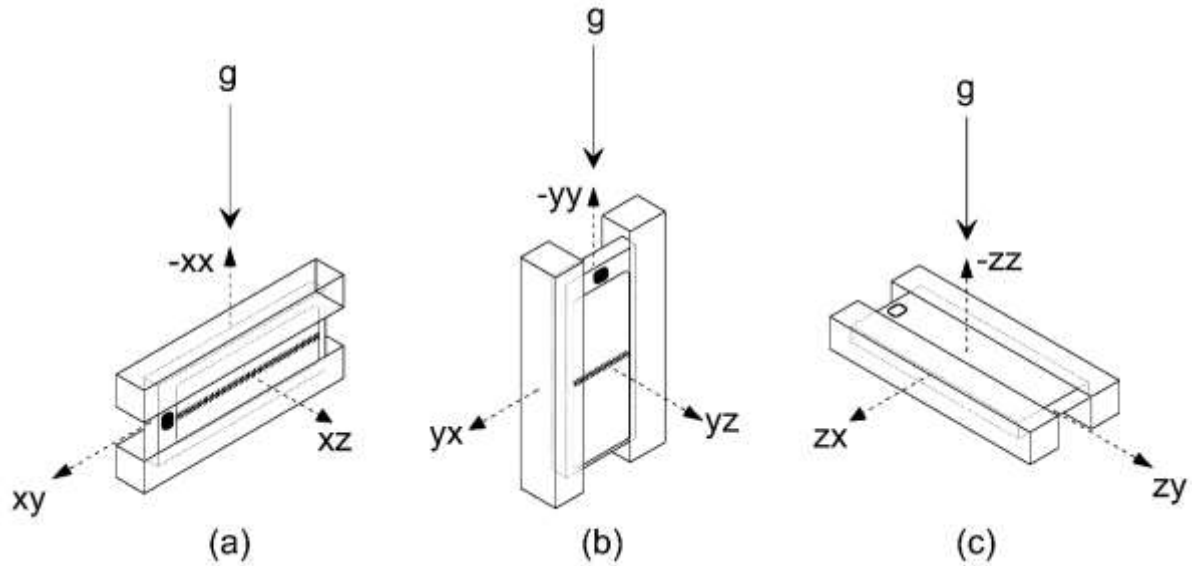
Fonte: Adaptado de Stančin e Tomažič (2014)

A Equação (18) apresenta a matriz $A+$ com a média as leituras das acelerações em uma situação com perfeito alinhamento. Nesta situação hipotética, onde ocorre o perfeito alinhamento entre o vetor da gravidade e o eixo vertical do celular, a matriz $A+$ é formada por valores iguais a 1 na diagonal principal.

$$A+ = \begin{bmatrix} xx & yx & zx \\ xy & yy & zy \\ xz & yz & zz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = I \quad \text{Equação (18)}$$

De forma similar, para o segundo conjunto de medições, cada um dos três sensores para os eixos X, Y e X é alinhado com a direção oposta a g . A Figura 30 apresenta este alinhamento. Em (a) a aceleração da gravidade g coincide com o eixo negativo $-X$; em (b) g coincide com o eixo negativo $-Y$ e; em (c) g coincide com o eixo negativo $-Z$.

Figura 30: Calibração - posições negativas



Fonte: Adaptado de Stančin e Tomažič (2014).

Desta maneira, combina-se com os vetores de aceleração em uma matriz de ordem 3x3 negativa **A-**. A Equação (20) apresenta a matriz **A-**.

$$A_{-} = \begin{bmatrix} -xx & yx & zx \\ xy & -yy & zy \\ xz & yz & -zz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} = -I \quad \text{Equação (20)}$$

A matriz de calibração **C_s** é obtida através da combinação das matrizes de aceleração estática positiva e negativa – **A_{s+}** e **A_{s-}** - as quais assumem valores iguais à média de aceleração do respectivo eixo. A Equação (21) define a matriz de calibração **C_s**:

$$C_s = 2(A_{s+} - A_{s-}) \quad \text{Equação (21)}$$

Onde:

C_s é a matriz de calibração (m/s²);

A_{s+} é a matriz de aceleração que considera *g* positivo sobre os eixos X, Y e Z no primeiro trio de medição (m/s²);

A_{s-} é a matriz de aceleração que considera *g* negativo atuando sobre os eixos X, Y e Z no segundo trio de medição (m/s²).

Os elementos da matriz de calibração **C_s** representam nove dos doze parâmetros de calibração necessários. Outros parâmetros têm origem no deslocamento de nível zero **a₀**, que exige a determinação da matriz **A₀**. Cada coluna desta matriz representa o deslocamento de nível zero obtido através do respectivo par

de leituras – positivo e negativo - de medições. A Equação (22) apresenta a definição da matriz A_0 :

$$A_0 = \frac{A_{s+} + A_{s-}}{2} \quad \text{Equação (22)}$$

A Equação (23) fornece o deslocamento de nível zero a_0 :

$$a_0 = \frac{A_0 * i}{3} = \frac{(A_{s+} + A_{s-})i}{6} \quad \text{Equação (23)}$$

Onde:

i é um vetor de ordem 3x1 composto por números iguais a 1.

Os parâmetros C_s e a_0 são inseridos na equação (24) e corrigem os dados da aceleração obtidos:

$$a = C_s(a_s - a_0) \quad \text{Equação (24)}$$

Onde:

a é a aceleração corrigida (m/s²);

C_s é a matriz de calibração (m/s²);

a_s é a aceleração obtida da estrutura de interesse (m/s²);

a_0 é o deslocamento de nível zero (m/s²).

A subtração dos valores medidos através da Equação (21) fornece as sensibilidades e alinhamentos, enquanto a adição destes valores na Equação (23) leva ao deslocamento de nível zero. Os parâmetros definidos podem ser utilizados em tempo real para compensar a imprecisão e calcular o verdadeiro valor de α através da Equação (24). O tempo de cada amostra utilizada na calibração foi de 15 segundos. Maiores detalhes podem ser encontrados em Stančin e Tomažič (2014).

Este não é o único meio de calibração que pode ser empregado. O uso de uma mesa de vibração é apresentado em Castellanos-Toro et al (2018). A mesa foi utilizada com três diferentes configurações, uma para cada eixo dos smartphones. Os sinais foram comparados com um sinal de referência fornecido por um acelerômetro *Wilcoxon Research 731A* e um amplificador *Wilcoxon Research P31* com sensibilidade do acelerômetro igual a ± 10 V/g. Este acelerômetro opera em uma faixa de frequência de 0,05 a 450 Hz. Os sinais do acelerômetro de referência foram convertidos em um formato digital com um aparelho *National Instruments DAQCard-6024E* 12-bit.

Especialmente, o estudo de Castellanos-Toro et al (2018) apresenta a calibração de 25 smartphones de três marcas – Motorola, LG e Huawei - para o *OMA* em pontes através das frequências fundamentais e as taxas de amortecimento. Os sinais dos três eixos de cada acelerômetro foi comparado em domínios de tempo e frequência com o sinal de referência. Os smartphones LG e Motorola apresentaram indicadores de desempenho satisfatório.

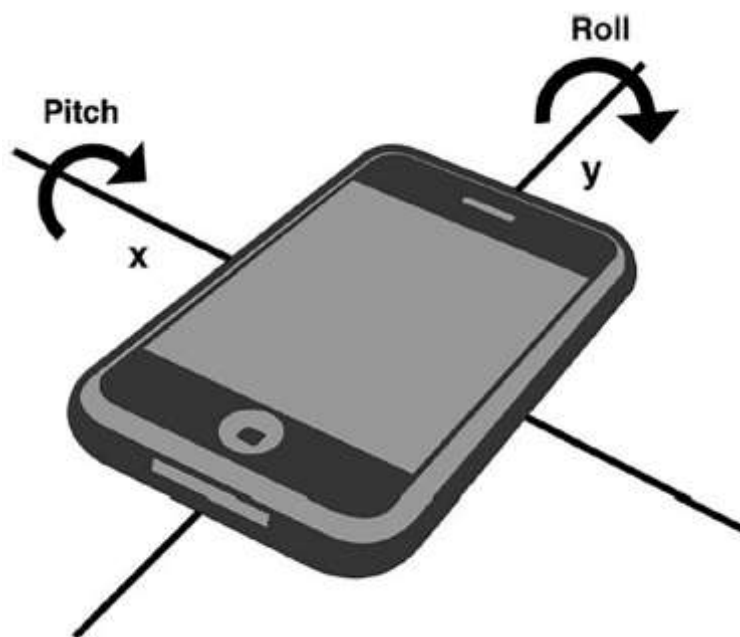
Outros métodos de calibração podem ser vistos em Archer (2017) como: de queda; pêndulo; prato giratório; atuador linear; estágio linear e; braço robótico.

Angulação de calibração

O uso das acelerações para definir os ângulos também é possível graças ao mesmo vetor da gravidade e a projeção nos eixos dos acelerômetros. Quando a ação da gravidade coincide perfeitamente com o eixo vertical, nenhuma aceleração é verificada ao longo dos eixos paralelos. Porém, geralmente é comum que ocorram rotações devido à péssima instalação do aparelho sobre as superfícies.

A rotação em torno do eixo vertical indica uma direção cardinal do aparelho. Enquanto as rotações em torno dos eixos X e Y são descritas como ângulos *pitch* e *roll*. A Figura 31 apresenta estes ângulos.

Figura 31 Ângulos Pitch e Roll



Fonte: Kuhlmann, Garaizar e Reips (2020)

Comumente, são utilizados três algoritmos para a conversão de acelerações em ângulos: um com base na inversa da função tangente; um com base na inversa da função seno e; um que é baseado na inversa função cosseno (ZHU et al, 2020).

O algoritmo com base na inversa da função tangente é utilizado devido a maior precisão, exige um número menor de operações matemáticas que outros algoritmos e possui uma sensibilidade incremental efetiva e constante. Porém, segundo Łuczak (2018), a tangente é uma função descontínua em pontos próximos a $\pm 90^\circ$. Além disso, dentro da proximidade destes pontos, os valores da função são muito altos.

As Equações (25), (26) e (27) definem os ângulos apresentados pelos eixos através das acelerações (ZHU et al, 2020):

$$\theta = \tan^{-1} \frac{A_{x,ot}}{\sqrt{A_{y,ot}^2 + A_{z,ot}^2}} \quad \text{Equação (25)}$$

$$\psi = \tan^{-1} \frac{A_{y,ot}}{\sqrt{A_{x,ot}^2 + A_{z,ot}^2}} \quad \text{Equação (26)}$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\sqrt{A_{x,ot}^2 + A_{y,ot}^2}}{A_{z,ot}} \quad \text{Equação (27)}$$

Onde:

θ é o ângulo entre a linha horizontal e o eixo X do dispositivo ($^\circ$);

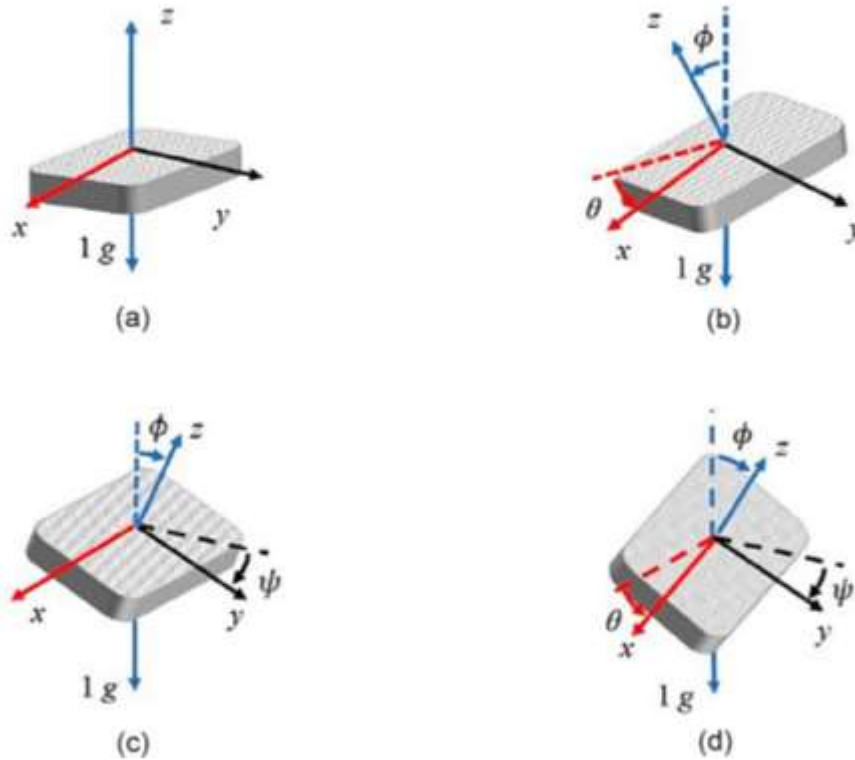
ψ é o ângulo entre a linha horizontal e o eixo Y do dispositivo ($^\circ$);

ϕ é o ângulo entre o vetor da gravidade e o eixo Z do dispositivo ($^\circ$).

A_{xot} , A_{yot} e A_{zot} são as médias das respostas do acelerômetro em X, Y e Z.

A Figura 32 apresenta os ângulos dos inclinômetros *MEMS*. Em (a) a posição de referência típica; em (b) a ilustração entre os ângulos ϕ e θ e a relação entre eles; em (c) a ilustração dos ângulos ϕ e ψ e a relação entre eles e; em (d) os três ângulos dos sensores dos inclinômetros *MEMS*.

Figura 32: ângulos dos inclinômetros MEMS



Fonte: Zhu et al, 2020

Coeficiente sinal-ruído – SNR

Segundo Welvaert e Rosseel (2013), o SNR é um coeficiente utilizado como medida para definir o nível de um sinal em relação ao nível de um ruído. Pode ser obtido ao considerar o valor *RMS* das leituras de um sinal e um ruído, filtrados. A Equação (28) apresenta o cálculo da *RMS*.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n}(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)} \quad \text{Equação (28)}$$

Onde

x_n é o valor da aceleração;

n é o número de leituras de aceleração.

A Equação (29) apresenta a definição do SNR (KIESER, REYNISSON e MULLIGAN, 2005):

$$SNR = \frac{S}{N} = \frac{RMS_{sinal}}{RMS_{ruído}} \quad \text{Equação (29)}$$

Segundo Smith (1999), a unidade para representa-lo é o decibel (dB), o qual expressa o coeficiente entre dois sinais. São utilizados para especificar a amplitude

ou a energia de um sinal. São ideais para descrever o ganho ou a atenuação de um sistema.

O coeficiente *SNR* pode ser transformado em decibéis a partir das Equações (30), em casos onde se trabalha com energia, e (31) em casos onde se trabalha com amplitudes. Nas duas aplicações é relacionado à qualidade do sinal.

$$dB = 10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1} \quad \text{Equação (30)}$$

$$dB = 20 \log_{10} \frac{A_2}{A_1} \quad \text{Equação (31)}$$

Onde:

P2 é a energia do sinal 2;

P1 é a energia do sinal 1;

A2 é a amplitude do sinal 2;

A1 é a amplitude do sinal 1.

Limitações do uso de celulares no *SHM*

Segundo Noel et al (2017), existem questões que ainda são motivo de preocupação no uso de dispositivos wireless em rede no *SHM*: o crescimento da rede de sensores; a necessidade de sincronia do tempo; a otimização da localização dos sensores; a eficiência energética e; a forma de processamento.

O crescimento da rede de sensores, também conhecido como escalabilidade, se refere à habilidade da rede de sensores em aumentar de tamanho sem comprometer a qualidade do serviço, obedecendo às exigências da aplicação com uma complexidade aceitável. A garantia da escalabilidade é desafiadora devido à quantidade de dados coletados e transmitidos para detectar efetivamente o dano e localizá-lo.

A falta de sincronização entre os nós dos sensores é responsável pelo surgimento de erros na estimativa dos parâmetros modais, na detecção e localização do dano. Em particular, sensores wireless para o *SHM* necessitam de tempo preciso de sincronização devido ao grande número de dados compartilhados. Os erros que surgem através da sincronização do tempo podem ser minimizados através do uso de algoritmos que buscam determinar os parâmetros modais através de dados não sincronizados.

A localização do sensor determina como serão coletadas as informações estruturais de forma efetiva. Se a localização dos sensores for inadequada, a

informação coletada irá limitar a habilidade do sistema de monitoramento em detectar e localizar o dano. Na perspectiva da rede de sensores, a localização afeta a vida útil da rede, sobretudo a conectividade, robustez e decisões protocoladas de roteamento. O primeiro desafio na localização dos sensores é equilibrar as exigências das perspectivas da engenharia civil e da rede de sensores.

A eficiência energética de sistemas que utilizam dispositivos wireless também é um fator preocupante devido à disponibilidade de energia armazenada por cada sensor. Normalmente, é difícil substituir baterias vazias ou danificadas já que os sensores são instalados em locais com difícil acesso ao longo da estrutura. Além disso, o monitoramento de saúde exige altas taxas de amostra e, conseqüentemente, um aumento no processamento e transmissão de dados por sensor.

O processamento de dados pode ser executado de maneira centralizada, local ou mista, a qual combina elementos central e local. No processamento de dados centralizado os dados são transmitidos através dos sensores para a estação base. A estação base processa os dados e, através da análise dos resultados, avalia a saúde global da estrutural. É uma técnica simples que minimiza o processamento realizado por cada sensor. A maior desvantagem é um alto *delay* associado com o tempo de agregação de dados.

No processamento local os dados são processados pelos nós da rede e a decisão é transmitida através dos sensores a estação base. Reduz o tráfego de dados enquanto mantém um simples modelo de implementação. Uma vantagem deste método sobre o processamento central é o aumento da robustez da rede. A rede apresenta maior resiliência contra casos onde um importante nó, como um líder de um conglomerado, falha e resulta em uma perda de conectividade para todo o agrupamento. A maior desvantagem do processamento local é a limitação das técnicas de detecção e localização de danos que podem ser implementadas.

O processamento baseado no agrupamento combina elementos dos processamentos locais e globais para aumentar o desempenho da rede global. Distribui o processamento entre cada sensor e o líder do agrupamento. Neste processamento, o conjunto de dados transmitido através da rede é reduzido em comparação ao processamento centralizado e permite uma redução da energia consumida junto ao aumento da escalabilidade.

Outro fator negativo, ao utilizar o smartphone como equipamento de medição, os componentes *on-board* como o acelerômetro, o processador e o espaço de armazenamento não podem ser normalmente substituídos. Caso estes componentes

não sejam suficientes para uma tarefa, outro smartphone necessita ser utilizado, o que pode representar o uso de um aparelho com diferentes propriedades (MORGENTAL et al, 2019).

Além disso, os acelerômetros *MEMS* não são confiáveis para casos industriais que envolvem vibração. O comportamento e a confiabilidade destes sensores em faixas de alta frequência – acima de 1 kHz – são pouco conhecidos e, em alguns casos, completamente desconhecidos (GALETTO et al, 2019).

2.12 Variação das propriedades dinâmicas com a presença do dano

A ocorrência de danos tem influência direta sobre os valores das propriedades dinâmicas. As frequências naturais e as formas modais estão diretamente relacionadas à rigidez da estrutura: a queda das frequências naturais ou a mudança nas formas modais representam a perda de rigidez. O surgimento de fissuras representa a criação de novas superfícies, é assim que a taxa de amortecimento aumenta quando o dano se desenvolve sobre a estrutura (WAHAB e DE ROECK, 1999).

Em relação à definição de danos através do amortecimento, os casos mais representativos ocorrem em estruturas de concreto armado e estruturas reforçadas com fibras (CAO et al, 2017).

Variação das frequências naturais

Segundo Salawu (1997), de maneira geral, a ocorrência de danos leva à diminuição das frequências naturais. Entretanto, em situações especiais, os danos podem levar ao aumento das frequências naturais devido ao maior enrijecimento dos suportes da estrutura.

Por ser um parâmetro global pode ser obtido a partir da captura de dados de aceleração em diferentes pontos da estrutura e através de apenas um ponto de medição. Porém, medições realizadas sobre as condições de contorno como contenções, pilares e outros tipos de suporte podem levar a valores de frequências naturais falsas.

Segundo Riera et al (2007), o uso de métodos de frequência como indicador de dano exige equipamentos com maior precisão. Além disso, para ser efetiva, a definição de danos a partir da variação das frequências naturais deve ser maior que

5%. Variações desta magnitude podem ocorrer devido aos fatores ambientais, durante a aquisição de dados e devido à precisão do instrumento (SALGADO et al, 2014).

Além disso, para que se obtenham parâmetros dinâmicos de forma correta deve-se obedecer ao teorema de Nyquist, que determina que a taxa de amostragem do aparelho deve ser, no mínimo, duas vezes maior que a faixa de frequência de interesse. Assim é possível capturar todas as informações do sinal de aceleração.

Variação das formas modais

Devido à natureza local das formas modais, este parâmetro pode ser utilizado para detectar e localizar um dano na estrutura. A mudança ou agravamento de curvatura ocorre nas proximidades do dano devido à redução na constante de rigidez EI , indicando o local onde está a irregularidade (PANDEY, BISWAS e SAMMAN, 1991).

Segundo Wahab e De Roeck (1999) as formas modais são capazes de indicar a presença de dano devido à mudança de curvatura. Porém, os resultados indicaram que a medida que se aumenta o número de modos de vibração analisados, diminui a precisão do método. Além disso, em casos que envolvem múltiplos danos, é mais adequado analisar todos os modos de vibração para a correta identificação e localização. Isto ocorre porque a presença de defeitos variados não se manifesta no primeiro modo, se tornam mais agudos assim que são avaliados um número maior de modos de vibração.

Existem, porém, ressalvas: a principal dificuldade é que esta propriedade não pode ser suavizada, atingindo melhor qualidade. Uma alternativa na busca por melhores resultados é utilizar métodos de análise do ajuste de curva.

A análise de Frans, Arfiadi e Parung (2017) realizada sobre um modelo de pórtico, uma viga simplesmente apoiada e uma treliça plana indicou que o método das formas modais é mais indicado para estruturas em vigas. Deve ser evitado em estruturas compostas por treliças. A justificativa é que as formas modais apenas indicam os nós dos elementos danificados quando aplicado sobre treliças e não os elementos que necessitam de reparo.

Variação da rigidez à flexão

A rigidez à flexão é a resistência de um elemento frente à deformação de flexão. Esta propriedade é dependente do módulo de elasticidade, do momento de inércia da

seção transversal, do comprimento e das condições de contorno do elemento. Segundo Feng, Shi e Ruan (2010), a rigidez de interesse é a estimativa da rigidez real. Esta propriedade contém informações da geometria e do material da estrutura e, assim, pode ser útil como um indicador de desempenho (BERGSTRÖM, 2009).

De acordo com Burdet e Corthay (1995), existe uma correlação entre a rigidez e as frequências naturais. Quando a frequência natural aumenta, também ocorre o aumento da rigidez. Como indicado, a variação ocorre de maneira linear.

Ou seja, em casos onde ocorre dano, a frequência natural e a rigidez diminuem.

Variação da taxa de amortecimento

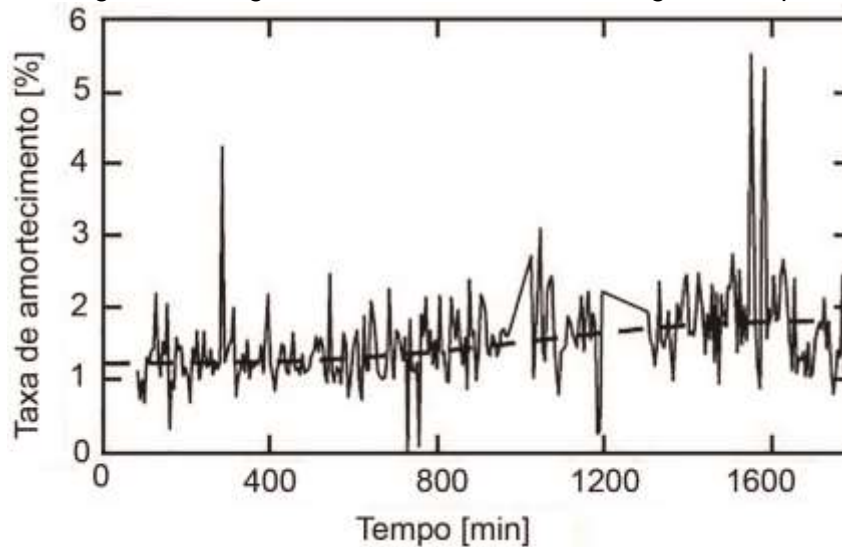
Segundo Cao et al (2017), Wenzel (2009), a existência de dano geralmente aumenta o amortecimento. Esse fenômeno pode ser explicado através do fato que pequenas fissuras, causadas pelo dano, ao longo do comprimento de uma viga causam fricção dentro do concreto sólido. Essa fricção pode aumentar a taxa de amortecimento. O mecanismo de dissipação maior que o esperado indica a possibilidade de existirem fissuras na estrutura.

Em geral, existe uma regra de que o amortecimento aumenta com o agravamento do dano. Essa regra fornece um guia básico para utilizar um registro dinâmico eficiente para detectar, localizar e quantificar o dano. Devido à maior sensibilidade, este pode ser o único indicador de desconformidades.

Um aspecto que deve atenção é que o amortecimento é mais sensível ao ruído, o que pode modificar as respostas da vibração. O uso apenas do amortecimento não pode ser utilizado como método para detecção de dano (WILLIAMS e SALAWU, 1997).

Uma maneira que pode ser utilizada para a representação do amortecimento considera a evolução desta propriedade ao longo do tempo. Na Figura 33 é possível identificar o aumento do amortecimento com a passagem do tempo, o qual é uma característica habitualmente associada à presença de dano.

Figura 33: Registro do amortecimento ao longo do tempo



Fonte: Adaptado de Wenzel (2009).

Segundo Tanaka et al (2015), mudanças em um conjunto de taxas de amortecimento podem ser interpretadas como uma variação no amortecimento em um componente da estrutura, o qual poderia ser causado por deterioração ou dano.

Segundo Xing, Halling e Barr (2012), a relação do amortecimento com o dano não deve ser exclusiva. É recomendando que se utilizem outras metodologias para a definição de desconformidades estruturais devido à complexidade do amortecimento e a dificuldade em obter valores com um grau de precisão adequado. A Figura 34 apresenta a influência da presença do dano sobre os parâmetros dinâmicos de vibração.

Figura 34: Influência do dano sobre as propriedades dinâmicas



Fonte: Autor

2.13 Tratamento de dados antes do processamento

Antes do conhecimento das propriedades dinâmicas, é indicado a aplicação de filtros para minimizar interferência do ruído, o qual é parte indesejada nos dados e dificulta a comunicação ou medição de um sinal. Tem origem na interação entre estrutura e a fonte de excitação: tráfego de veículos, deslocamento estrutural e eventos da natureza. Outro fator, o equipamento utilizado para a extração de dados também pode ser responsável por gerar ruído (VASEGHI, 2000).

Filtro Butterworth

Segundo Thompson (2013), a classe de filtros Butterworth fornece uma resposta plana maximizada na faixa de frequência de passagem. É conhecido como um filtro de frequência, pois a informação é guardada na forma de amplitude, frequência e fase dos componentes sinusoidais. Tem o objetivo de separar uma faixa de frequência de outra indesejada.

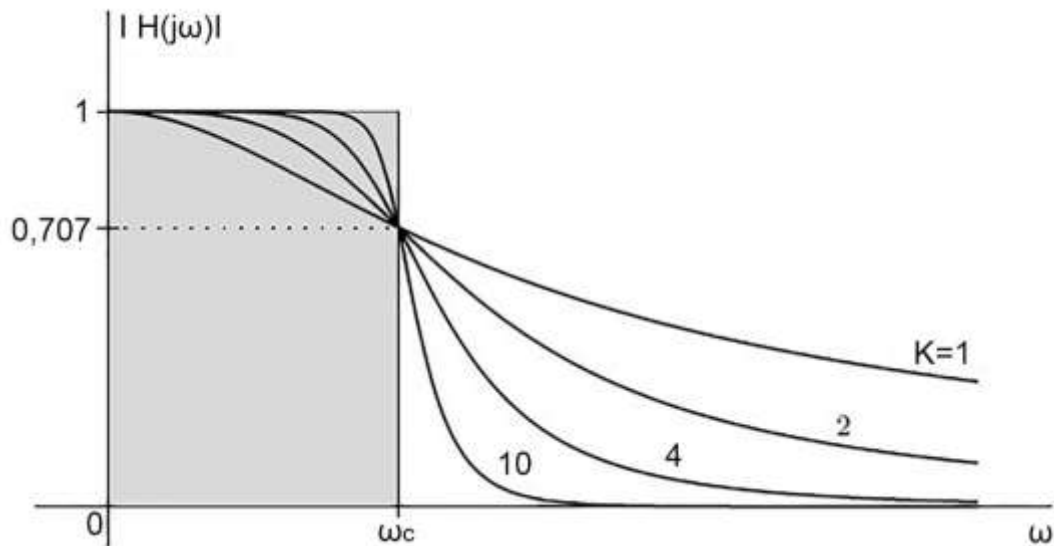
Segundo Abdelgawad, Mahmud, Yelamarthi (2016), em comparação com os filtros Chebyshev e Elíptico, o filtro Butterworth possui o melhor ajuste entre a atenuação e fase. É possível configura-lo em categorias de respostas em domínio de frequência: passa baixa, passa alta, passa-banda de passagem e faixa de bloqueio. Deste modo podem-se configurar filtros com uma frequência mínima de bloqueio, o qual permite a passagem de frequências maiores; um filtro que permite um intervalo de frequências, com a definição de um limite de frequências mínima e máxima e; um filtro com uma frequência máxima, o qual permite a passagem de frequências menores (SMITH, 1999; WINDER 2002).

O uso deste filtro exige também a definição de uma ordem, a qual determina a atenuação atingida. Neste quesito a menor ordem é geralmente escolhida, pois torna o filtro mais simples. Segundo Wenzel (2009), a influência da ordem do filtro considera que quanto maior a ordem, maior a discrepância. Bons resultados são obtidos para um filtro de primeira ordem.

O parâmetro de projeto deste filtro corresponde a uma frequência de corte de meia potência, a qual equivale a 0,707 ou 3 dB, independente da ordem escolhida. Segundo Mahmud et al (2017), filtros com ordem maior apresentam uma frequência de corte com maior inclinação, tal qual aparece na Figura 35. Onde: $|H(j\omega)|$ é o ganho, ω é a frequência, ω_c é a frequência de corte e K é a ordem do filtro. Percebe-se que

quando a frequência ω é igual a zero, o ganho é unitário e quando a frequência $\omega=\omega_c$, o ganho é igual a 0,707 ou 3 dB.

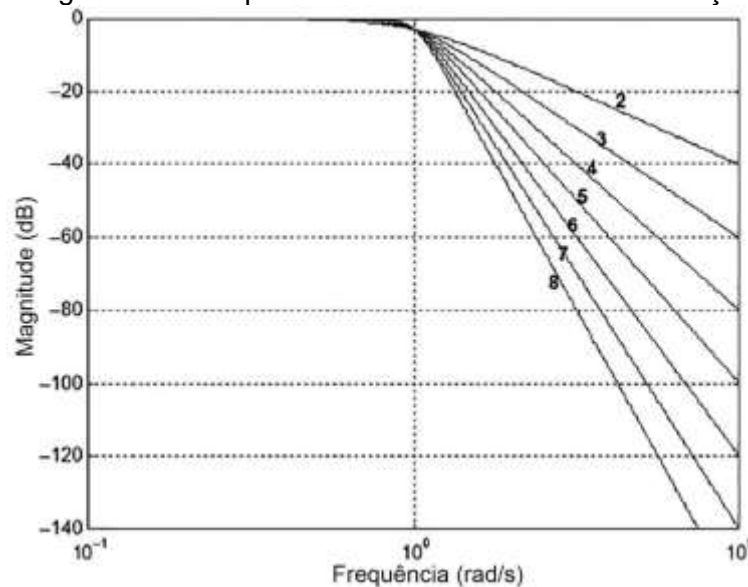
Figura 35 : Funcionamento do filtro Butterworth



Fonte: Adaptado de Lathi e Green (2014).

É comum trabalhar com a atenuação do filtro em preferência ao ganho. Assim, segundo Lathi e Green (2014), a atenuação do filtro é expressa em decibel (dB). A Figura 36 apresenta a magnitude da atenuação, a qual é estimada de acordo com a ordem do filtro Butterworth escolhida. É possível observar que quanto maior a ordem do filtro, maior a atenuação.

Figura 36: Magnitude da resposta do Filtro Butterworth com relação a ordem K



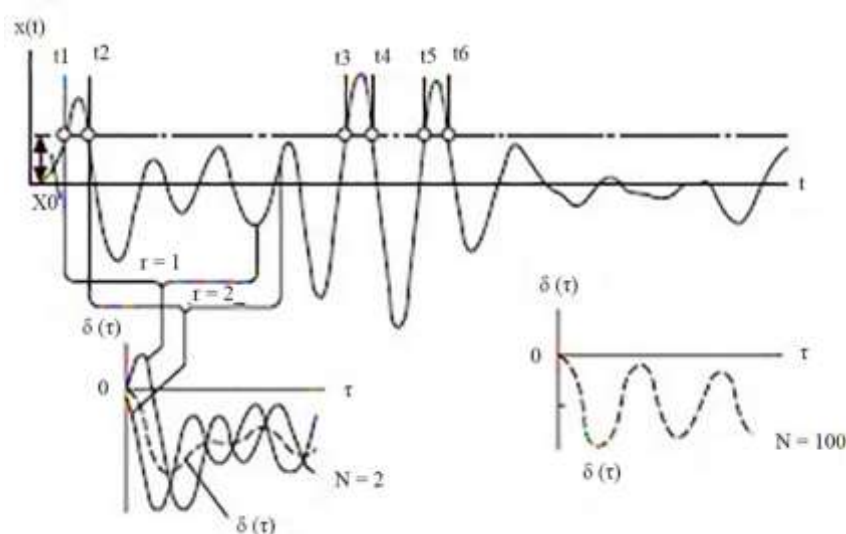
Fonte: Adaptado de Thompson (2013).

Técnica da Queda Aleatória – RDT

O *RDT* é aplicado às amostras de aceleração como um tratamento que antecede o processo de obtenção dos parâmetros de vibração. Tem a capacidade de transformar uma resposta aleatória em queda logarítmica, eliminar a influência da fonte de vibração aleatória e oferecer, como resultado, a vibração referente apenas à estrutura em forma de queda livre. Segundo Cole (1973), a resposta da estrutura à excitação possui, ao natural, três partes: deslocamento inicial; velocidade inicial e; aleatória referente a carga aplicada à estrutura. O *RDT* elimina a velocidade inicial e a parte referente à carga aplicada.

Segundo Asmussen (1997), o *RDT* pode ser definido como a soma de um conjunto de segmentos de séries de tempo retiradas da amostra original, com início e fim igual ao valor de uma condição de disparo adotada. Cada vez que a curva de aceleração passa pela condição de disparo – x_0 – é que um novo segmento tem início. O mesmo princípio vale para finalizar o segmento, cada vez que a curva de aceleração passa pela condição inicial é que o segmento finaliza. Assim, uma única curva é separada em trechos que na sequência do método são somados. A média desses segmentos é conhecido como assinatura *RDT*. A Figura 37 apresenta o conceito do *RDT* para separar uma amostra de aceleração composta por um único segmento. O primeiro segmento é formado pelos tempos t_1 e t_2 o segundo por t_3 e t_4 o terceiro por t_5 e t_6 . A cada segmento considerado na média, maior característica de queda logarítmica é apresentada pela amostra final.

Figura 37: Separação da amostra através do *RDT*



Fonte: Adaptada de He e Fu (2001).

Ao aplicar o *RDT* para determinar o amortecimento salienta-se que o erro na identificação desta propriedade diminui à medida que aumenta o número de médias utilizadas (FRIZZARIN et al, 2010).

Condições de disparo

Existem quatro categorias de condições de disparo: Cruzamento de nível; Local extremo; Ponto positivo e; Cruzamento zero (ASMUSSEN, 1997).

Cruzamento de nível

O Cruzamento de nível (*Level Crossing*) é a condição de disparo considerada a mais popular. Minimiza a variância da amostra e maximiza o número de condições de disparo. Os pontos de disparo são detectados quando são iguais a uma constante determinada em função do desvio padrão da amostra. Para tal, é necessário determinar a média da série de tempo através do método *Root Mean Square – RMS*, apresentado na Equação (28).

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n}(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)} \quad \text{Equação (28)}$$

Onde

x_n é o valor da aceleração em cada unidade de tempo;

n é o número de dados.

Na sequência é determinado o desvio padrão da amostra σ_x . A condição de disparo é representada na Equação (32). A definição do valor de a a ser utilizado como condição de disparo é apresentada na Equação (33):

$$T_{X(t)}^L = \{X(t) = a\} \quad \text{Equação (32)}$$

$$a = \sqrt{2} * \sigma_x \quad \text{Equação (33)}$$

Onde:

σ_x = desvio padrão da amostra

Extremo local

O método Extremo local (*Local Extremum*) não é tão comum quando o *Level Crossing*. Esta condição detecta o ponto de disparo quando a derivada do tempo é igual a zero e necessita que o processo seja limitado por a_1 e a_2 , os quais são locais

extremos e devem possuir o mesmo sinal. Em geral, os locais extremos são determinados através da integração. A condição de disparo é representada na Equação (34).

$$T_{\dot{X}(t)}^E = \{a_1 \leq X(t) < a_2, \dot{X}(t) = 0\} \quad \text{Equação (34)}$$

Se os pontos de disparo foram escolhidos como $[a_1 \ a_2] = [0 \ \infty]$ ou $[-\infty \ 0]$, um maior número de pontos de disparo é obtido.

Ponto positivo

O método Ponto positivo (*Positive Point*) é talvez o mais versátil e simples, desde que utiliza um valor entre dois limites de mesmo sinal para determinar um ponto de disparo. A condição é representada na Equação (35).

$$T_{X(t)}^P = \{a_1 < X(t) \leq a_2\} \quad \text{Equação (35)}$$

Existem duas condições para definir os pontos de disparo. Se a condição de disparo for $[a_1 \ a_2] = [0]$, metade dos pontos na série de tempo serão condições de disparo. Já se as condições de disparo forem $[a_1 \ a_2] = [a \ a+\Delta a]$ e $\Delta a \rightarrow 0$, obtém-se a condição de contorno *Level Crossing*.

Segundo Rodrigues e Brincker (2005), uma boa e comum opção é adotar a esta condição de disparo com os níveis iguais $a = \sigma_x$ e $b = \infty$, onde σ_x é o desvio padrão da série de tempo sob análise.

Cruzamento zero

No método Cruzamento Zero (*Zero Crossing*), o ponto de disparo é detectado se o processo cruza o eixo zero com inclinação positiva. Geralmente é aplicado em casos onde existe apenas uma amostra de aceleração e em casos onde as funções em queda aleatória forem interpretadas como funções de impulso. A condição é representada na Equação (36).

$$T_{\dot{X}(t)}^Z = \{X(t) = 0, \dot{X}(t) \geq 0\} \quad \text{Equação (36)}$$

As condições de disparo sempre serão $[b_1 \ b_2] = [0 \ \infty]$.

Aplicada a condição de disparo sobre a amostra extraída, pode-se separá-la em segmentos menores e dar continuidade ao processo de obtenção de parâmetros dinâmicos.

2.14 Uso de modelos numéricos e experimentais

O uso de modelos numéricos e experimentais é previsto na metodologia *SHM*. Os modelos numéricos e experimentais visam minimizar as dúvidas existentes em relação ao comportamento estrutural. Por meio destes modelos também é possível criar cenários diferentes, com níveis de danos variados sobre os elementos estruturais e acompanhar as variações das respostas.

Modelos numéricos

O uso de modelos numéricos é bastante frequente e indicado quando se utiliza a metodologia *SHM*. O objetivo da representação virtual é se aproximar o máximo possível do comportamento da estrutura real. Além disso, permite a criação e aplicação de diferentes vinculações, materiais, malhas e elementos, os quais apresentam diferentes aplicações e graus de liberdade. É comum o uso do método dos elementos finitos.

Segundo Cook et al (2001), o método dos elementos finitos é utilizado em áreas diversificadas. É útil em casos que envolvem dinâmica de fluidos, problemas elétricos, magnéticos, estruturais, entre outros.

De acordo com Rahmatalla et al (2014), a existência de modelos em elementos finitos de pontes, viadutos e passarelas podem ser muito úteis para guiar as observações durante as atividades de inspeção, pois conseguem indicar os locais com maior deformação devido à ação das cargas dinâmicas e mais suscetíveis à formação de fissuras. Outro fator importante, as características estáticas das pontes como a resistência e a estabilidade não refletem o desempenho estrutural real sob as condições de operação. É importante, portanto, conhecer o comportamento dinâmico das estruturas das pontes sob a vibração, o qual é possível através do uso de modelos numéricos (CHEN, BESKHYROUN e OMENZETTER, 2014).

Em relação às atividades de modelagem, é comum considerar que as pontes estão simplesmente apoiadas sobre os pilares. Entretanto, dependendo do controle de qualidade de construção ou da ausência de neoprene, a ponte pode realmente

apresentar uma restrição à rotação nos suportes o que afeta fortemente o comportamento dinâmico (CONSUEGRA E SANTOS, 2015).

A ideia básica do método é encontrar uma solução para um problema através da simplificação. Por simplificação entende-se uma representação aproximada e não real do problema. A medida que ocorre o melhoramento da simplificação, o que pode ser realizado através de um número maior de elementos finitos, se aproxima também da resposta real da estrutura (LIN e SCHERER, 2020).

Segundo Erhunmwun e Ikponmwoosa (2017), existem vantagens em utilizar o método em elementos finitos como: o sistema em análise pode apresentar forma, carregamento e condições de contorno arbitrárias; é muito versátil e; a estrutura real e o modelo em elementos finitos possuem semelhança aproximada. Possui ainda outra vantagem, a representação virtual do modelo não apresenta custo, já que uma alternativa ao método utiliza a representação da estrutura em modelos reais de escala reduzida.

As propriedades modais resultantes da análise são dependentes das características geométricas e do material que é utilizado na construção da estrutura.

Razão do aspecto

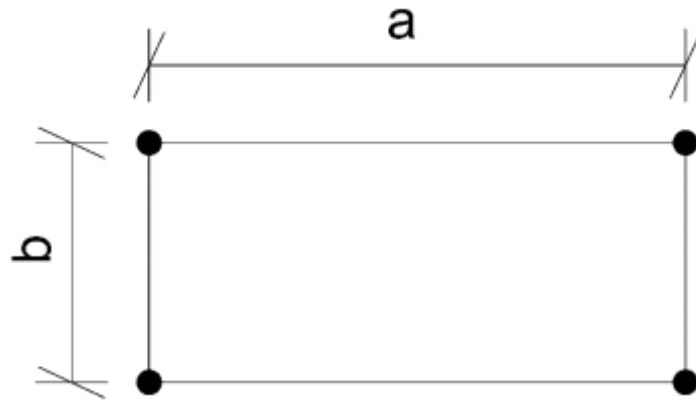
No método dos elementos finitos - MEF, os elementos que representam uma geometria podem não serem úteis para a análise devido à precariedade da forma e da malha aplicada à estrutura.

No MEF, os resultados tendem a ser mais precisos quando os elementos são mais compactos e não apresentam distorções como grandes alongamentos, inclinações ou deformações. Isto porque as distorções são prejudiciais e degradam o valor dos deslocamentos, frequências naturais, formas modais ou temperaturas.

Uma das formas para quantificar uma distorção pode ser realizado através da razão do aspecto ou *aspect ratio*. Este indicador descreve a relação entre as dimensões dos elementos utilizados para discretizar a estrutura e está associada a densidade da malha. Quando este valor é elevado reduz a precisão do resultado (RAO, 2004; COOK et al, 2001).

Para elementos de duas dimensões este coeficiente é considerado entre a maior dimensão a do elemento em relação a menor dimensão b . Geralmente, o valor próximo a um, onde a dimensão a é igual a b indica um melhor resultado. A Figura 38 apresenta um elemento de uma malha onde a dimensão a é maior que b , o que gera um elevado *aspect ratio* (BATHE, 2014, MADENCI e GUVEN, 2015).

Figura 38: Dimensões do elemento da malha a ser evitado



Fonte: Adaptado de Cook et al (2001).

A abordagem deste item representa o fim da revisão bibliográfica. Assim, acredita-se que os fundamentos para a realização de um monitoramento estrutural foram apresentados. Foram abordados durante o texto: conceitos e métodos para o uso de smartphones no monitoramento estrutural; métodos de calibração do equipamento; fontes de excitação; locais de extração de amostras; tratamento prévio e processamento de dados; efeito do dano sobre as propriedades de vibração da estrutura; métodos de definição do dano e; modelagem numérica. Deste modo, pode-se dar início a etapa da metodologia.

3 METODOLOGIA

O foco da pesquisa foi utilizar uma metodologia capaz de avaliar a existência de danos a partir da análise dos parâmetros modais de frequência natural, amortecimento, índices DI de aceleração pico-a-pico e DI_{freq} de frequência e o índice V de vibração.

Utilizam-se três estudos de caso: dois viadutos e uma viga T ambos em concreto armado. A viga T foi criada especialmente para verificar como ocorre a variação dos parâmetros de vibração a partir da aplicação de danos. Nestes estudos de caso, o único dispositivo básico utilizado para a extração de dados em todas os ensaios de vibração foi o acelerômetro de um smartphone Motorola Moto Z2 force. Como é possível utilizar vários modelos e marcas na aquisição de dados, a escolha se deu por este ser o aparelho pertencente ao autor no momento da pesquisa. Pontualmente, na viga também foram utilizados em diferentes aplicações: um acelerômetro wireless *ST Microelectronics* e um acelerômetro *WitMotion*.

Nos viadutos, um total de 146 amostras foram obtidas – 74 no viaduto V1 e 72 no viaduto V2 -, com durações que variam de cinco a dez minutos. Estes viadutos foram escolhidos pois são acompanhados há aproximadamente oito anos através de atividades como a extração de dados e visitas para inspeção visual.

Na viga, foram extraídas 80 amostras, com duração de dois minutos e variação do grau de dano em virtude do local e da magnitude.

Nos viadutos executou-se a análise modal operacional, com o tráfego de veículos como fonte de excitação. Porém, na viga T foi utilizada a vibração experimental através de um ensaio prévio - a partir do uso de um martelo de borracha - e de um ensaio final – a partir do funcionamento de um motor desbalanceado como fonte de vibração.

Além da fonte de excitação, os procedimentos executados em cada estudo de caso diferem devido ao uso do filtro *RDT* e do índice de vibração V previstos em vibrações ambientais. Estes não foram aplicados às amostras da viga, onde apenas o filtro Butterworth de primeira ordem foi utilizado.

É realizada também uma etapa de verificação através da aplicação dos métodos *SSI-COV*, *SSI-DATA* e *EFDD*.

Para atender os objetivos apresentados previamente, foi apresentada a revisão bibliográfica dos assuntos pertinentes à avaliação de danos, inspeção de OAEs e à análise dinâmica e de sinais.

3.1 Estudos de caso

Os viadutos foram identificados como V1 e V2 e se enquadram no perfil da maioria das OAEs instaladas em rodovias brasileiras ao considerar a seção transversal e o comprimento. Além destes, a viga T foi criada para a inserção proposital de danos e a verificação da variação dos parâmetros dinâmicos de vibração.

O viaduto V1 localiza-se na rodovia BR 285 entre Carazinho e Lagoa Vermelha, no município de Passo Fundo, nas proximidades do distrito industrial. Construído em concreto armado, possui duas longarinas com as extremidades em balanço; três transversinas não conectadas com o tabuleiro e localizadas entre as longarinas; comprimento total de 22,50 metros. A Figura 39 apresenta o viaduto V1.

Figura 39: Viaduto V1

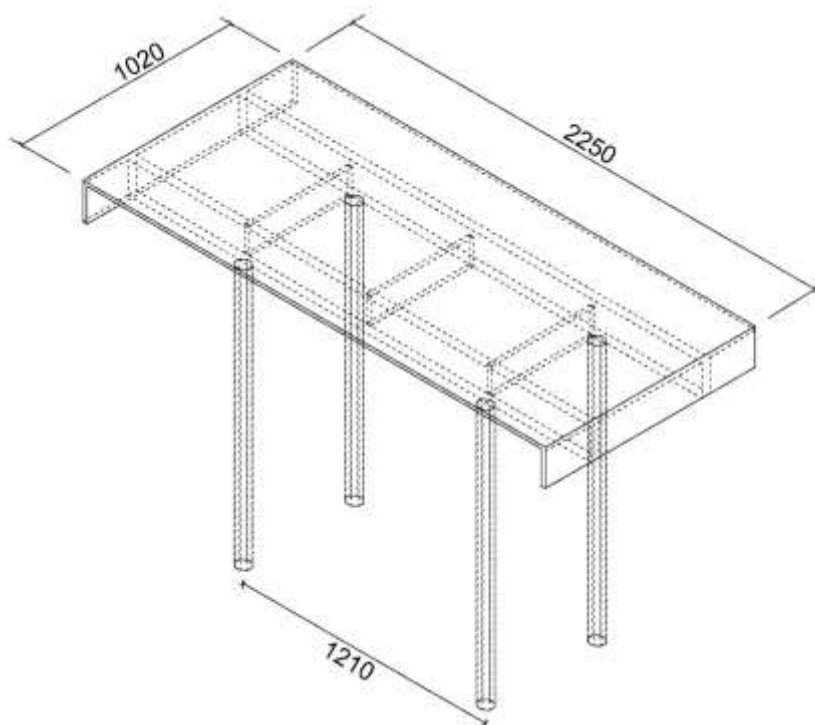


Fonte: Autor.

A Figura 40 apresenta o Viaduto V1 com os elementos que o constituem, comprimento e largura totais e distância entre pilares. As unidades estão em

centímetros. O viaduto V1 e as dimensões dos elementos podem ser vistos no Anexo L – Viaduto V1. As dimensões deste viaduto foram definidas a partir da realização de uma retroanálise.

Figura 40: Dimensões do viaduto V1



Fonte: Autor.

O viaduto V2 localiza-se na estrada Perimetral Leste, RS-135, no município de Passo Fundo. Construído em concreto armado, possui duas longarinas em balanço; quatro transversinas não conectadas com o tabuleiro e localizadas entre as longarinas; comprimento total de 36,00 metros e ângulo de inclinação longitudinal de 3,65°. A Figura 41 apresenta o viaduto V2. As dimensões deste viaduto foram conhecidas a partir do acesso ao projeto estrutural.

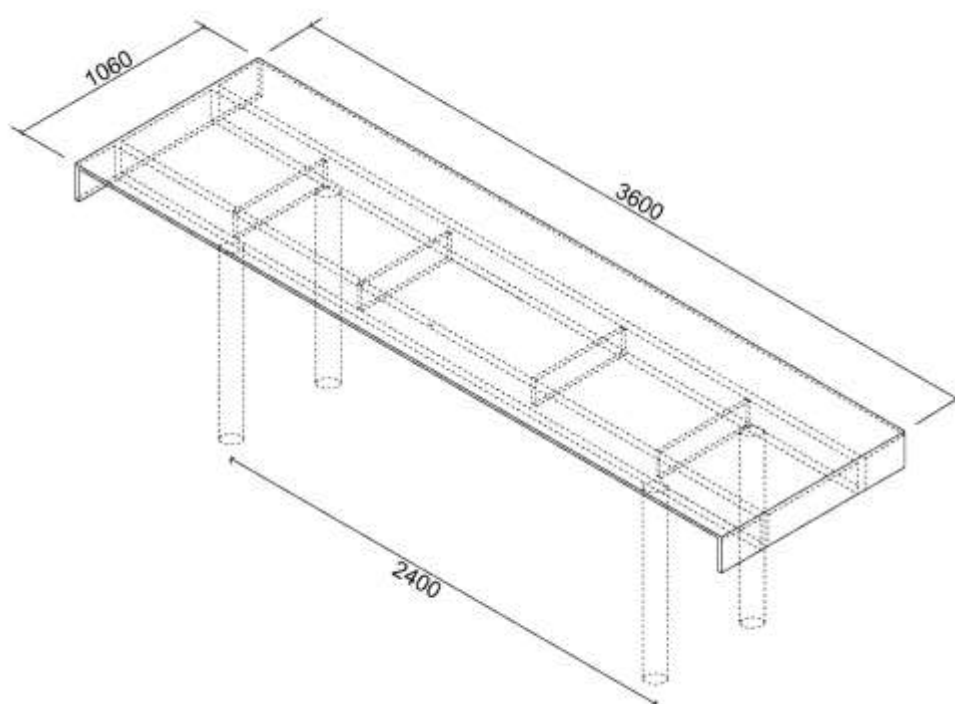
Figura 41: Viaduto V2.



Fonte: Autor.

A Figura 42 apresenta o Viaduto V2 com os elementos que o constituem, comprimento e largura totais e a distância entre os pilares. As unidades estão em centímetros. O viaduto V2 e as dimensões dos elementos podem ser vistas no Anexo M – Viaduto V2.

Figura 42: Dimensões do viaduto V2



Fonte: Autor.

A viga T foi inicialmente criada devido ao baixo número de estudos de caso para o teste da metodologia proposta. Foi construída em concreto armado, com seção

transversal T e escala 1/5 devido à possibilidade de simular uma viga frequentemente utilizada para a construção de pontes em escala real.

É simplesmente apoiada sobre duas peças em neoprene fretado, restrição que é frequentemente considerada para o projeto de Obras de Arte Especiais. Foram criadas também duas bases quadradas em concreto para o suporte da viga. A Figura 43 apresenta a viga T.

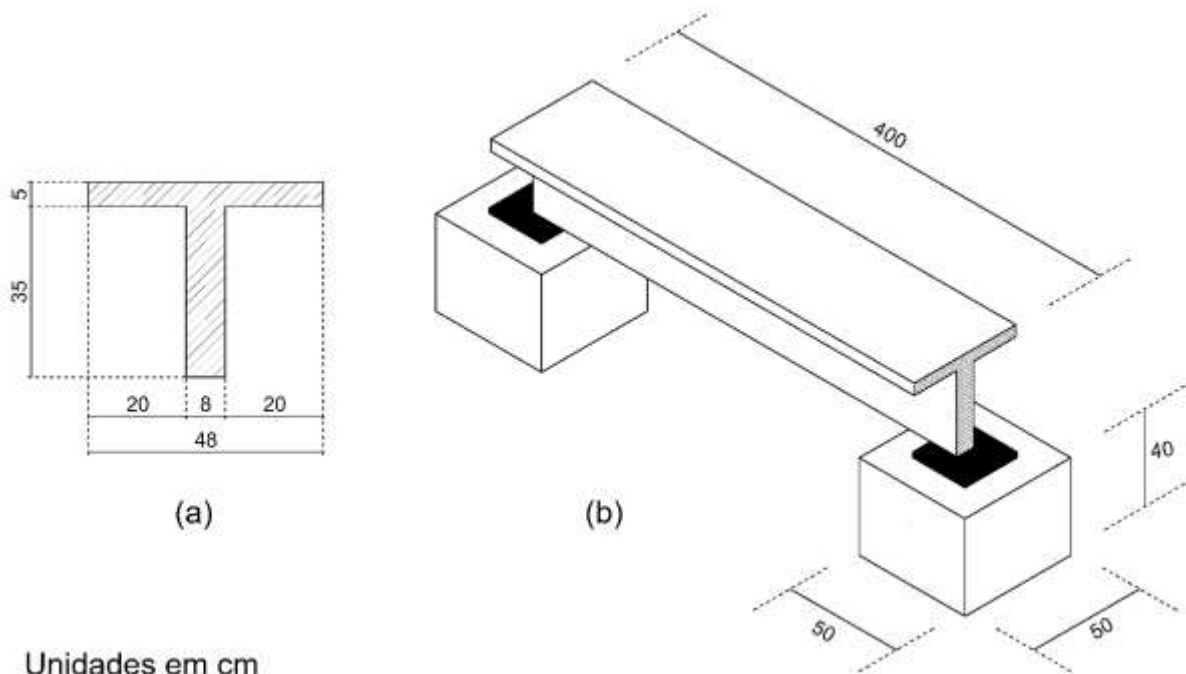
Figura 43: Viga T



Fonte: Autor.

As dimensões da viga T são apresentadas na Figura 44, onde é possível verificar em (a) a seção transversal e em (b) as dimensões da viga T, das bases quadradas e a posição dos apoios em neoprene fretado.

Figura 44: Dimensões da viga T



Unidades em cm

Fonte: Autor.

Os apoios em neoprene fretado possuem dimensões de 20 x 20 x 2,5 cm - comprimento x largura x altura –, menor configuração disponibilizada pela empresa Celpan (<https://www.celpan.com.br/neoprene-fretado>).

Não foram obtidas propriedades do material, exceto aquelas já fornecidas no site da empresa:

- Temperatura de trabalho: -40°C a 100°C;
- Alta resistência à ruptura e abrasão;
- Bom desempenho contra ácidos diluídos;
- Muito utilizado na composição de viadutos, pontes e passarelas.

A dosagem dos materiais utilizados para a fabricação da viga T é apresentada no Anexo B – Viga T: Dosagem de materiais.

3.2 Materiais e métodos

Equipamentos e softwares

Os equipamentos utilizados nesta pesquisa foram um smartphone, um computador, dois acelerômetros – *WitMotion* e *ST Microelectronics* -, um martelo de borracha, um motor de vibração, duas peças para a calibração do acelerômetro do

smartphone e uma serra para a inserção dos cortes na viga T. Além disso, uma calibração adicional foi utilizada com um acelerômetro PCB Piezotronics 356A01 e uma mesa vibratória.

O celular utilizado para a extração dos dados de aceleração através do foi o Motorola Moto Z2 Force com sistema Android. O acelerômetro que equipa o smartphone é um LSM6DSM, da empresa *ST Microelectronics*, que registra a aceleração e o giroscópio digital 3D atuando em 0,15 mA em um modo de alta performance e permite registros em baixa-energia. Suporta as principais exigências do sistema operacional, oferecendo o sensoriamento real, virtual e de lote com 4 kbyte para dados dinâmicos. Possui uma faixa de aceleração total de escala de $\pm 2/\pm 4/\pm 8/\pm 16$ g e uma faixa de taxa angular de $\pm 125/\pm 250/\pm 500/\pm 1000/\pm 2000$ dps. Atua em uma faixa de temperatura de -40°C até $+85^{\circ}\text{C}$ (ST Microelectronics, 2017).

O computador foi utilizado para a elaboração dos modelos em elementos finitos e processamento das amostras de aceleração. Os softwares utilizados no computador foram o *ANSYS Mechanical APDL 2021 R2* para a criação dos modelos virtuais dos estudos de caso, o *Excel* e o *Scilab* para a preparação e processamento de amostras, o *Spyder* para o processamento do módulo CESSIPy e o software do acelerômetro *WitMotion* para o registro das acelerações.

Em uma primeira etapa, o aplicativo utilizado no celular foi o *Vibration Alarm*, que registra, salva e exporta as acelerações. Este aplicativo possui interface amigável e de fácil operação, é desenvolvido pela *Mobile tools*. O acelerômetro possui resolução de $0,0023956299$ m/s² com taxa de aquisição de 428 Hz definida no aplicativo.

No ensaio prévio da viga T, com o mesmo celular foi utilizado o aplicativo *iDynamics*, o qual é desenvolvido pela Universidade de Kaiserslautern. A configuração do acelerômetro foi padrão, com taxa de amostragem de 350 Hz, tamanho de resposta de 10 segundos - fornecida pelo aplicativo -, filtro passa-alta de 0,5 Hz e sem suavização.

O acelerômetro *WitMotion* HWT901B-TTL (<https://www.wit-motion.com/>) é um acelerômetro *MEMS*, com entrada USB e software próprio para a extração de amostras. As saídas são obtidas para 3 eixos de leitura para a aceleração - ângulo, velocidade angular, campo magnético, pressão do ar e altura. A resolução é igual a $0,005$ g; giroscópio $0,61^{\circ}/\text{s}$; campo magnético igual a 16 bits; precisão de ângulo após a calibração sobre o eixo Y igual a $0,05^{\circ}$ - estático e; precisão de ângulo após a calibração sobre o eixo Y igual a $0,1^{\circ}$ - condição dinâmica. Fornece uma alternativa

de calibração antes de iniciar o salvamento de dados. A Figura 45 apresenta o acelerômetro *WitMotion* utilizado (WITMOTION, 2021).

Figura 45: Acelerômetro *WitMotion*



Fonte: Autor.

O acelerômetro da *ST Microelectronics* opera através de uma conexão wireless com o smartphone a partir do uso do aplicativo *ST BLE sensor*. O aplicativo permite criar um software de extração de dados, onde é possível definir a variável de interesse – temperatura, umidade, pressão, aceleração, movimento, reconhecimento de atividade humana, entre outros –, a função – *ARMA*, *FFT*, *RMS*, desvio padrão, entre outros -, a passagem de filtros, o número de dados para criar a *FFT* – de 16 até 6666 - e a saída – Bluetooth, cartão SD, entre outros.

Utiliza um acelerômetro *MEMS LSM6DSOX* com consumo de energia de 0,55 mA, escala de $\pm 2/\pm 4/\pm 8/\pm 16$ g, escala dps $\pm 125/\pm 250/\pm 500/\pm 1000/\pm 2000$ dps e voltagem de funcionamento igual a 1,71 V a 3,6 V. Com o uso do aplicativo é possível obter uma taxa de aquisição de 6666 Hz.

A configuração da aplicação criada para o acelerômetro *ST Microelectronics*, no aplicativo *ST BLE Sensor*, registrava as acelerações com taxa de amostragem igual a 416 Hz, em modo de energia de alto desempenho, escala 2g, sem filtros; uso da *FFT* a cada 1024 pontos de leitura e; transmissão via Bluetooth. Ao fim da medição, é criado um arquivo com extensão csv, o qual é enviado via e-mail. A Figura 46 apresenta as partes que constituem o sensor *ST* (ST.life.Augmented., 2019, ST.life.Augmented., 2021).

Figura 46: Acelerômetro ST



Fonte: ST (2019).

A Tabela 10 apresenta as propriedades identificadas dos smartphones.

Tabela 10: Propriedades dos acelerômetros

| Acelerômetro | LSM6DSM | LSM6DSOX | WitMotion HWT901B |
|---|---|---|-------------------|
| Consumo de energia (mA) | 0,4 até 0,65 | 0,55 | <40 |
| FIFO inteligente (kbyte) | 4,00 | 9,00 | - |
| Escala total (g) | $\pm 2/\pm 4/\pm 8/\pm 16$ | $\pm 2/\pm 4/\pm 8/\pm 16$ | ± 16 |
| Escala total (dps) | $\pm 125/\pm 250/\pm 500/\pm 1000/\pm 0/\pm 2000$ | $\pm 125/\pm 250/\pm 500/\pm 1000/\pm 2000$ | |
| Faixa de temperatura (°C) | -40 a 85 | -40 a 85 | -40 a 85 |
| Voltagem de fornecimento analógico (V): | 1,71 até 3,6 | 1,71 até 3,6 | 3,3 até 5,0 |
| Taxa de Amostragem (Hz) | 7 - 428 | 1024 | 0,2 - 200 |
| Aplicação | Monitoramento da vibração | Monitoramento da vibração | - |

Onde: mA = miliAmpere; dps = graus por segundo

Fonte: Adaptado de ST (2017); ST (2019) e; *WitMotion* (2021).

Para a realização do ensaio experimental prévio, um martelo de borracha foi utilizado para aplicar golpes à viga. Esta ferramenta é frequentemente utilizada para a colocação de pisos.

Os golpes foram aplicados na metade do vão da viga, sem controle de altura ou magnitude de impacto. O único cuidado foi evitar os múltiplos impactos ou o “pulo do martelo”. O celular foi instalado junto ao local onde são aplicados os golpes com o martelo através do uso de fitas dupla face, fixadas no dorso do aparelho, localizado a uma distância segura para que os golpes com o martelo não atingissem o smartphone.

No ensaio experimental final na viga T, um motor de uma centrífuga para uso doméstico, da marca *mueller*[®], foi utilizada como fonte de excitação. As propriedades deste dispositivo são: rotação igual a 3030 RPM; voltagem de 220 V; amperagem de 0,7 A; potência 1/15 CV e; frequência de 60 Hz. As propriedades do motor são apresentadas na Figura 47.

Figura 47: Propriedades do motor de vibração



Fonte: Autor.

A Tabela 11 indica a frequência de funcionamento do motor a partir do ajuste da potência indicada no dimmer.

Tabela 11: Relação frequência e potência do motor

| Frequência Natural (Hz) | Potência (%) |
|-------------------------|--------------|
| 50,5 | 100 |
| 45,45 | 90 |
| 40,4 | 80 |
| 35,35 | 70 |
| 30,3 | 60 |
| 25,25 | 50 |
| 20,2 | 40 |
| 15,15 | 30 |
| 10,1 | 20 |
| 5,05 | 10 |

Fonte: Autor.

A excentricidade foi gerada a partir de uma peça colocada no eixo do motor, a qual atua como uma massa desbalanceada. O nivelamento do motor foi garantido devido ao uso de peças de madeira fixadas a uma base também em madeira. A fixação à base foi realizada com o uso de uma cinta metálica ajustável e presa por parafusos.

De acordo com o que é apresentado por Zainal (2020), no motor ocorre um desequilíbrio dinâmico devido à não sobreposição da linha de centro de rotação e o eixo principal central, bem como a existência de massa em apenas uma extremidade, causando o desbalanceamento.

A rotação do motor foi controlada com o uso de um dimmer com amperagem igual a 25 A, com controle de potência na faixa de 0% a 100%. A Figura 48 mostra a massa adicionada ao eixo central do motor.

Figura 48: Massa adicionada ao eixo central do motor



Fonte: Autor.

Para a etapa de calibração do acelerômetro do celular foram criadas duas peças em nylon industrial a partir da manufatura em máquina de torno. As peças foram utilizadas para garantir às seis diferentes posições no processo de calibração apresentado por Stančin e Tomažič (2014). O smartphone era encaixado nos sulcos das peças. A Figura 49 apresenta as peças utilizadas na calibração.

Figura 49: Peças para a calibração



Fonte: Autor.

Uma calibração adicional foi realizada através do uso de um acelerômetro profissional PCB PIEZOTRONICS 356A01, onde as configurações do aparelho podem

ser visualizadas no Anexo C - Propriedades do acelerômetro PCB Piezotronics. A PCB Piezotronics é uma companhia certificada com ISSO-9001 cujos serviços são confiáveis (PCB GROUP, Inc, 2002).

Na calibração adicional, o aplicativo utilizado foi o *myFrequency – Vibration Analysis* devido à facilidade em conhecer as frequências naturais. A calibração adicional constituía da medição de uma série de valores de frequências naturais a partir da variação da vibração lateral da superfície da mesa. As leituras são tomadas pelo smartphone Motorola Moto Z2 Force e o acelerômetro PCB Piezoeletronics 356A01. A vibração é controlada por um dimmer.

A medição tinha início com uma frequência de 6 Hz e finalizava em 13 Hz, valores estes comuns para as Obras-de-Arte-Especiais estudadas. O processamento das amostras do acelerômetro PCB Piezotronics 356A01 foi realizado a partir de um ambiente de desenvolvimento em LabVIEW com taxa de amostragem configurada em 200 Hz.

Por último, foi realizada uma inspeção visual cadastral nos viadutos como indica a ABNT NBR 9452/2019 – Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto – Procedimento, a qual é apresentada no Anexo I – V1: inspeção visual e Anexo J – V2: Inspeção visual. A inspeção não oferece o número de registros fotográficos mínimos, nos anexos são apresentados apenas as manifestações nas superfícies dos elementos estruturais que podem representar danos.

Fase analítica

Exclusivamente aplicada à viga T, esta fase compreendeu a definição das frequências através da Equação (9) e foi utilizada como um dos parâmetros para a definição do comportamento.

Fase numérica

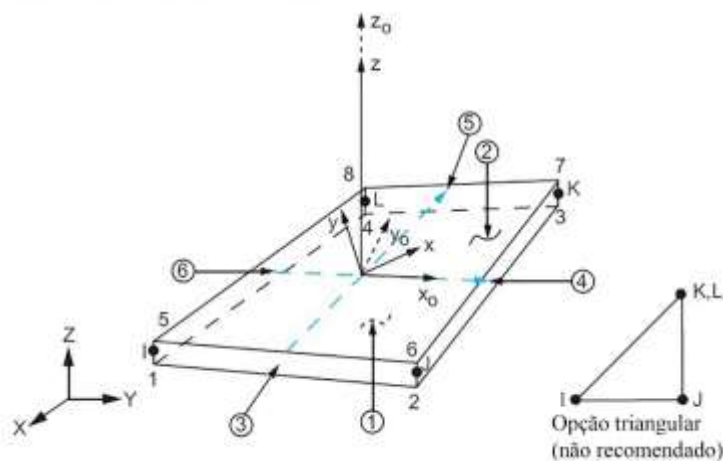
A fase numérica compreendeu a elaboração dos modelos em elementos finitos dos estudos de caso citados. Os modelos numéricos foram criados com o *ANSYS Mechanical APDL 2021 R2* – versão estudantil.

Para os viadutos, os modelos foram criados com o elemento SHELL181, o qual é adequado para a análise de estruturas em cascas com espessura fina à moderada. É um elemento com 4 nós e com 6 graus de liberdade em cada nó: translação em X, Y,

e Z e; rotações em torno X, Y e Z. Além disso, ao utiliza-lo é obtida uma matriz de massa consistente, o que evita o surgimento de modos espúrios (ANSYS, 2013).

A Figura 50 apresenta o SHELL181. Os nós do elemento são representados pelas letras I, J, K e L. Os números 1, 2, 3, 4, 5 e 6 se referem às áreas que podem receber a aplicação de cargas: superfície 1 (IJKL) – inferior; superfície 2 (IJKL) – topo; superfície 3 (JI) – lateral; superfície 4 (KJ) - lateral; superfície 5 (LK) - lateral; superfície 6 (IL) – lateral.

Figura 50: Elemento SHELL181



Fonte: Adaptada de Ansys (2013).

A densidade de cada sistema estrutural representado em elementos finitos considerou a massa dos guarda-corpos, guarda-rodas, pavimento, elementos estruturais e o volume total das superestruturas. As densidades adotadas têm origem nos pesos específicos indicados para o concreto pela ABNT NBR 6118/2014 e para o pavimento asfáltico pela ABNT NBR 9187/2003 e foram determinadas a partir da divisão pela constante de aceleração da gravidade:

- Peso específico do concreto armado – 25 kN/m³;
- Peso específico do revestimento asfáltico – 24 kN/m³.

A densidade específica dos viadutos foi atribuída a partir da relação entre a massa e o volume total, calculados a partir das dimensões dos elementos. A massa e o volume total de V1 foram de 287197,26 kg e 113,36 m³, respectivamente. A massa e volume total de V2 foram 594968,35 kg e 234,53 m³, respectivamente.

As propriedades do material utilizado para cada viaduto em elementos finitos são apresentados na Tabela 12. A densidade foi atribuída de acordo com a dimensão dos elementos e da capa de revestimento asfáltico. O valor final do módulo de elasticidade foi definido através da comparação com as respostas experimentais, assim, os valores

finais foram escolhidos por permitirem uma resposta numérica aproximada à experimental.

Tabela 12: Propriedades aplicadas aos modelos numéricos dos viadutos

| Viaduto | Densidade (kN/m ³) | Módulo de elasticidade (GPa) | Coefficiente de Poisson |
|---------|-----------------------------------|------------------------------|-------------------------|
| V1 | 25,33 | 25 | 0,2 |
| V2 | 25,37 | 20 | 0,2 |

Fonte: Autor.

Os viadutos foram representados como modelos de cascas em 3D com malha quadrada. O teste dos elementos foi realizado através da razão do aspecto com valor igual a 1.

O acesso as formas modais resultantes ocorreu através da interface do usuário na etapa de pós-processamento.

Nas condições de contorno foram impedidos os deslocamentos em X, Y e Z sobre os pilares e foram adicionadas restrições laterais nas extremidades inferiores laterais da primeira e última transversinas.

Na viga T, a representação numérica foi inicialmente projetada para uma escala 1/5, a qual foi utilizada para a sua construção. Porém, como a frequência experimental obtida foi diferente daquela numérica, a modelagem foi substituída por uma que considerava a escala real da viga.

No Ansys, a viga T foi criada em três modelagens distintas: uma com o elemento BEAM189; uma com o elemento SHELL181 e; outra com o SOLID185. No modelo que utiliza o SOLID185 não foram representadas as armaduras.

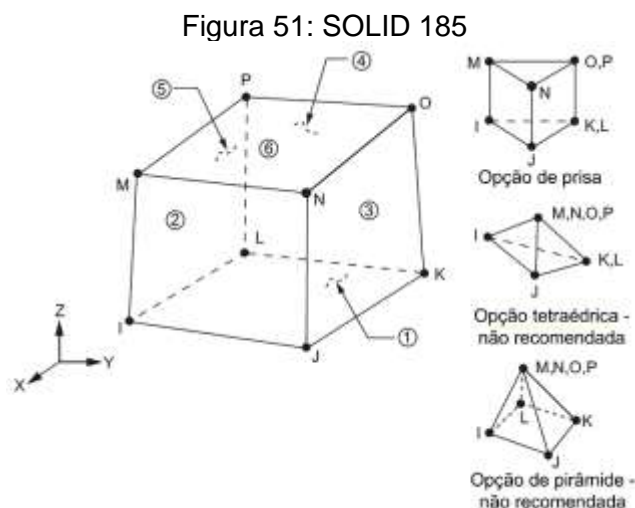
Para a escolha da dimensão da malha, foi realizada uma análise da flecha da viga através de um modelo linear criado a partir da adoção do elemento BEAM189. Este elemento é adequado para a análise de estruturas de vigas esbeltas a vigas com espessuras moderadas e se baseia na teoria de vigas de Timoshenko, a qual inclui os efeitos de deformação devido ao cisalhamento. O elemento é quadrático de três nós, com seis graus de liberdade em cada nó. É adequado para aplicações de grandes deformações não-lineares e/ou lineares e grandes rotações.

A carga foi aplicada sobre a mesa da viga T e possuía magnitude de 10 kN/m². A intensidade da carga foi definida de forma deliberada.

O elemento SOLID185 é utilizado para modelos 3D de estruturas sólidas. É definido por oito nós com três graus de liberdade em cada nó: translação nas direções X, Y e Z. O elemento possui plasticidade, tensão de rigidez, hiperelasticidade, grandes deflexão e deformação. Possui uma formulação mista para simular deformações de

materiais elastoplásticos parcialmente incompressíveis e totalmente incompressíveis hiperelásticos.

É um elemento adequado para modelos 3D de estruturas sólidas em geral. É permitido para degenerações de prisma, tetraédricas e pirâmide quando utilizado para regiões irregulares. Várias tecnologias de elementos são suportadas como integração reduzida uniformemente e deformações aprimoradas. A Figura 51 apresenta o SOLID185 (ANSYS, Inc, 2013).



Fonte: Adaptado de ANSYS, Inc (2013).

As condições de contorno impostas à viga foram as restrições dos movimentos de translação nas direções X, Y e Z nas extremidades que correspondem aos apoios sobre as bases de concreto. Não foi simulado o apoio em neoprene fretado.

Definida a malha, o processo teve sequência com a escolha do método de identificação modal utilizada pelo Ansys. O método de análise modal utilizado é o *Block Lanczos*, o qual é adequado para grandes problemas de autovalores simétricos. Este método é aceitável para problemas com soluções através do método do subespaço. O número de modos que foram calculados é igual a 10. (ANSYS, Inc, 1999).

As propriedades que se referem ao material concreto armado, adotadas para a viga T, seguiam o que foi projetado para a construção. A Tabela 13 apresenta as propriedades utilizadas no modelo numérico da viga T.

Tabela 13 : Propriedades aplicadas aos modelos numéricos da viga T

| Densidade (kN/m ³) | Módulo de elasticidade (GPa) | Coefficiente de Poisson |
|-----------------------------------|------------------------------|-------------------------|
| 25 | 28 | 0,2 |

Fonte: Autor.

A correção do modelo numérico em relação às respostas experimentais ocorre a partir da adoção de novos valores do módulo de elasticidade. Este é definido a partir da equação (20), retirada da ABNT NRR 6118/2014.

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad \text{Equação (20)}$$

Onde:

α_E é um parâmetro que considera o agregado utilizado no concreto e adotado igual a 1;

f_{ck} é o valor de resistência para uma faixa de resistência de 20 MPa a 50 MPa.

Fase experimental

Nos viadutos, a fonte de excitação foi o tráfego de veículos que atuava no momento da extração das amostras. O início e fim do salvamento de dados foi manual.

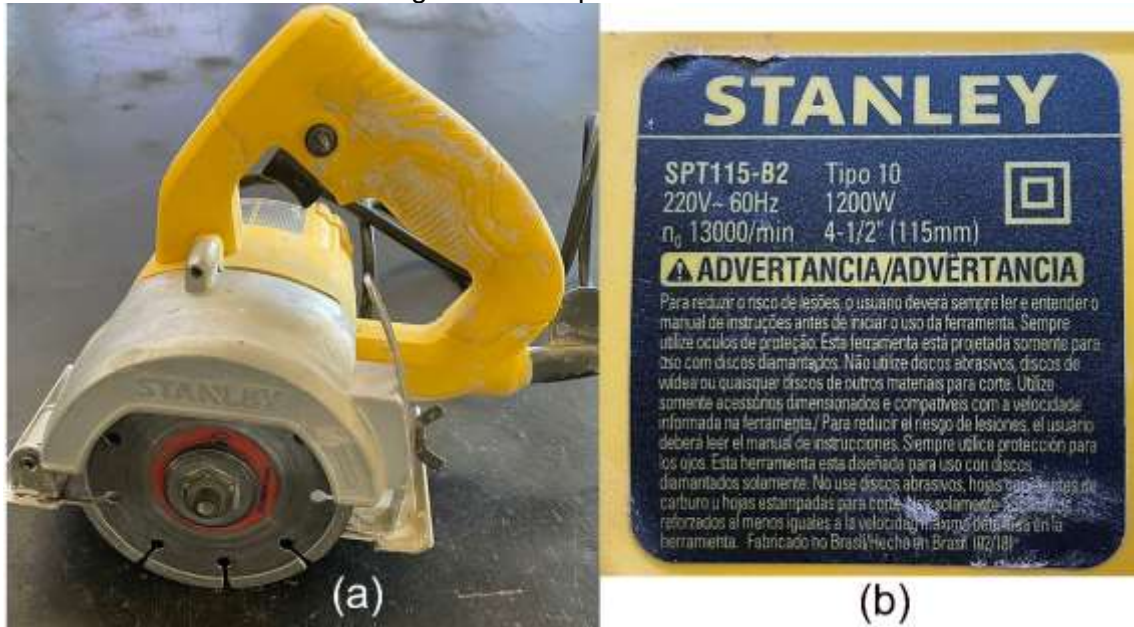
Na viga T, o motor de vibração é fixado sobre a mesa da viga, em um local na metade do vão e preso por morsas. A potência inicial selecionada foi de 10%, seguido de 20% e 30%.

Potências mais altas não foram selecionadas devido ao mau funcionamento do dispositivo. Ao definir uma potência maior que 30%, o motor entrava em única rotação e o dimmer perdia a função de controle. Eventualmente potências maiores que estas foram atingidas sem o motor apresentar problema.

A inserção de danos foi definida em locais iguais a 1/2, 1/3 e 3/4 do vão, nesta ordem, na face inferior da viga. Foram realizadas fissuras com uma máquina de corte em três diferentes profundidades: 2 mm; 4 mm e; 5 mm. A espessura da fissura é de 5 mm e equivale à espessura do disco utilizado para inserir o dano.

As três profundidades de corte foram realizadas primeiro em 1/2, na sequência em 1/3 e por último em 3/4 do vão. Este processo foi repetido até que todos os danos previstos fossem aplicados à viga. A máquina de corte pode ser visualizada na Figura 52 em (a) e em (b) as propriedades do mesmo equipamento.

Figura 52: Máquina de corte



Fonte: Autor.

A Figura 53 apresenta a viga T junto ao motor posicionado na metade do vão.

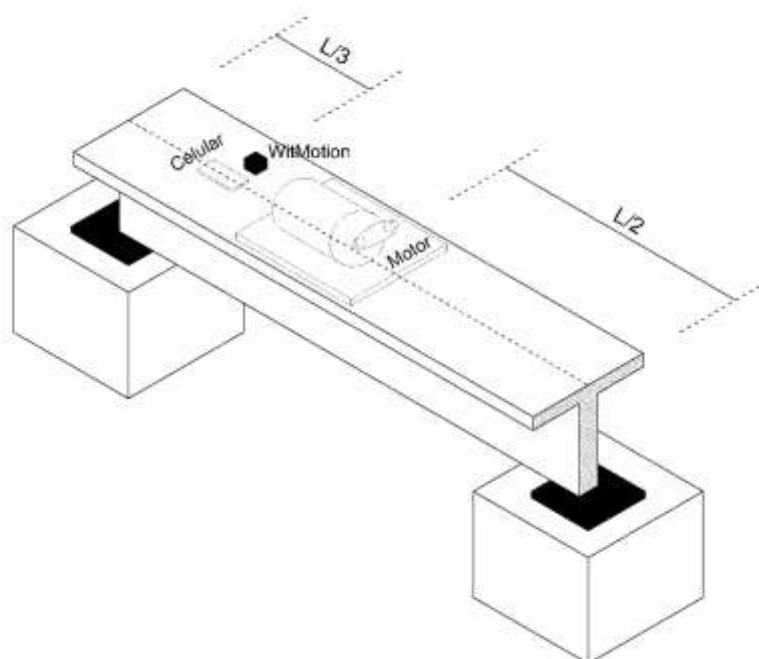
Figura 53: Viga T



Fonte: Autor.

A Figura 54 apresenta a posição dos acelerômetros do smartphone e do *WitMotion* no dia do ensaio com a inserção de danos, bem como a posição do motor de vibração.

Figura 54: Posição dos acelerômetros na fase de inserção de danos



Fonte: Autor.

A Figura 55 apresenta o local onde foram inseridos os danos à viga T.

Figura 55: Locais da inserção de danos



Fonte: Autor.

A cada corte ou evolução do dano proposital, foram realizadas medições com o motor em funcionamentos que correspondem a 10%, 20% e 30% de potência.

O salvamento de dados teve início antes de iniciar o ensaio. Na sequência, o motor foi ligado e permaneceu em funcionamento por aproximadamente dois minutos. No fim do processo ocorreu o desligamento do motor e o fim do salvamento de dados, nesta ordem.

Extração de dados de aceleração nas OAEs e na viga T

Nos viadutos foram realizados onze campanhas de extração de dados durante os meses de Março à Dezembro de 2019. Cada campanha possuía seis amostras extraídas na metade do vão – L/2.

Uma campanha de medição foi realizada em Agosto de 2021 em um ponto localizado à 1/3 do vão – L/3. Portanto, no total foram realizadas doze campanhas de medição.

Foram utilizados duas durações de amostras: 5 e; 10 minutos. Às nove primeiras e a última campanha de medição possuíam 5 minutos de duração. As antepenúltima e penúltima medições tinham duração de 10 minutos. A duração do tempo foi definido de forma deliberada e o uso de amostras com maior tempo procurou identificar como os parâmetros modais poderiam variar já que o *RDT* utilizaria um maior número de amostras.

Na viga T, os sensores foram posicionados próximos a 1/3 do vão. A duração das amostras era de dois minutos e foi definida a partir de uma exigência do módulo CESSIPy, onde o tempo mínimo necessário para a ferramenta de processamento modal é de um minuto.

A fixação dos acelerômetros foi realizada através do uso da fita dupla face 3M VHB™ (https://www.3m.com.br/3M/pt_BR/p/d/b40072022/) em todas as aplicações com o dispositivo. No caso específico do celular, foi utilizado uma capa de proteção plástica, onde a fita dupla face era fixada no dorso da capa.

Antes da inserção de dano, o conhecimento do comportamento dinâmico da viga foi definido a partir de amostras realizadas com os acelerômetros *ST Microelectronics* e o celular, no dia 29/09/2021.

O ensaio final foi realizado sem o uso do acelerômetro *ST Microelectronics* já que este dispositivo apresentou problemas de operação e foi descartado, no dia 26/10/2021. Este ensaio foi realizado com o acelerômetro *WitMotion* e o celular.

Processamento dos dados obtidos e comparação com os modelos numéricos

Para os viadutos, a aceleração passou primeiro pela etapa de correção da taxa de amostragem e calibração. Com os dados naturais, definiram-se os valores do *RMS*, a aceleração de pico-a-pico e o índice de dano *DI* com a amostra natural, a partir da aplicação das equações (13) ou (14), de acordo com a intensidade da vibração.

O filtro Butterworth passa-banda de ordem igual a 1 foi configurado com frequência baixa de 1 Hz e alta de 40 Hz. A estimativa de atenuação é de -20 dB, de acordo com Thompson (2013).

A escolha das frequências se deve à característica do smartphone, que insere ruído colorido⁴ em baixas frequências e considerou a máxima frequência encontrada por Castellanos-Toro et al (2018), igual a 30 Hz. O valor adotado foi ainda maior que este valor.

Com os dados filtrados e ainda no domínio do tempo, novos valores de *RMS*, aceleração pico-a-pico e índice de dano *DI* foram definidos. O valor *SNR* foi definido para verificar o ganho/atenuação do sinal utilizando os valores *RMS*s dos dados naturais e logo após a filtragem. Assim, definiu-se a contribuição do filtro Butterworth para as amostras.

A partir deste ponto foi aplicado o *RDT* com a condição de disparo Cruzamento de nível – *Level Crossing* – pois minimiza a variância e maximiza o número de segmentos.

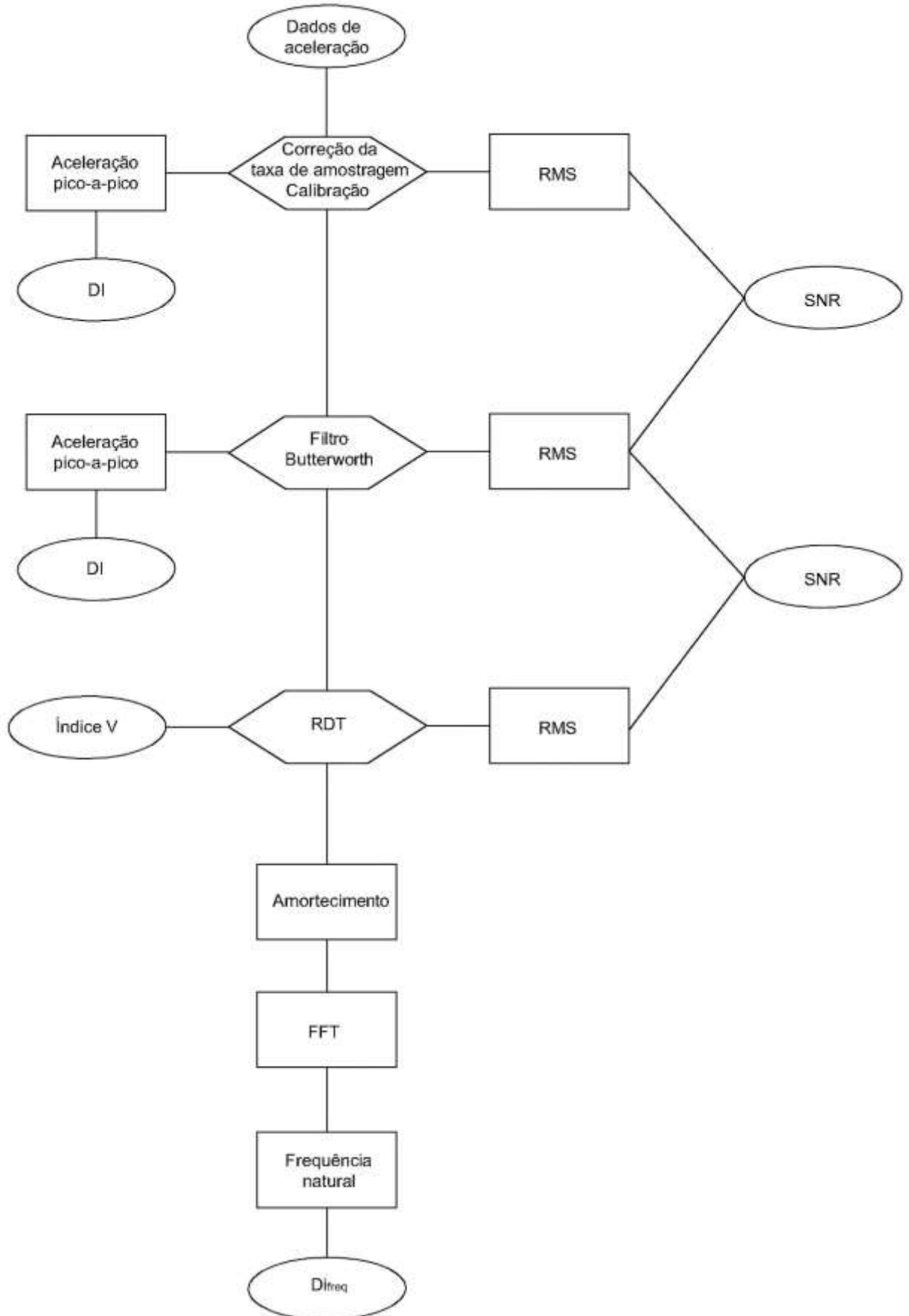
O resultado obtido do *RDT* foi utilizado para definir o índice de vibração *V*, um terceiro valor *RMS* e o amortecimento em domínio do tempo. O *SNR* definiu a contribuição do filtro *RDT* para a amostra.

Para o amortecimento, o número de picos sucessivos escolhidos foi igual a 11 e equivale a um valor *N* médio, já que o limite inferior é 9 e superior é 13. Este número foi escolhido a partir do gráfico fornecido por Tweten, Ballard e Mann (2014), e considerando a afirmação de Bachmann et al (1995), onde o amortecimento de pontes não deve ser superior a 2%.

Os dados de aceleração foram aplicados à Transformada Rápida de Fourier – *FFT* – para a mudança de domínios. O pico com maior magnitude resultante desta mudança de domínios equivale à frequência natural do modo considerado. Este valor é comparado ao primeiro ou segundo modo de flexão vertical fornecido pelo modelo numérico da estrutura para definir o índice de dano DI_{freq} . O Fluxograma 1 apresenta as etapas aplicadas aos viadutos.

⁴ O termo se refere a qualquer ruído com um espectro não-branco. Deste modo, predomina um espectro de baixa frequência.

Fluxograma 1: Fase experimental aplicada aos viadutos

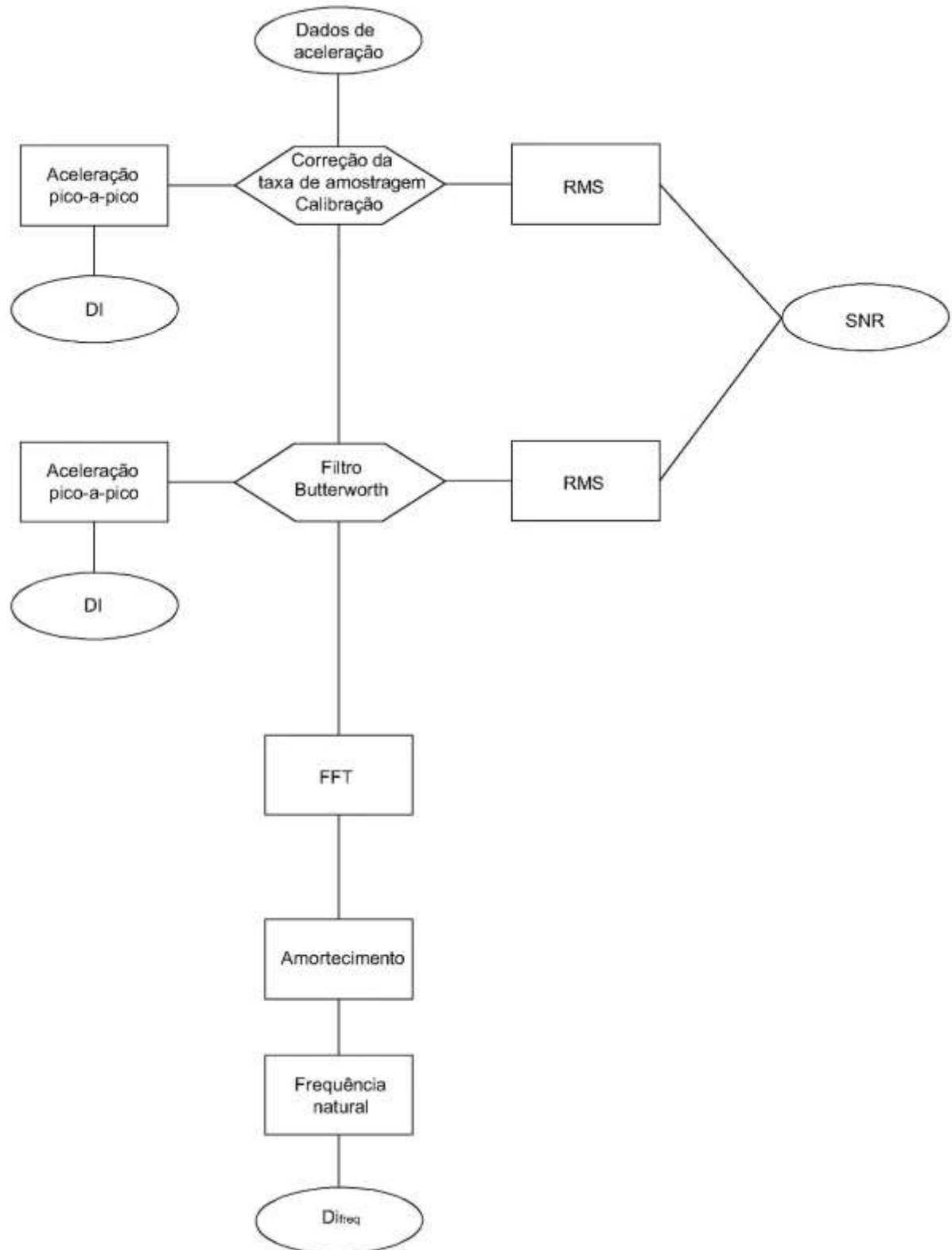


Fonte: Autor.

Para a viga T, o processo foi similar aquele aplicado aos viadutos. Porém, a etapa de aplicação do *RDT* foi retirada devido à excitação ser experimental e não se configurar como uma vibração operacional ou ambiental.

O índice de vibração *V* também foi retirado do processo pelo mesmo motivo. O amortecimento foi definido através do método de meia potência, em domínio da frequência. O Fluxograma 2 apresenta o processamento aplicado à viga T.

Fluxograma 2: Fase experimental aplicada à viga T



Fonte: Autor.

Análise dos resultados

A análise de resultados ocorreu através do indicativo dos parâmetros, como é previsto no *SHM*.

Foram considerados os parâmetros DI e DI_{freq} negativos como indicativos de uma ponte saudável, ou seja, sem danos. O índice DI_{freq} considera a frequência natural com origem nos modelos numéricos referente ao estado sem danos e a utiliza para a definição deste mesmo parâmetro.

Para o amortecimento, os valores considerados como base se apresentam bastante difusos. Assim, os limites apresentados na literatura de 2%; 2,5% e 3,5% foram adotados como limites para uma condição sem danos ou com danos em estágio inicial para as pontes em concreto armado, simplesmente apoiadas, utilizadas como estudo de caso.

Além disso, diferenças maiores que 5% entre as frequências experimentais e as numéricas foram consideradas um indicativo de dano.

O índice V foi considerado um indicativo de dano apenas para os viadutos.

Ao fim do processo, uma amostra de cada conjunto de dados é processada com o módulo CESSIPy - criado por Carini (2021) em linguagem Python e depositado na plataforma gratuita GitHub (<https://github.com/MatheusCarini/CESSIPy>) - para a estimativa dos parâmetros modais através de dados de saída. Os métodos utilizados nesta etapa são o *SSI-COV*, *SSI-DATA* e o *EFDD*. Este procedimento de verificação não consta no fluxograma que descreve a ordem e as etapas realizadas.

4 RESULTADOS

4.1 Correção da taxa de amostragem

Os arquivos de texto gerados pelo aplicativo *Vibration Alarm* foram analisados. O passo do tempo não foi definido com precisão, pois o aplicativo apresenta apenas um algarismo do milissegundo.

Assim, a partir da relação entre a frequência natural f_s e o período T foi definida a variação da taxa de amostragem. Para a taxa de 428 Hz definida no aplicativo, a análise do arquivo de acelerações indicou apenas um algarismo igual a “2”. Portanto, o passo do tempo que considera este algarismo pode apresentar uma taxa de amostragem que varia entre 428 Hz e passo do tempo de 0,0023364485 milissegundos até 334 Hz e 0,0029940119 milissegundos.

No mesmo arquivo, o passo do tempo cria algarismos iguais ao número “3” e “4” em várias leituras. Assim, o passo do tempo que considera o algarismo “3” varia entre uma faixa de 251 Hz com 0,0039840637 milissegundos até 333 Hz e 0,0003033 milissegundos. O algarismo “4” indica uma faixa de frequência de 201 Hz com 0,004975124 milissegundos até 250 Hz com 0,004 milissegundos.

A Tabela 14 apresenta os intervalos de taxas de amostragens que podem ser obtidos para cada algarismo com este procedimento. Ao saber que o algarismo no arquivo de aceleração indica o tempo necessário para a leitura de uma aceleração e não é descrito de forma precisa, identificou-se o intervalo de frequências que este algarismo poderia representar. Foi considerado que este algarismo indica o terceiro número depois da vírgula.

Tabela 14: Intervalos das taxas de amostragens

| Algarismo no arquivo de acelerações | Taxa máxima de amostragem f_s (Hz) | Tempo de leitura para cada aceleração – $T=1/f_s$ (s) | Taxa mínima de amostragem f_s (Hz) | Tempo de leitura para cada aceleração – $T=1/f_s$ (s) |
|-------------------------------------|--------------------------------------|---|--------------------------------------|---|
| 2 | 428 | 0,0023364485 | 334 | 0,0029940119 |
| 3 | 333 | 0,0030030030 | 251 | 0,0039840634 |
| 4 | 250 | 0,004 | 201 | 0,0049751243 |

Fonte: Autor.

Ao final, as taxas de amostragens mínima e máxima obtidas indicaram reduções de 8,88% e 29,90%, e valores de aproximadamente 390 Hz e 300 Hz para o *Vibration Alarm*, respectivamente. Ainda assim, com a taxa de amostragem

remanescente seria possível monitorar estudos de caso com frequências de operação até 150 Hz, o que obedece ao teorema de Nyquist.

4.2 Calibração

A calibração com o uso das duas peças de nylon industrial foi realizada em uma superfície plana, da qual não se aferiu a planicidade. A duração das amostras para calibração foi de um minuto para cada posição considerada e é maior que o tempo de 15 segundos, utilizado pelos autores do método de calibração. Não foram testados tempos diferentes, apenas combinações diferentes entre as posições das peças. A matriz de calibração C_s é apresentada.

$$C_s = \begin{bmatrix} z_z & y_z & x_z \\ z_y & y_y & x_y \\ z_x & y_x & x_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1017656 & 0,0006339 & -0,0003295 \\ -0,0003608 & 0,101254 & 0,0004612 \\ 0,0045794 & -0,0009603 & 0,1031238 \end{bmatrix}$$

O deslocamento de nível zero a_0 é apresentado abaixo:

$$a_0 = \begin{bmatrix} z_{a0} \\ y_{a0} \\ x_{a0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,0521225 \\ -0,0093539 \\ -0,0224103 \end{bmatrix}$$

Os valores C_s e a_0 são utilizados para corrigir as acelerações extraídas com o celular.

Para a calibração adicional, a frequência inicial foi igual a 6 Hz. A mesa possuía um dimmer de controle que não permitia um ajuste preciso sobre a frequência desejada para o funcionamento da mesa. A Tabela 15 apresenta as leituras realizadas pelos acelerômetros PCB Piezotronics 356A01 com taxa de amostragem de 200 Hz a do smartphone através do aplicativo *myFrequency*, com taxa de amostragem de 434 Hz.

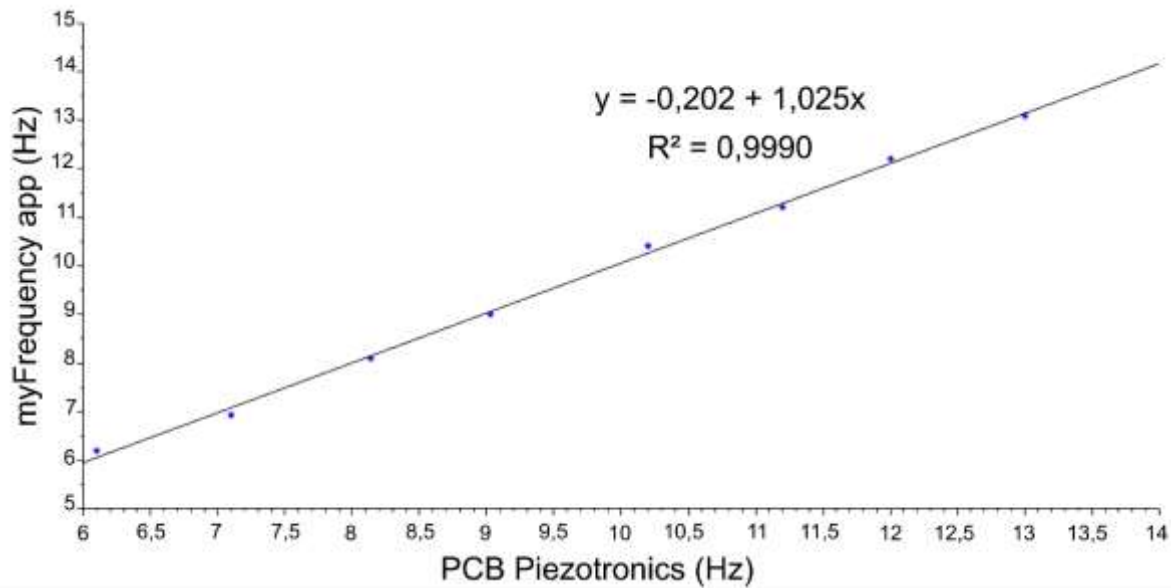
Tabela 15: Calibração do smartphone com o PCB Piezotronics 356A01

| PCB Piezotronics 356A01 (Hz) | Smartphone Motorola Moto Z2 force (Hz) |
|------------------------------|--|
| 6,10 | 6,20 |
| 7,10 | 6,94 |
| 8,14 | 8,10 |
| 9,03 | 9,00 |
| 10,20 | 10,40 |
| 11,20 | 11,20 |
| 12,00 | 12,20 |
| 13,00 | 13,10 |

Fonte: Autor.

A Figura 56 apresenta a regressão linear aplicada aos dados, a equação e a correlação definida. É possível observar que o coeficiente de determinação – R^2 - indica que 99,90% dos dados se ajustam ao modelo de previsão.

Figura 56: Regressão linear



Fonte: Autor

4.3 Angulação

Como apenas os dados de aceleração vertical foram utilizados, o ângulo ϕ formado entre o eixo vertical do smartphone e o vetor da aceleração da gravidade foi definido. O ângulo ϕ_+ obtido com posição positiva, situação em que a tela do smartphone é posicionada para cima foi de:

$$\phi_+ = \tan^{-1} \frac{\sqrt{(-0,0765406)^2 + (-0,043384)^2}}{9,7588723} = 0,5165^\circ$$

O ângulo ϕ_- obtido com a posição negativa, com a tela do smartphone posicionada para baixo, foi de:

$$\phi_- = \tan^{-1} \frac{\sqrt{(0,0458722)^2 + (-0,1067092)^2}}{-9,8908458} = -0,6728^\circ$$

Antes da definição destes ângulos, foram realizados testes com novas posições das peças de nylon industrial para obter ângulos menores, porém, sem sucesso.

4.4 Viaduto V1

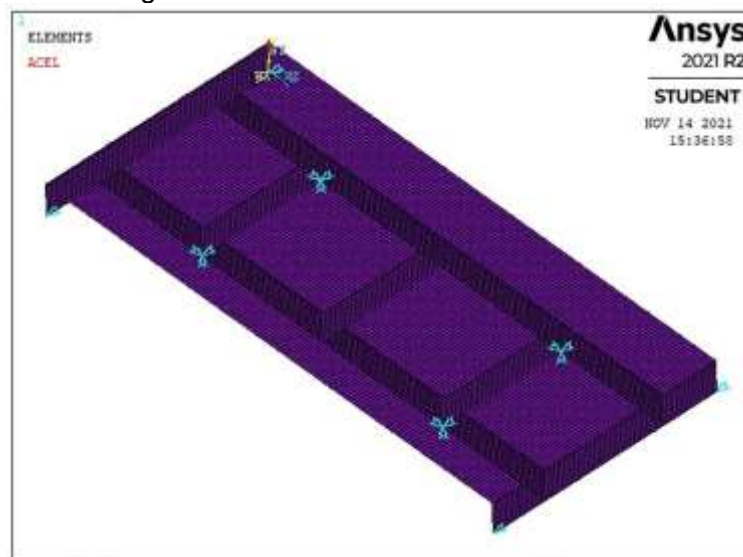
Inspeção visual

A inspeção visual aplicada ao viaduto V1 indicou danos em estágio inicial, com manifestações na superfície inferior do tabuleiro de manchas associadas à umidade e a eflorescência. O viaduto se encontra em estado de boa conservação como é apresentado no Anexo I – V1: inspeção visual. A nota final obtida por este viaduto foi igual a 5 em todos os parâmetros e indica uma condição excelente.

Modelo numérico

A Figura 57 apresenta o modelo numérico junto às vinculações adotadas para V1. Foi aplicada a análise modal com a definição de dez modos de vibração junto à matriz de massa consistente, a qual é indicada devido ao uso do elemento de casca SHELL181 (ANSYS, 2013).

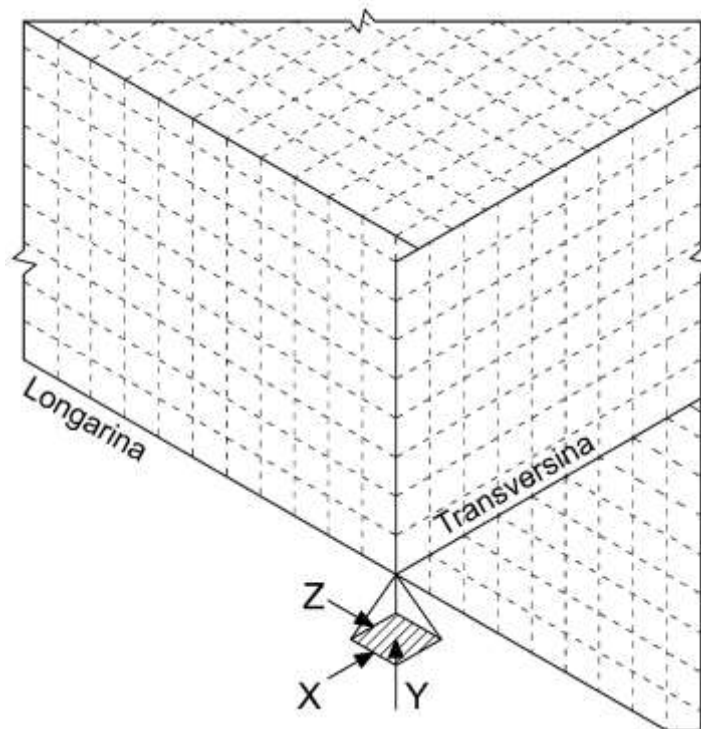
Figura 57: Viaduto V1 - Modelo numérico



Fonte: Autor.

As restrições utilizadas em pontos onde se localizam os pilares são apresentadas na Figura 58. Foram impedidos os movimentos de translação nos três eixos.

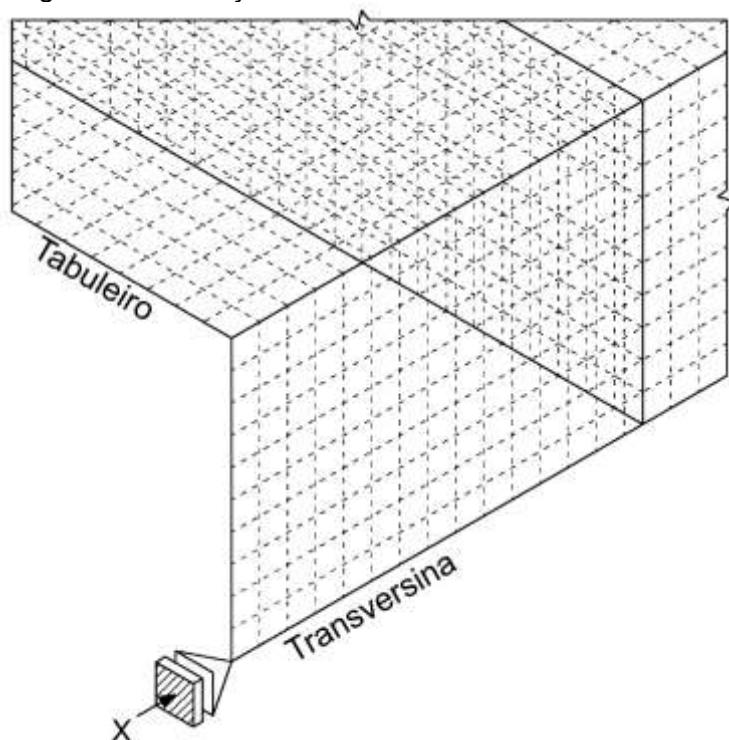
Figura 58: Restrições onde se localizam os pilares



Fonte: Autor.

A Figura 59 apresenta as restrições adicionadas nas transversinas de extremidade. Foi impedido o movimento de translação no eixo X.

Figura 59: Restrição nas transversinas de extremidade



Fonte: Autor.

A análise da qualidade do elemento ocorreu a partir da adoção do método *aspect ratio*, o qual foi aplicado com valor inicial igual a 1. Foram testadas às malhas de 45x45 cm, 30x30 cm e 15x15 cm as quais são apresentados na Tabela 16. É possível observar que ao diminuir a malha também diminuí a porcentagem de elementos com erro. As malhas de 30x30 cm e 15x15 cm não apresentaram erros a partir de um *aspect ratio* igual a 1,4. A análise estática do modelo para avaliar a malha não foi realizada.

Tabela 16: Aspect ratio – V1

| <i>Aspect ratio</i> | Malha (cm) | Contagem de elementos (un) | Elementos com erro (un) | Elementos com erro (%) |
|---------------------|------------|----------------------------|-------------------------|------------------------|
| 1,0 | 45x45 | 1964 | 1892 | 96,33 |
| | 30x30 | 3988 | 3500 | 87,76 |
| | 15x15 | 15600 | 13648 | 87,49 |

Fonte: Autor.

As respostas obtidas com as malhas utilizadas são apresentadas na Tabela 17. A dimensão das malhas buscou obedecer à limitação de nós oferecida pela versão estudantil do *ANSYS student 2021 R2*.

Deste modo, a configuração de malha 15x15 cm foi a menor utilizada, pois oferece uma porcentagem menor de elementos com erro. Nesta configuração de malha, um modo de vibração associado ao segundo modo de flexão vertical apresentou valor igual a 11,83 Hz. Os modos foram normalizados em relação à matriz de massa.

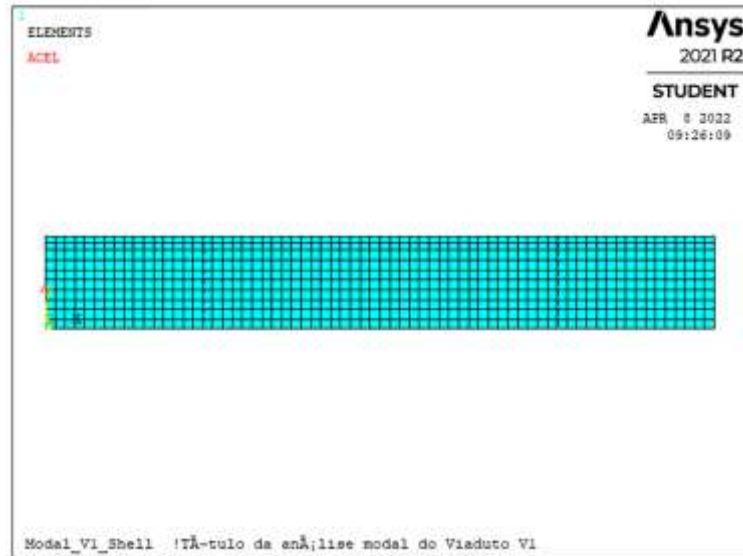
Tabela 17: Resultado numérico do viaduto V1

| Malha | Modo de vibração | Frequência natural (Hz) |
|-------|------------------|-------------------------|
| 45x45 | Torção | 11,53 |
| | Flexão | 11,93 |
| 30x30 | Torção | 13,27 |
| | Torção | 11,52 |
| | Flexão | 11,91 |
| 15x15 | Torção | 13,26 |
| | Torção | 11,50 |
| | Flexão | 11,83 |
| | Torção | 13,39 |

Fonte: Autor.

A Figura 60 apresenta a malha de 15x15 cm aplicada a uma das transversinas de extremidade.

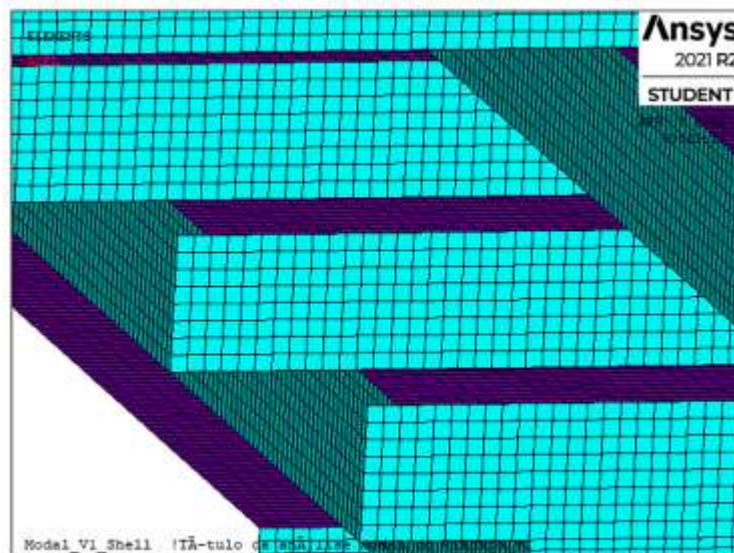
Figura 60: Malha de uma transversina em V1



Fonte: Autor.

A Figura 61 apresenta a malha em regiões onde as longarinas se conectam às transversinas. É possível identificar que as transversinas não se conectam ao tabuleiro.

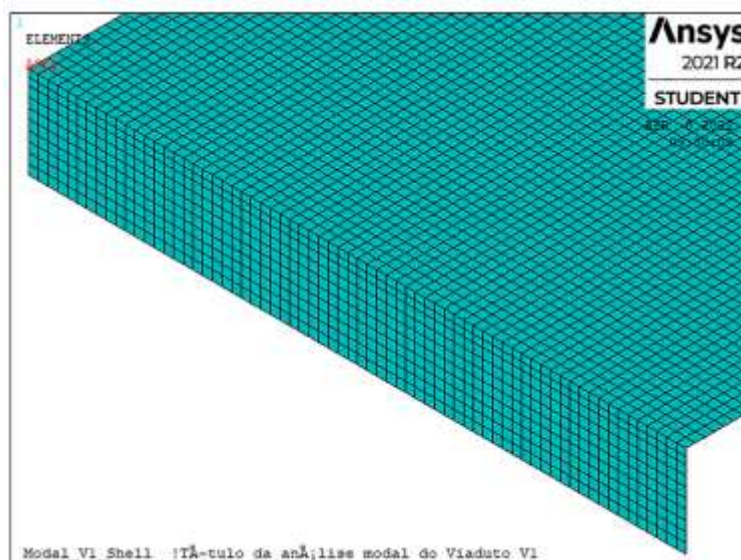
Figura 61: Malha nas regiões de encontro entre longarinas e transversinas em V1



Fonte: Autor.

A Figura 62 apresenta as malhas aplicadas no tabuleiro e na transversina de extremidade.

Figura 62: Malha do tabuleiro e de uma transversina em V1



Fonte: Autor.

Teste de vibração

A Tabela 18 apresenta os resultados obtidos para o viaduto V1 na primeira medição – amostras 1 a 8. É possível observar que as acelerações de pico-a-pico são menores que $0,15g$ e indicam um índice de dano DI negativo, ou seja, sem danos. O valor SNR obtido entre o valor RMS da resposta natural e o RMS após a passagem do filtro Butterworth de passa-banda indicou uma atenuação aproximada de -20 dB, o que representa a melhoria do sinal. Após a passagem deste filtro, houve uma redução na aceleração de pico-a-pico e um coeficiente DI ainda mais negativo.

O amortecimento apresentou valores elevados se comparado aos limites existentes na revisão bibliográfica – 2%, 2,5% e 3,5%. O valor médio foi de 3,9%, o desvio padrão igual a 0,67% e a variância igual a 0,44. Isto indica um intervalo de amortecimento entre 4,57% a 3,23%, onde duas das amostras não pertencem a este intervalo – 4,75% e 3,05%.

As frequências naturais apresentaram um valor médio de 12,11 Hz, o desvio padrão igual a 0,39 Hz e a variância igual a 0,15. Isto indica um intervalo de frequências naturais entre 12,50 Hz e 11,72 Hz, com duas amostras com valores fora deste intervalo – 12,58 Hz e 11,68 Hz.

Para a definição de DI_{freq} , a frequência natural numérica referente ao primeiro modo de flexão é 11,83 Hz. Este índice se apresentou negativo em seis amostras e indicou uma ponte saudável. Apenas duas amostras foram positivas. Além disso, as reduções de frequências não foram maiores que 5%.

O índice V apresentou valores negativos e não indicou um nível de dano.

O valor *SNR* após a aplicação do filtro *RDT* indicou atenuação máxima de -17,20 dB e mínima de -6,32 dB. Isto significa a melhoria do sinal quando comparado àquele após a passagem do filtro Butterworth passa-banda.

Tabela 18: Resultados experimentais obtidos para V1 - Amostras 1 a 8

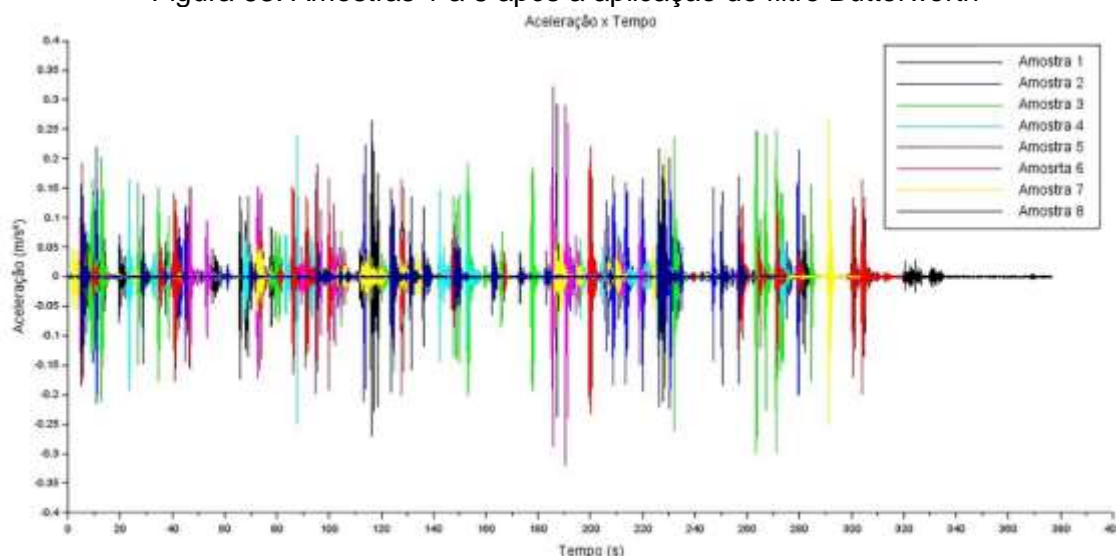
| Data | 28/03/19 | | Local | | L/2 | | | | | |
|------------|-------------------------|-------|---------------------|------------|-------|-----------|---------------|-------------|--------|----------|
| Fase | Am. Nat/ F. Butterworth | | F. Butterworth/ RDT | | | | | | | |
| Am | Ap-a-p (g) | DI | SNR (dB) | Ap-a-p (g) | DI | ξ (%) | ω (Hz) | DI_{freq} | V | SNR (dB) |
| 1 | 0,063 | -2,38 | -20,25 | 0,057 | -2,55 | 4,31 | 12,32 | -0,08 | -3,22 | -12,41 |
| 2 | 0,048 | -2,83 | -20,19 | 0,046 | -2,91 | 4,75 | 12,58 | -0,13 | -7,92 | -10,15 |
| 3 | 0,062 | -2,40 | -20,27 | 0,056 | -2,60 | 2,95 | 12,36 | -0,09 | -2,65 | -17,20 |
| 4 | 0,053 | -2,67 | -20,29 | 0,050 | -2,78 | 3,52 | 12,25 | -0,07 | -6,67 | -11,99 |
| 5 | 0,049 | -2,81 | -20,24 | 0,046 | -2,90 | 4,46 | 11,40 | 0,07 | -10,29 | -12,34 |
| 6 | 0,069 | -2,18 | -20,22 | 0,065 | -2,31 | 4,25 | 12,17 | -0,06 | -1,77 | -9,93 |
| 7 | 0,062 | -2,42 | -20,35 | 0,053 | -2,70 | 3,05 | 11,68 | 0,03 | -7,14 | -6,32 |
| 8 | 0,049 | -2,81 | -20,21 | 0,045 | -2,94 | 4,00 | 12,11 | -0,05 | -9,79 | -13,40 |
| \bar{x} | | | | | | 3,91 | 12,11 | | | |
| Σ | | | | | | 0,67 | 0,39 | | | |
| σ^2 | | | | | | 0,44 | 0,15 | | | |

Onde: Am.= amostra; Am. Nat.= amostra natural; F. Butterworth = Filtro Butterworth; Ap-a-p=Aceleração de pico-a-pico; DI=índice de dano de aceleração pico-a-pico; SNR=coeficiente sinal-ruído; ξ =amortecimento; ω =frequência natural; DI_{freq} =índice de dano que considera a variação da frequência natural; V=índice de vibração; \bar{x} = média; σ = desvio padrão; σ^2 = variância

Fonte: Autor.

As amostras 1 a 8 em domínio do tempo são apresentadas na Figura 63.

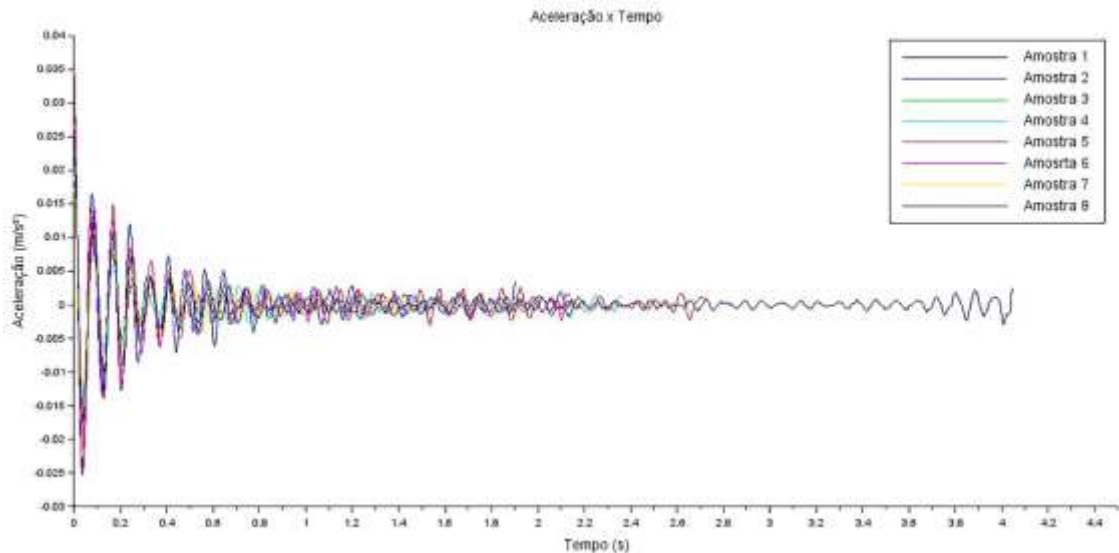
Figura 63: Amostras 1 a 8 após a aplicação do filtro Butterworth



Fonte: Autor.

O *RDT* resultante das amostras 1 a 8 é apresentado na Figura 64. É possível identificar o comportamento em decaimento logarítmico.

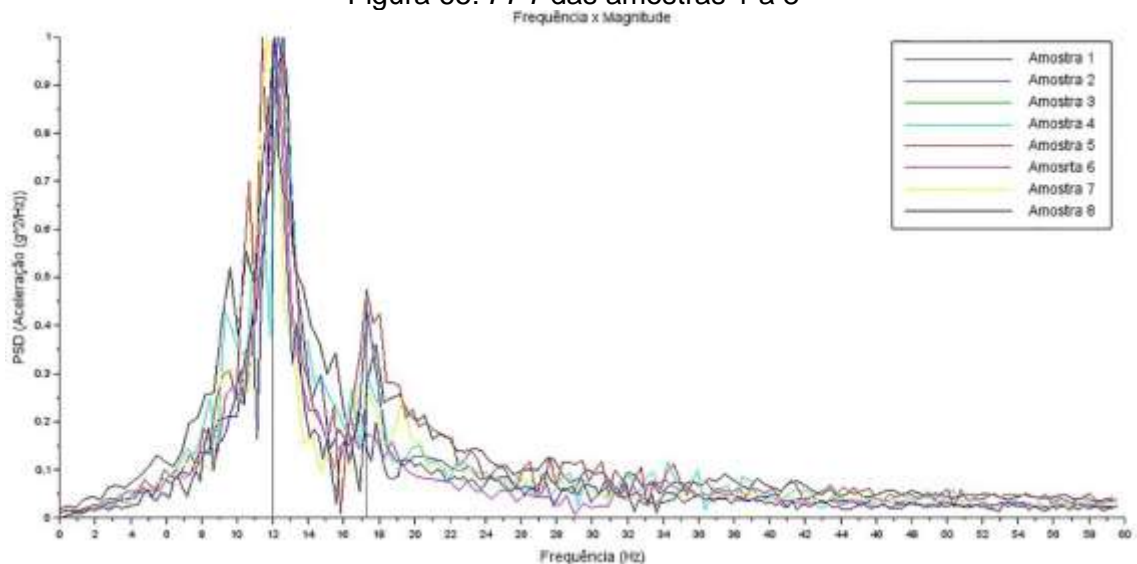
Figura 64: *RDT* resultante das amostras 1 a 8



Fonte: Autor.

O *FFT* resultante das amostras 1 a 8 é apresentado na Figura 65. Através do método de identificação de picos ou *Peak Picking*, onde os picos predominantes no gráfico *FFT* são associados às frequências naturais da estrutura, é possível indicar que existem dois modos: um próximo a 12 Hz, com maior energia e que prevalece sobre o segundo, com valor ligeiramente maior que 17 Hz e de menor energia.

Figura 65: *FFT* das amostras 1 a 8



Fonte: Autor.

A Tabela 19 apresenta os resultados obtidos para as amostras 9 a 16. As amostras extraídas do viaduto V1 apresentam características semelhantes como: acelerações de pico-a-pico menores que 0,15g; *DI* negativo, ou seja, ponte saudável; *SNR* com atenuação próxima de -20 dB e; índice *V* negativo, sem a capacidade de

classificar o dano. Assim, comentários referentes a estes parâmetros não serão mais realizados ao descrever os resultados obtidos.

O amortecimento médio destas amostras foi de 3,5%, com desvio padrão igual a 0,73% e variância igual a 0,53. Isto apresenta uma faixa de amortecimento entre 4,23% e 2,77%, onde duas amostras se apresentam fora deste intervalo – 4,55% e 2,44%.

Em relação à frequência natural, o valor médio foi igual a 12,17 Hz, com desvio padrão igual a 0,30 Hz e variância igual a 0,09. Isto indica um intervalo de frequências naturais entre 12,47 Hz e 11,87 Hz, onde duas amostras se apresentam fora deste intervalo – 11,75 Hz e 11,65 Hz.

O indicador de dano DI_{freq} apresentou apenas dois valores positivos. A variação da frequência apresentou uma diminuição menor que 5%, ou seja, sem danos.

O SNR após o uso do filtro RDT indicou uma atenuação máxima de -11,93 dB e mínima de -2,85 dB. Isto indica a melhoria da qualidade do sinal.

Tabela 19: Resultados experimentais obtidos para V1 - Amostras 9 a 16

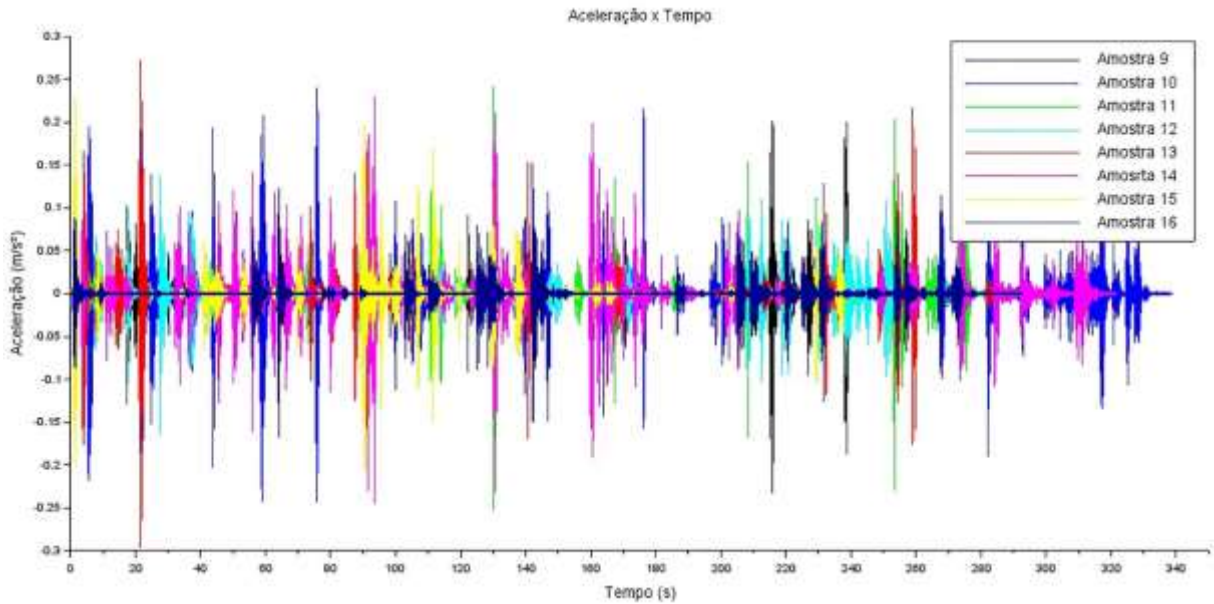
| Data Fase Am | 11/04/19 | | Local | | L/2 | | F. Butterworth/ RDT | | | | |
|--------------------|----------|----------------|--------|-------|--------|------|---------------------|----------|-------------|--------|------|
| | Am. Nat/ | F. Butterworth | Ap-a-p | DI | Ap-a-p | DI | ξ | ω | DI_{freq} | V | SNR |
| | (g) | (dB) | (g) | (dB) | (g) | (dB) | (%) | (Hz) | | | (dB) |
| 9 | 0,048 | -2,85 | -20,28 | 0,044 | -2,95 | 2,52 | 12,37 | -0,09 | -10,42 | -11,77 | |
| 10 | 0,058 | -2,53 | -20,27 | 0,052 | -2,73 | 4,00 | 12,14 | -0,05 | -7,46 | -11,93 | |
| 11 | 0,052 | -2,71 | -20,22 | 0,050 | -2,77 | 2,44 | 12,47 | -0,11 | -6,54 | -11,93 | |
| 12 | 0,035 | -3,25 | -20,25 | 0,031 | -3,36 | 4,55 | 11,75 | 0,01 | -20,22 | -2,85 | |
| 13 | 0,062 | -2,42 | -20,24 | 0,058 | -2,54 | 3,71 | 12,30 | -0,08 | -4,69 | -11,51 | |
| 14 | 0,052 | -2,72 | -20,23 | 0,048 | -2,83 | 3,33 | 12,29 | -0,08 | -8,24 | -11,43 | |
| 15 | 0,046 | -2,89 | -20,19 | 0,044 | -2,96 | 3,88 | 12,36 | -0,09 | -8,17 | -10,80 | |
| 16 | 0,037 | -3,19 | -20,25 | 0,033 | -3,31 | 3,56 | 11,65 | 0,03 | -18,43 | -11,22 | |
| \bar{x} | | | | | | 3,50 | 12,17 | | | | |
| σ | | | | | | 0,73 | 0,30 | | | | |
| σ^2 | | | | | | 0,53 | 0,09 | | | | |

Onde: Am.= amostra; Am. Nat.= amostra natural; F. Butterworth = Filtro Butterworth; Ap-a-p=Aceleração de pico-a-pico; DI=índice de dano de aceleração pico-a-pico; SNR=coeficiente sinal-ruído; ξ =amortecimento; ω =frequência natural; DI_{freq} =índice de dano que considera a variação da frequência natural; V=índice de vibração; \bar{x} = média; σ = desvio padrão; σ^2 = variância

Fonte: Autor.

A Figura 66 apresenta as amostras 9 a 16 após a passagem pelo filtro Butterworth.

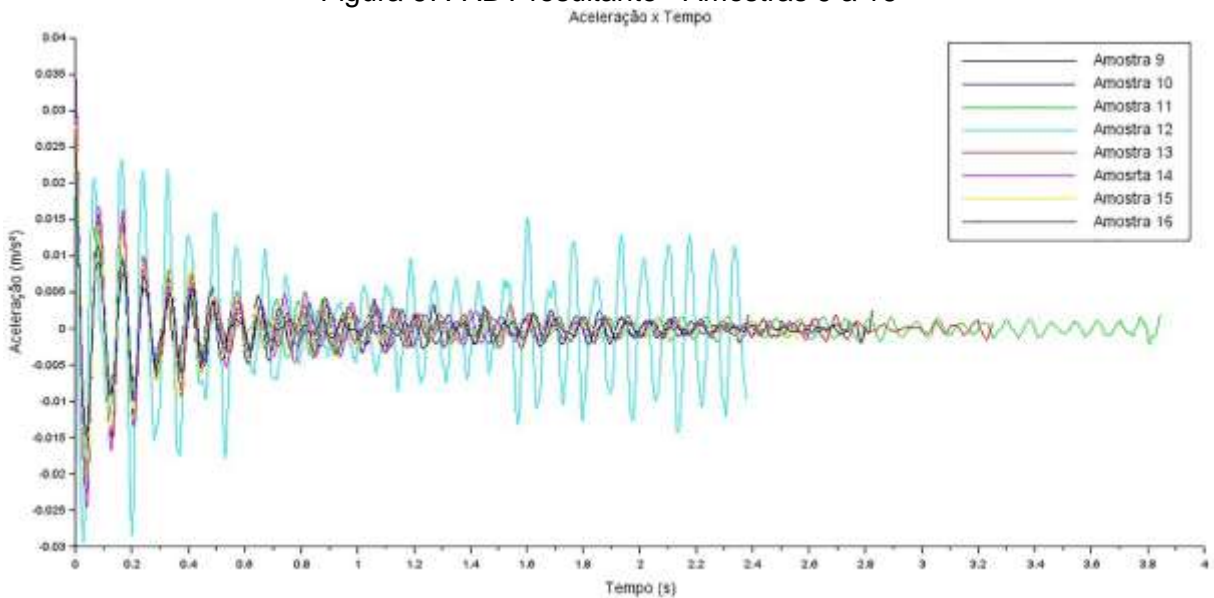
Figura 66: Amostras 9 a 16 após a passagem do filtro Butterworth



Fonte: Autor.

As amostras 9 a 16 em decaimento logarítmico é apresentada na Figura 67.

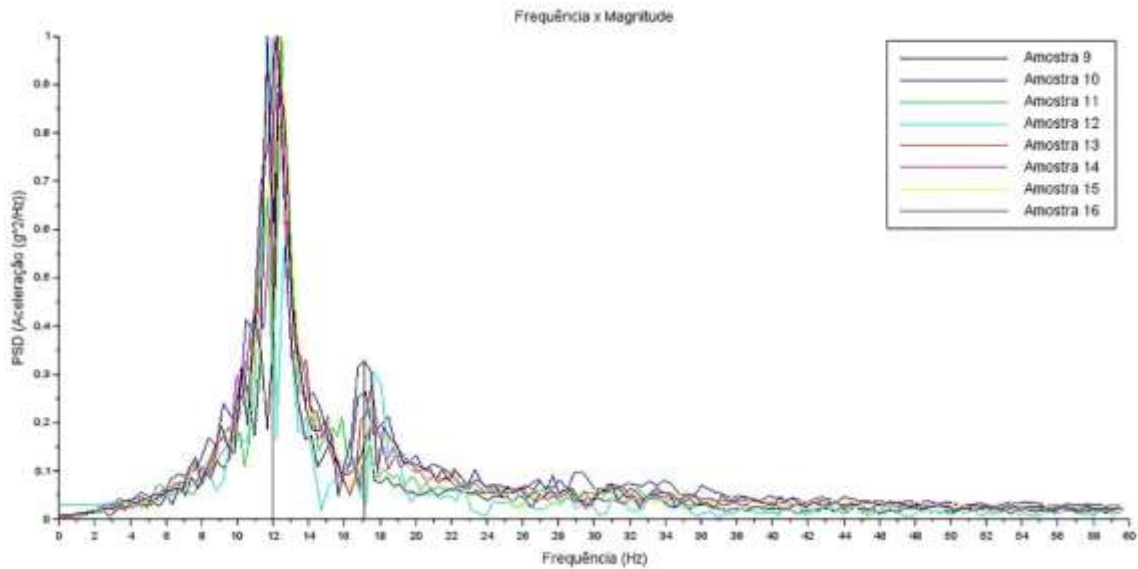
Figura 67: RDT resultante - Amostras 9 a 16



Fonte: Autor.

A *FFT* resultante das amostras 9 a 16 é apresentada na Figura 68. É possível identificar dois picos de frequência: um próximo a 12 Hz de maior energia e dominante e; outro ligeiramente maior que 17 Hz.

Figura 68: FFT resultante das amostras 9 a 16



Fonte: Autor.

Os resultados experimentais obtidos para V1 nas amostras 17 a 22 é apresentado na Tabela 20. O valor médio do amortecimento foi de 4,06%, o desvio padrão foi de 0,88% e a variância de 0,78. Isto fornece um intervalo de amortecimento entre 4,94% e 3,18%, onde duas amostras não pertencem a estes limites – 5,70% e 3,08%.

A frequência natural assumiu um valor médio de 12,58 Hz, com desvio padrão igual a 0,93 Hz e variância de 0,86. Isto indica um intervalo de frequência natural entre 13,51 Hz e 11,65 Hz, onde apenas um valor ultrapassa estes limites – 14,38 Hz.

O índice DI_{freq} apresentou apenas um valor positivo, o que representa dano. Não houve redução das frequências naturais maiores que 5%, o que representa que a ponte não possui danos.

O valor SNR após a aplicação do filtro RDT indicou uma atenuação máxima de -14,14 dB e mínima de -11,44 dB, o que representa a melhoria da qualidade do sinal.

Tabela 20: Resultados experimentais obtidos para V1 - Amostras 17 a 22

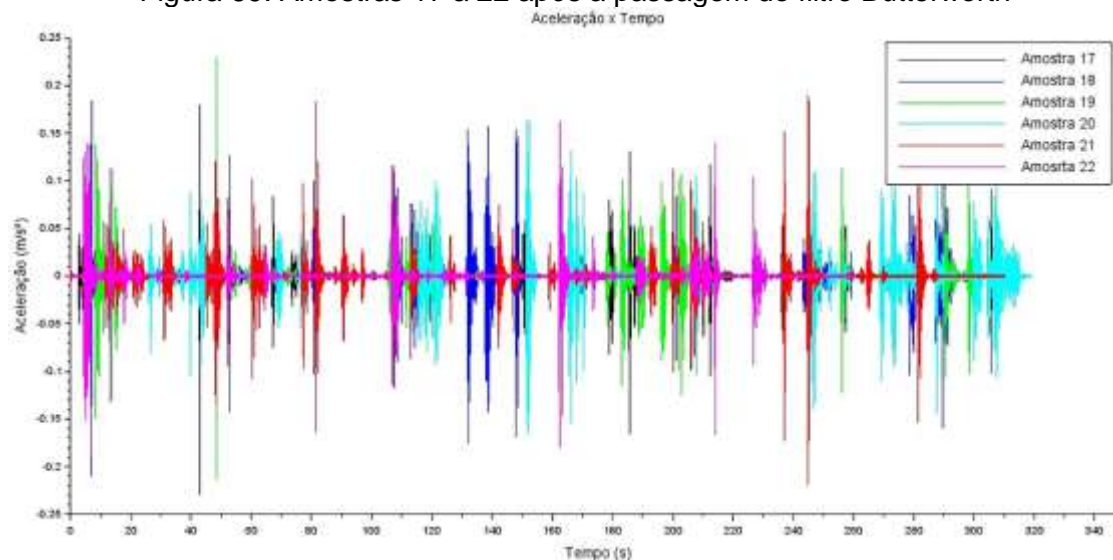
| Data | 02/05/19 | | Local | L/2 | | | | | | |
|------------|-------------------------|-------|---------------------|---------------|-------|--------------|------------------|--------------------|--------|-------------|
| Fase | Am. Nat/ F. Butterworth | | F. Butterworth/ RDT | | | | | | | |
| Am | Ap-a-p (g) | DI | SNR (dB) | Ap-a-p (g) | DI | ξ (%) | ω (Hz) | DI _{freq} | V | SNR (dB) |
| 17 | 0,045 | -2,92 | -20,41 | 0,042 | -3,03 | 4,13 | 12,43 | -0,10 | -12,11 | -14,14 |
| 18 | 0,042 | -3,02 | -20,24 | 0,040 | -3,08 | 5,70 | 11,78 | 0,01 | -13,75 | -12,21 |
| 19 | 0,048 | -2,85 | -20,27 | 0,045 | -2,93 | 3,78 | 12,45 | -0,11 | -7,73 | -11,51 |
| 20 | 0,037 | -3,18 | -20,28 | 0,132 | -0,28 | 3,69 | 12,49 | -0,11 | -14,60 | -11,44 |
| 21 | 0,045 | -2,93 | -20,25 | 0,042 | -3,03 | 3,08 | 11,97 | -0,02 | -12,96 | -13,16 |
| 22 | 0,040 | -3,09 | -20,42 | 0,036 | -3,21 | 3,97 | 14,38 | -0,48 | -10,53 | -13,95 |
| \bar{x} | | | | | | 4,06 | 12,58 | | | |
| σ | | | | | | 0,88 | 0,93 | | | |
| σ^2 | | | | | | 0,78 | 0,86 | | | |

Onde: Am.= amostra; Am. Nat.= amostra natural; F. Butterworth = Filtro Butterworth; Ap-a-p=Aceleração de pico-a-pico; DI=índice de dano de aceleração pico-a-pico; SNR= coeficiente sinal-ruído; ξ =amortecimento; ω =frequência natural; DI_{freq}=índice de dano que considera a variação da frequência natural; V=índice de vibração; \bar{x} = média; σ = desvio padrão; σ^2 = variância

Fonte: Autor.

A Figura 69 apresenta as amostras 17 a 22 após a passagem do filtro Butterworth.

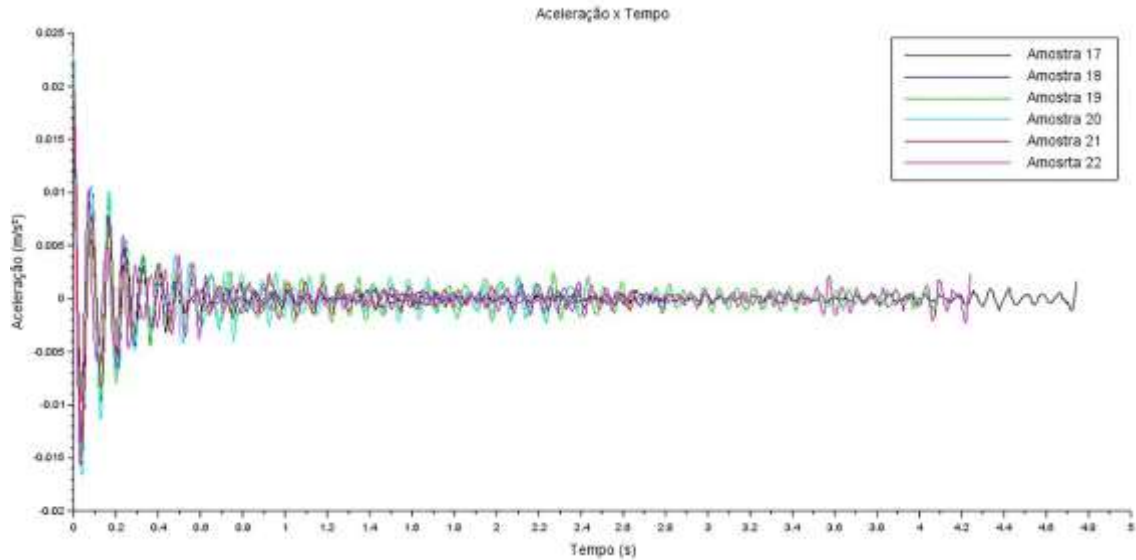
Figura 69: Amostras 17 a 22 após a passagem do filtro Butterworth



Fonte: Autor.

A Figura 70 apresenta o RDT resultante das amostras 17 a 22.

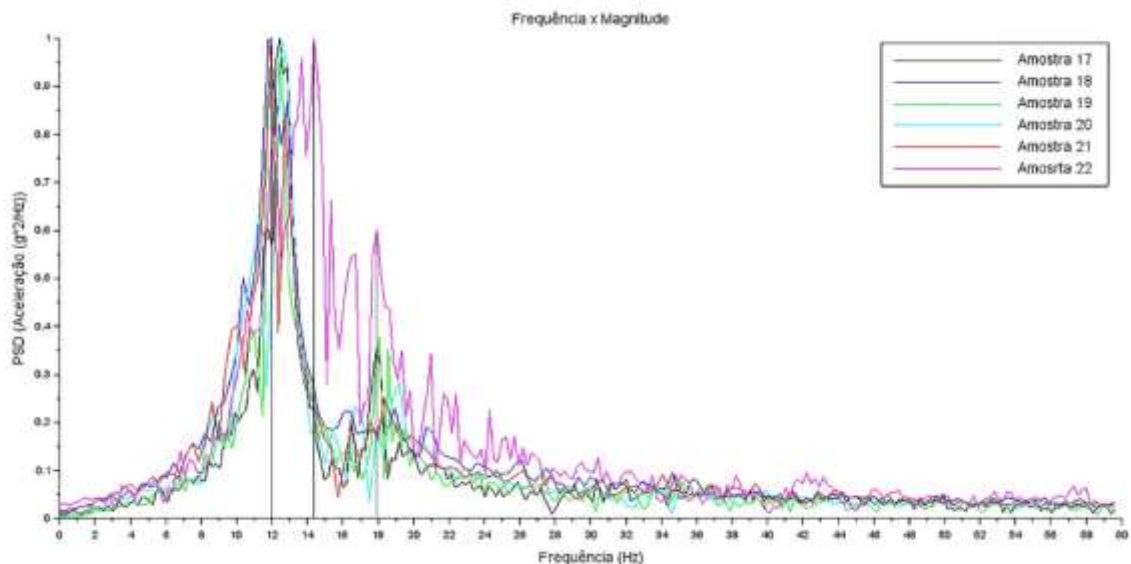
Figura 70: *RDT* resultante - Amostras 17 a 22



Fonte: Autor.

A *FFT* resultante das amostras 17 a 22 é apresentado na Figura 71. É possível identificar uma frequência natural de 12 Hz com maior energia e; 18 Hz com menor energia. A amostra 22 indicou uma frequência natural igual a 14 Hz. Os resultados obtidos para o viaduto V1 para o restante das amostras podem ser visualizados no Anexo E – V1: Resultados experimentais.

Figura 71: *FFT* resultante – amostras 17 a 22



Fonte: Autor.

A Tabela 21 apresenta os resultados experimentais do viaduto V1 para as amostras 69 a 74. É possível identificar valores de frequências naturais diferentes, pois o local de extração foi igual a $L/3$.

O valor de amortecimento médio foi de 3,71%, com desvio padrão de 0,30% e variância de 0,09. Isto indica uma faixa de amortecimento entre 4,01% e 3,41%, onde os valores 4,08% e 3,16% não pertencem a este intervalo.

A frequência natural indicou a ocorrência de modos dominantes com valores de, aproximadamente, 12 Hz e 17 Hz em diferentes amostras. Assim, a média, o desvio padrão e a variância não foram apresentados.

O índice DI_{freq} foi obtido ao comparar o primeiro e o segundo modo de vibração numérico de acordo com a frequência natural dominante. Assim, apenas coeficientes negativos foram definidos e indicaram uma ponte saudável. A frequência natural não apresentou redução para nenhum dos modos numéricos considerados.

O valor SNR após aplicar o RDT apresentou uma atenuação máxima de -16,76 dB e -15,60 dB, o que representa uma melhoria na qualidade do sinal.

Tabela 21: Resultados experimentais obtidos para V1 – Amostras 69 a 74

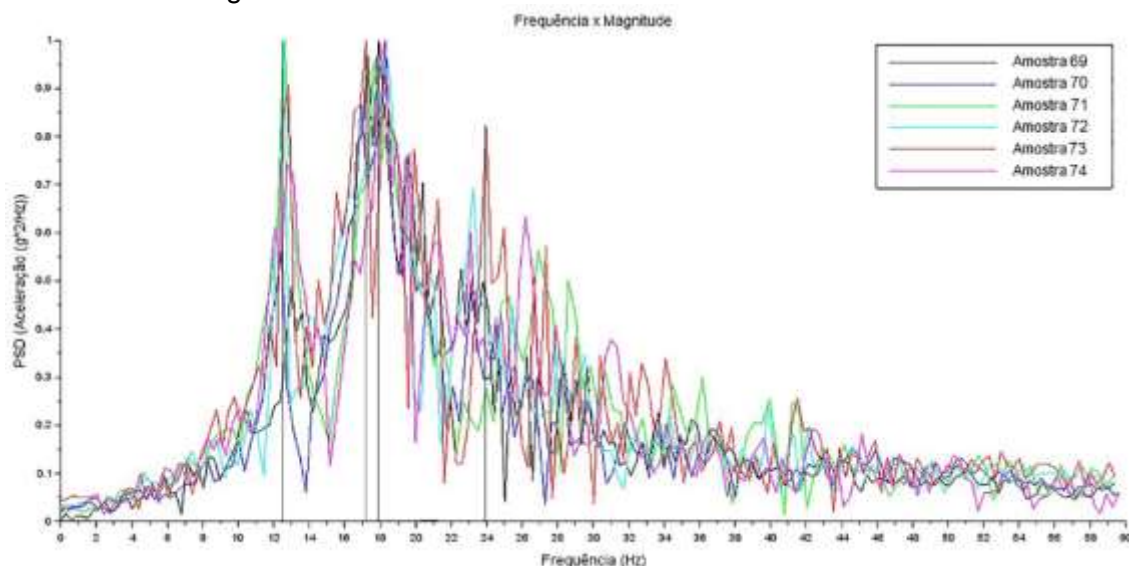
| Data | 17/08/20 | | Local | | L/3 | | | | | | |
|------------|-------------------------|--------|---------------------|--------|--------|-------|-------|----------|-------------|--------|--------|
| | Am. Nat/ F. Butterworth | | F. Butterworth/ RDT | | | | | | | | |
| Fase | Am | Ap-a-p | DI | SNR | Ap-a-p | DI | ξ | ω | DI_{freq} | V | SNR |
| | | (g) | | (dB) | (g) | | (%) | (Hz) | | | (dB) |
| 69 | | 0,027 | -3,48 | -20,79 | 0,023 | -3,60 | 3,67 | 17,91 | -0,69 | -12,07 | -15,80 |
| 70 | | 0,029 | -3,43 | -20,83 | 0,025 | -3,55 | 3,73 | 18,29 | -0,76 | -10,21 | -16,76 |
| 71 | | 0,033 | -3,31 | -20,86 | 0,030 | -3,38 | 4,08 | 12,60 | -0,13 | -17,06 | -15,60 |
| 72 | | 0,031 | -3,36 | -20,74 | 0,027 | -3,50 | 3,83 | 12,53 | -0,12 | -20,89 | -16,38 |
| 73 | | 0,025 | -3,54 | -20,84 | 0,021 | -3,67 | 3,16 | 17,20 | -0,13 | -14,93 | -16,24 |
| 74 | | 0,028 | -3,46 | -20,91 | 0,023 | -3,62 | 3,82 | 18,25 | -0,56 | -11,94 | -15,74 |
| \bar{x} | | | | | | | 3,71 | - | | | |
| σ | | | | | | | 0,30 | - | | | |
| σ^2 | | | | | | | 0,09 | - | | | |

Onde: Am.= amostra; Am. Nat.= amostra natural; F. Butterworth = Filtro Butterworth; Ap-a-p=Aceleração de pico-a-pico; DI=índice de dano de aceleração pico-a-pico; SNR=coeficiente sinal-ruído; ξ =amortecimento; ω =frequência natural; DI_{freq} =índice de dano que considera a variação da frequência natural; V=índice de vibração; \bar{x} = média; σ = desvio padrão; σ^2 = variância

Fonte: Autor.

A Figura 72 apresenta o FFT resultante dos dados extraídos a L/3 do vão. Através da análise do gráfico da FFT é possível indicar quatro modos de vibração: um ligeiramente maior que 12 Hz; um próximo de 16 Hz; um próximo de 18 Hz e; outro próximo de 24 Hz. Isto confirma a indicação de que o local L/3 consegue identificar um maior número de modos de vibração que ocorrem na estrutura.

Figura 72: FFT resultante das amostras extraídas as L/3 de V1



Fonte: Autor.

A Tabela 22 apresenta os valores máximos, médios e mínimos dos parâmetros de amortecimento e frequência natural, obtidas por cada conjunto de medições. As amostras extraídas em L/3 foram omitidas já que apresentaram modos de vibração diferentes daqueles obtidos em L/2.

Tabela 22: Valores de amortecimento e frequência natural para V1

| Am. | Local | ξ_{med} (%) | ξ_{max} (%) | ξ_{min} (%) | σ | σ^2 | ω_{med} (Hz) | ω_{max} (Hz) | ω_{min} (Hz) | σ | σ^2 |
|---------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|----------|------------|------------------------|------------------------|------------------------|----------|------------|
| 1 a 8 | L/2 | 3,91 | 4,75 | 2,91 | 0,67 | 0,44 | 12,11 | 12,58 | 12,11 | 0,39 | 0,15 |
| 9 a 16 | L/2 | 3,50 | 4,55 | 2,44 | 0,73 | 0,53 | 12,17 | 12,47 | 11,65 | 0,30 | 0,09 |
| 17 a 22 | L/2 | 4,06 | 5,70 | 3,08 | 0,88 | 0,78 | 12,58 | 14,38 | 11,78 | 0,93 | 0,86 |
| 23 a 28 | L/2 | 4,43 | 4,71 | 4,16 | 0,23 | 0,05 | 12,43 | 12,81 | 12,13 | 0,29 | 0,08 |
| 29 a 34 | L/2 | 4,22 | 5,00 | 3,00 | 0,74 | 0,54 | 12,46 | 13,06 | 11,82 | 0,45 | 0,20 |
| 35 a 40 | L/2 | 3,71 | 5,06 | 2,79 | 0,79 | 0,63 | 12,61 | 13,05 | 11,61 | 0,59 | 0,35 |
| 41 a 46 | L/2 | 3,97 | 5,33 | 2,57 | 0,94 | 0,89 | 12,45 | 12,63 | 12,29 | 0,12 | 0,02 |
| 47 a 52 | L/2 | 3,12 | 4,05 | 2,18 | 0,64 | 0,41 | 12,40 | 12,51 | 12,18 | 0,12 | 0,01 |
| 53 a 58 | L/2 | 3,46 | 4,02 | 2,76 | 0,42 | 0,18 | 12,25 | 12,42 | 12,11 | 0,14 | 0,02 |
| 59 a 63 | L/2 | 4,22 | 5,20 | 3,36 | 0,79 | 0,62 | 12,00 | 12,51 | 11,31 | 0,49 | 0,24 |
| 64 a 68 | L/2 | 4,26 | 5,45 | 3,72 | 0,71 | 0,51 | 12,18 | 12,55 | 12,02 | 0,21 | 0,04 |
| 69 a 74 | L/3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

Am.=amostras; ξ_{med} =amortecimento médio; ξ_{max} =amortecimento máximo; ξ_{min} =amortecimento mínimo; ω_{med} = média da frequência natural; ω_{max} =valor máximo de frequência natural; ω_{min} =valor de frequência natural mínimo; σ =desvio padrão; σ^2 =variância

Fonte: Autor.

Os resultados obtidos através do módulo CESSIPy a partir do uso dos métodos SSI-COV e SSI-DATA são apresentados na Tabela 23. Foram escolhidas amostras aleatórias referentes aos dados extraídos na metade do vão e em L/3 do vão.

É possível observar que as frequências resultantes se aproximaram daquelas já identificadas pelo método aplicado para avaliar os viadutos, ou seja, próximas a 12

Hz e 18 Hz. Porém, é possível observar um pico de frequência referente à 33 Hz, o qual não foi identificado na metodologia aplicada. Além disso, na Tabela 23 existem locais sem a indicação dos valores, onde não foi possível identificar frequências naturais e taxas de amortecimentos para os respectivos modos.

O amortecimento apresenta uma variação significativa. Neste caso, para os modos com estabilização de frequência natural, amortecimento e formas modais – na cor vermelha -, os resultados obtidos se aproximam da faixa de valores que se espera para uma ponte em concreto simplesmente apoiada apresentada na revisão bibliográfica.

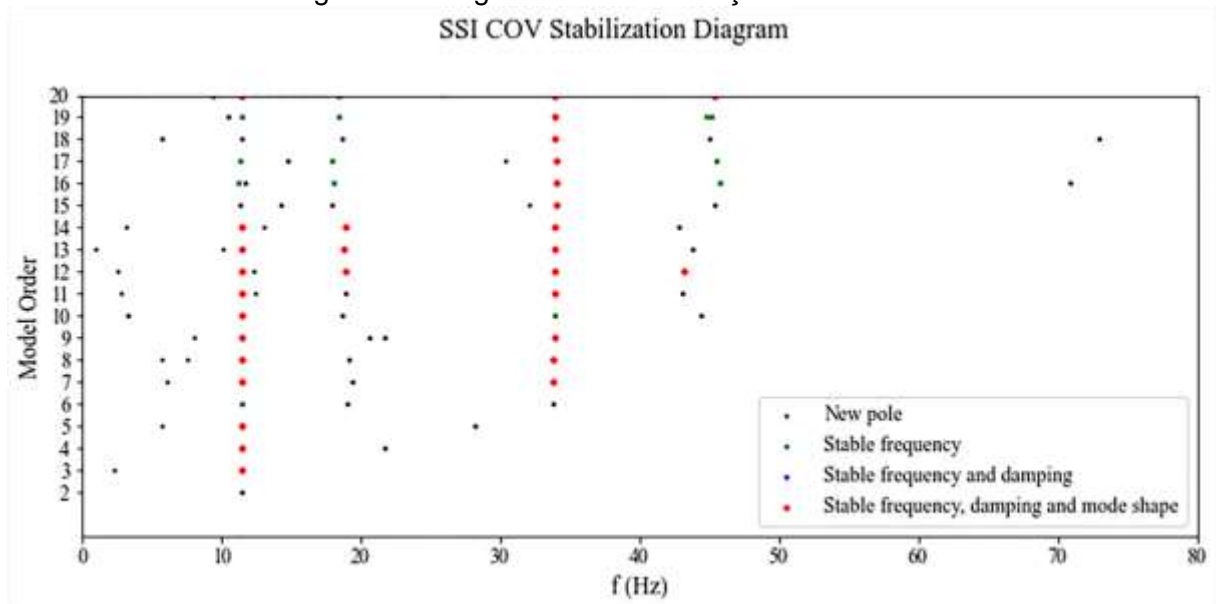
Tabela 23: Resultados SSI-COV e SSI-DATA - Viaduto V1

| Am. | SSI-COV | | | | | | SSI-DATA | | | | | |
|-----|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| | f_1 (Hz) | ξ_1 (%) | f_2 (Hz) | ξ_2 (%) | f_3 (Hz) | ξ_3 (%) | f_1 (Hz) | ξ_1 (%) | f_2 (Hz) | ξ_2 (%) | f_3 (Hz) | ξ_3 (%) |
| 1 | 11,42 | 6,3 | 33,86 | 4,00 | - | - | 11,45 | 6,8 | 33,78 | 4,3 | 43,13 | 6,7 |
| 11 | 12,04 | 4,5 | 18,6 | 7,5 | 32,49 | 5,7 | 12,07 | 5,1 | 18,6 | 7,55 | 32,49 | 5,7 |
| 17 | 12,18 | 0,69 | 16,88 | 13,85 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 23 | 12,36 | 2,57 | 18,54 | 7,36 | 36,97 | 0,06 | 12,09 | 3,24 | 18,54 | 7,36 | - | - |
| 29 | 11,99 | 10,9 | 30,28 | 9,89 | - | - | - | - | 30,86 | 9,19 | 132,86 | 1,1 |
| 35 | 12,03 | 7,92 | 27,98 | 7,4 | 32,84 | 7,2 | 12,71 | 3,12 | 19,73 | 7,63 | 32,71 | 3,76 |
| 41 | 12,16 | 3,18 | 17,66 | 2,5 | 30,82 | 9,4 | 12,29 | 3,27 | 17,66 | 2,5 | 30,82 | 9,4 |
| 47 | 12,17 | 8,3 | 18,41 | 5,2 | 31,37 | 12,37 | 12,79 | 8,13 | 18,38 | 5,88 | - | - |
| 53 | 11,98 | 17,51 | 31,93 | 10,0 | - | - | 30,68 | 7,27 | 45,82 | 4,8 | - | - |
| 59 | 12,9 | 4,5 | 17,59 | 7,68 | 31,68 | 6,1 | 12,94 | 4,4 | 17,68 | 7,61 | 31,65 | 6,1 |
| 64 | 11,5 | 3,12 | 18,09 | 9,86 | 31,29 | 12,33 | 11,94 | 3,1 | 18,11 | 3,9 | 42,09 | 2,31 |
| 69 | - | - | 18,58 | 3,5 | 25,9 | 4,6 | - | - | 18,61 | 3,55 | 25,91 | 5,3 |
| 71 | - | - | 16,08 | 7,7 | 22,63 | 11,0 | - | - | 16,08 | 7,7 | 24,82 | 8,4 |

Fonte: Autor.

A Figura 73 apresenta o gráfico de estabilização para o método SSI-COV da amostra número 1. É possível identificar dois modos estáveis em relação à frequência natural, amortecimento e forma modal, na cor vermelha. As frequências são maiores que 10 Hz e 30 Hz. Isto é, representam modos de vibração que ocorrem na estrutura.

Figura 73: Diagrama de estabilização - Amostra 1



Fonte: Autor.

As frequências e amortecimentos obtidos com o método *EFDD* para o viaduto V1 são apresentados na Tabela 24. É possível observar que para a primeira frequência natural existem valores ora ligeiramente menores e ora maiores que 12 Hz. Na amostra 69 ainda existe um valor próximo de 19 Hz.

A taxa de amortecimento associada às frequências do primeiro modo possui valores altos, com taxa de amortecimento maior que 2% e, na grande maioria, maior que 2,5%.

A segunda frequência natural identificada indicou valores próximos a 17 Hz, 18 Hz, 24 Hz e 30 Hz. A taxa de amortecimento também apresenta valores altos, porém, existem valores menores que 2%; 2,5% e um valor próximo a 3,5%.

A terceira frequência indicou valores próximos à 30 Hz, 34 Hz e 41 Hz. As taxas de amortecimento referentes ao terceiro modo apresentaram valores de amortecimento menores que 2% e 2,5%. Na amostra 53 foram identificadas apenas três frequências.

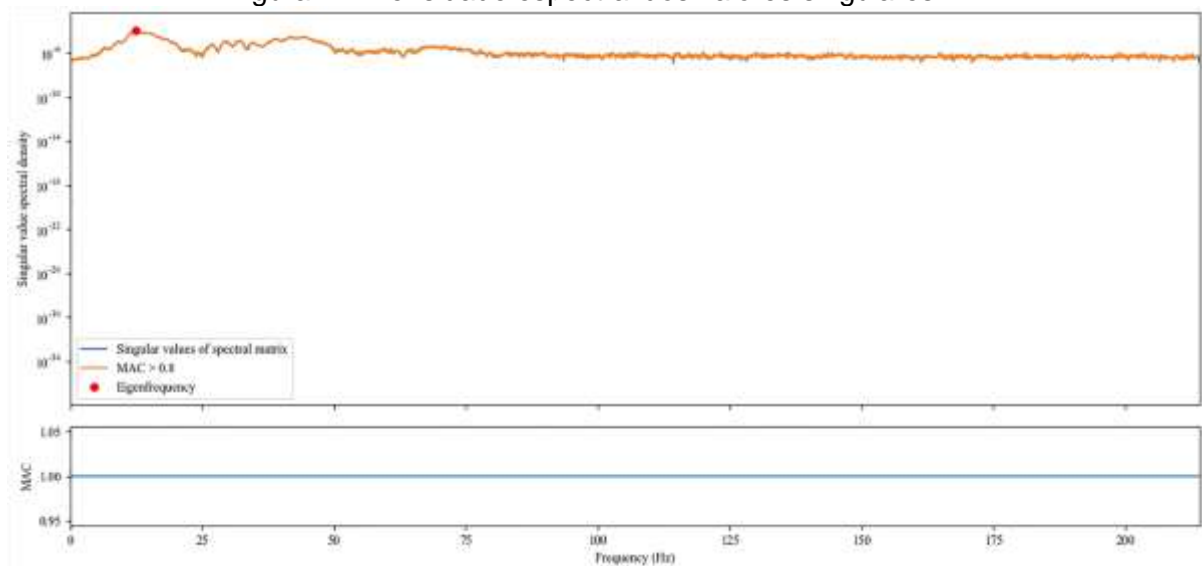
Tabela 24: Resultados *EFDD* - Viaduto V1

| Am. | <i>EFDD</i> | | | | | |
|-----|---------------|-------------|---------------|----------------|---------------|-------------|
| | f_1 (Hz) | ξ_1 (%) | f_2 (Hz) | ξ_2 (%) | f_3 (Hz) | ξ_3 (%) |
| 1 | 10,77 | 3,32 | 16,74 | 3,35 | 33,77 | 1,96 |
| 11 | 12,21 | 3,47 | 16,66 | 2,35 | 30,50 | 0,82 |
| 17 | 12,40 | 4,35 | 31,84 | 1,87 | 41,61 | 2,04 |
| 23 | 12,10 | 2,53 | 18,37 | 3,51 | - | - |
| 29 | 11,88 | 4,82 | 23,98 | 1,69 | - | - |
| 35 | 12,65 | 3,20 | 18,62 | 2,61 | 24,97 | 1,94 |
| 41 | 12,34 | 2,91 | 17,66 | 2,30 | 30,16 | 1,57 |
| 47 | 12,79 | 4,51 | 30,87 | 1,96 | - | - |
| 53 | 12,48 | 3,46 | - | - | - | - |
| 59 | 12,42 | 2,14 | 29,09 | 2,70 | - | - |
| 64 | 11,71 | 3,83 | 21,98 | 2,65 | 31,51 | 1,94 |
| 69 | 19,01 | 3,26 | 23,85 | 2,86 | - | - |
| 71 | 15,68 | 3,66 | 26,03 | 2,52 | 34,11 | 0,59 |

Fonte: Autor.

A Figura 74 apresenta os valores singulares da matriz espectral. É possível os valores singulares da densidade espectral. O trecho onde o MAC é maior que 0,8 é indicado na cor laranja.

Figura 74: Densidade espectral dos valores singulares - V1



Fonte: Autor.

4.5 Viaduto V2

Inspeção visual

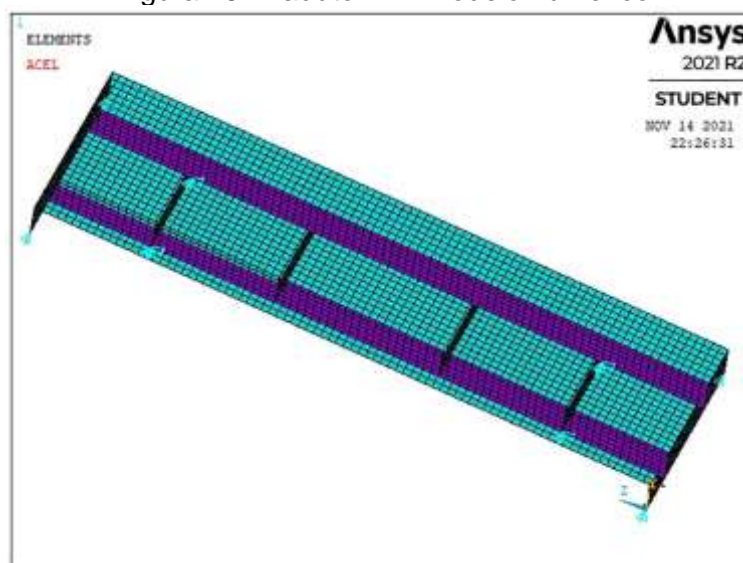
A inspeção visual no viaduto V2 indicou a ocorrência de manchas escuras decorrentes da percolação de água na parte inferior do tabuleiro e que atinge também as longarinas e os aparelhos de apoio. Existem armaduras expostas próximas aos

duto que recolhem à água do tabuleiro e manchas brancas que podem estar associadas às eflorescências. Sob o tabuleiro, próximo a uma das extremidades existem manchas de corrosão. A inspeção do viaduto V2 pode ser verificada no Anexo J – V2: Inspeção visual. A nota final para à estrutura foi igual a 4; a funcional igual a 5 e; a durabilidade igual a 4.

Modelo numérico

A Figura 75 apresenta o modelo numérico junto às vinculações adotadas para V2. O método de análise segue a mesma configuração daquele aplicado em V1 e a matriz de massa consistente foi definida, a qual é indicada devido ao uso do elemento de casca SHELL181 (ANSYS, 2013).

Figura 75: Viaduto V2 - Modelo numérico



Fonte: Autor.

As condições de contorno impostas ao modelo numérico do viaduto V2 são as mesmas impostas a V1: foram impedidos os movimentos de translação nos três eixos nos locais que correspondem à posição dos pilares e; nas transversinas de extremidade foi impedido o movimento de translação no eixo X. Estas restrições são apresentadas na Figura 58 e Figura 59.

A Tabela 25 indica a avaliação da qualidade do elemento a partir de um *aspect ratio* igual a 1. As malhas de 30x30 cm e 15x15 cm não apresentaram erro para um *aspect ratio* igual a 1,1. Assim como em V1, a malha adotada foi igual a 15x15 cm.

Tabela 25: Aspect ratio – V2

| Aspect ratio | Malha (cm) | Contagem de elementos | Elementos com erro | Elementos com erro (%) |
|--------------|------------|-----------------------|--------------------|------------------------|
| 1,0 | 45x45 | 3616 | 3616 | 100,00 |
| | 30x30 | 7273 | 7273 | 100,00 |
| | 15x15 | 27996 | 27520 | 98,30 |

Fonte: Autor.

As frequências naturais e as formas modais obtidas são apresentadas na Tabela 26. Com a adoção da malha de 15x15 cm, o modo de flexão que corresponde ao modo fundamental de pontes é igual a 6,80 Hz. O segundo modo de flexão foi igual a 15,12 Hz. Os modos foram normalizados a partir da matriz de massa.

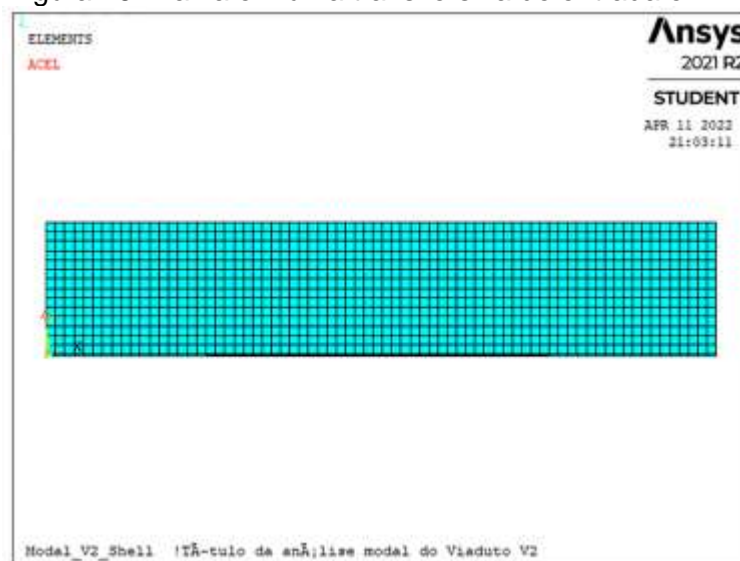
Tabela 26: Viaduto V2 - resultados do modelo numérico

| Tamanho da malha | Forma modal | Frequência natural (Hz) |
|------------------|-------------|-------------------------|
| 45x45 | Torção | 6,64 |
| | Flexão | 6,91 |
| 30x30 | Torção | 12,51 |
| | Torção | 6,63 |
| | Flexão | 6,88 |
| | Torção | 12,43 |
| 15x15 | Torção | 6,59 |
| | Flexão | 6,80 |
| | Torção | 12,27 |

Fonte: Autor

A Figura 76 apresenta a malha aplicada a uma das transversinas de extremidade.

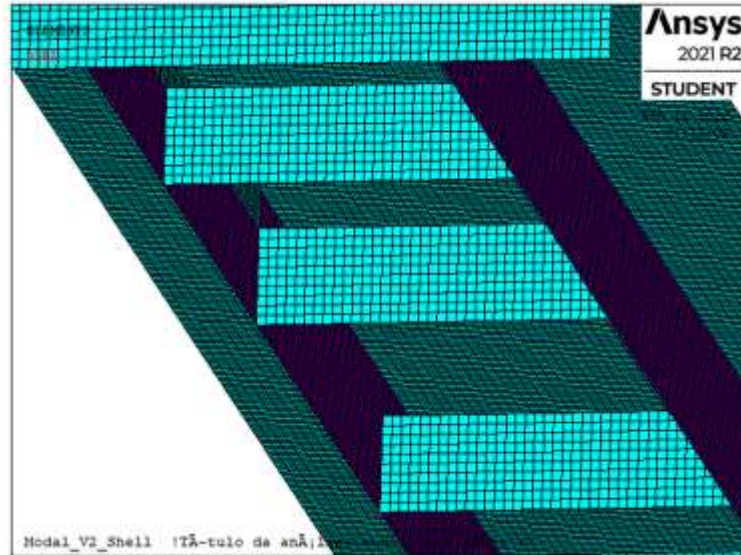
Figura 76: Malha em uma transversina de entrada em V2



Fonte: Autor.

A Figura 77 apresenta a malha em regiões onde as longarinas se conectam às transversinas. As transversinas também não se conectam ao tabuleiro.

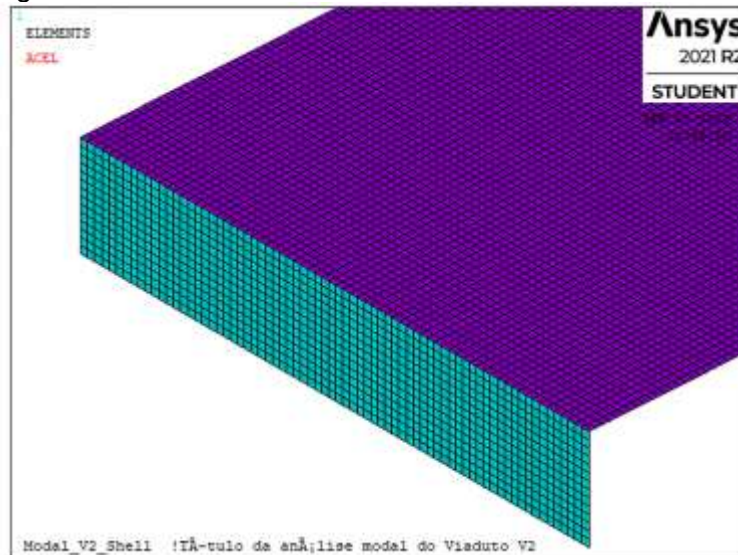
Figura 77: Malha nas regiões de encontro entre longarinas e transversinas em V2



Fonte: Autor.

A Figura 78 apresenta as malhas aplicadas na transversina de extremidade e no tabuleiro.

Figura 78: Malha do tabuleiro e de uma transversina em V2



Fonte: Autor.

Teste de vibração

O ensaio de vibração realizado neste viaduto possuía as mesmas configurações daquele aplicado ao viaduto V1.

O viaduto V2 apresentou características semelhantes em todas as amostras realizadas: a aceleração pico-a-pico menor que $0,15g$, o que caracteriza um DI negativo, ou seja, uma ponte sem danos. Ao utilizar o filtro Butterworth passa-banda, ocorre uma redução na aceleração pico-a-pico e torna o índice DI ainda mais negativo.

O SNR , outro parâmetro definido a partir da relação entre o RMS da amostra natural e o RMS após aplicar o filtro Butterworth passa-banda, apresentou uma atenuação de aproximadamente -20 dB, o que indica a melhoria da qualidade do sinal.

Além disso, os valores do índice V de vibração foram negativos, o que impede a classificação do dano. Assim, nenhum comentário em relação a estas propriedades são realizados na continuidade desta seção.

Nas tabelas onde existem frequências resultantes iguais ao primeiro e segundo modo de flexão não foram apresentadas as médias. A Tabela 27 apresenta os resultados experimentais obtidos para as amostras 75 a 81.

O amortecimento assumiu valores máximo e mínimo de 3,41% e 2,38%. A frequência natural resultou em dois modos de vibração: um com valor maior que 6 Hz e outro próximo a 16 Hz. Estes valores foram comparados com os respectivos valores de frequência natural numérica – 6,80 Hz e 15,12 Hz.

Assim, o índice DI_{freq} apresentou valores positivos que indicam a existência de danos. As amostras 77 e 78 apresentam reduções nas frequências naturais maiores que 5% e indicam à existência de danos.

O valor SNR entre o RMS da resposta resultante após aplicar o filtro Butterworth passa-banda e o RMS após o uso do filtro RDT indicou uma atenuação máxima de -18,13 dB e mínima de -12,17 dB. Isto representa uma melhoria na qualidade do sinal.

Tabela 27: Resultados experimentais obtidos para V2 - Amostras 75 a 81

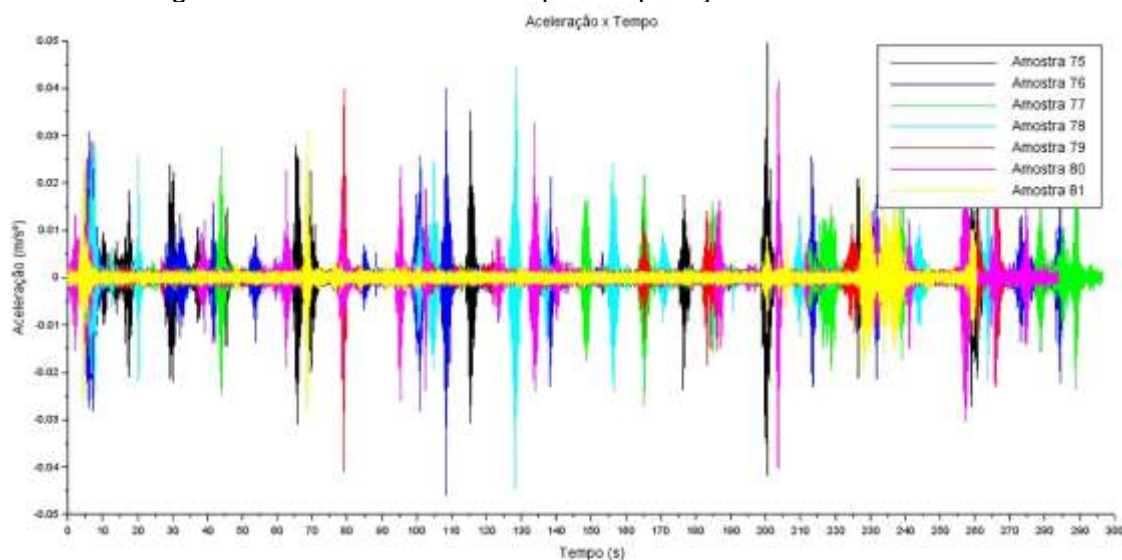
| Data | 28/03/19 | | Local | | L/2 | | | | | |
|------------|-------------------------|-------|---------------------|---------------|-------|--------------|------------------|--------------------|--------|-------------|
| Fase | Am. Nat/ F. Butterworth | | F. Butterworth/ RDT | | | | | | | |
| Am | Ap-a-p (g) | DI | SNR (dB) | Ap-a-p (g) | DI | ξ (%) | ω (Hz) | DI _{freq} | V | SNR (dB) |
| 75 | 0,010 | -4,01 | -20,96 | 0,009 | -4,02 | 3,38 | 6,75 | 0,015 | -57,00 | -12,17 |
| 76 | 0,010 | -4,00 | -21,10 | 0,009 | -4,04 | 3,41 | 6,66 | 0,041 | -58,98 | -12,58 |
| 77 | 0,007 | -4,10 | -21,50 | 0,006 | -4,14 | 3,22 | 6,44 | 0,103 | -69,88 | -18,13 |
| 78 | 0,010 | -4,01 | -21,32 | 0,009 | -4,03 | 2,95 | 6,41 | 0,111 | -58,91 | -15,97 |
| 79 | 0,009 | -4,04 | -21,55 | 0,008 | -4,06 | 2,63 | 6,57 | 0,067 | -61,39 | -12,59 |
| 80 | 0,009 | -4,03 | -21,01 | 0,008 | -4,05 | 2,80 | 6,54 | 0,075 | -61,30 | -15,20 |
| 81 | 0,006 | -4,11 | -21,47 | 0,006 | -4,13 | 2,38 | 16,40 | -0,176 | -39,95 | -12,49 |
| \bar{x} | | | | | | - | - | | | |
| σ | | | | | | - | - | | | |
| σ^2 | | | | | | - | - | | | |

Onde: Am.= amostra; Am. Nat.= amostra natural; F. Butterworth = Filtro Butterworth; Ap-a-p=Aceleração de pico-a-pico; DI=índice de dano de aceleração pico-a-pico; SNR= coeficiente sinal-ruído; ξ =amortecimento; ω =frequência natural; DI_{freq}=índice de dano que considera a variação da frequência natural; V=índice de vibração; \bar{x} = média; σ = desvio padrão; σ^2 = variância

Fonte: Autor.

A Figura 79 apresenta as amostras 75 a 81 no domínio do tempo após a aplicação o filtro Butterworth.

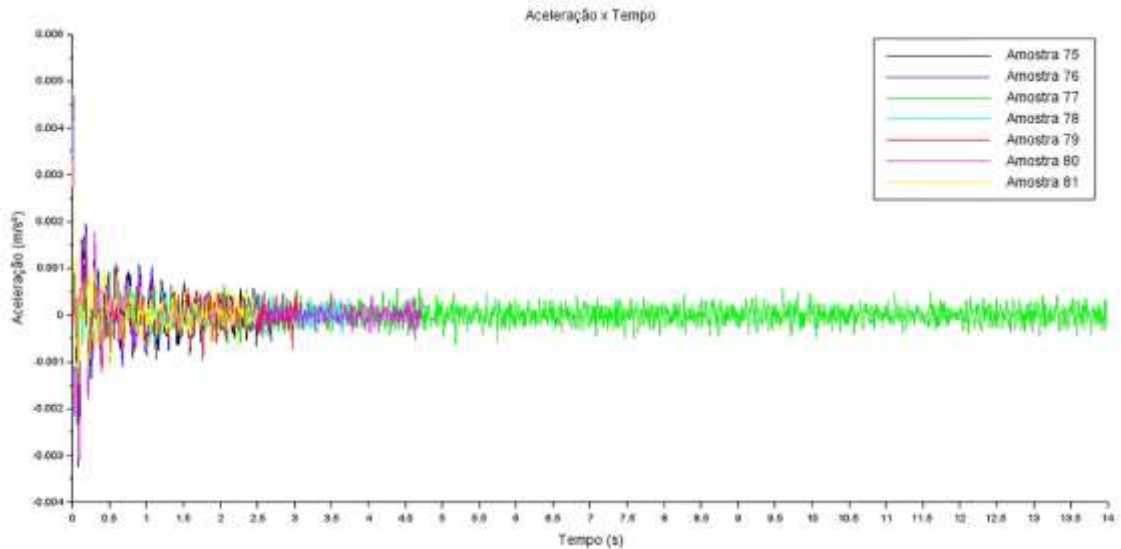
Figura 79: Amostras 75 a 81 após a aplicação do filtro Butterworth



Fonte: Autor.

O RDT resultante das amostras 75 a 81 é apresentado na Figura 80. É possível verificar o comportamento de decaimento logarítmico, porém, os picos de aceleração não apresentam boa definição.

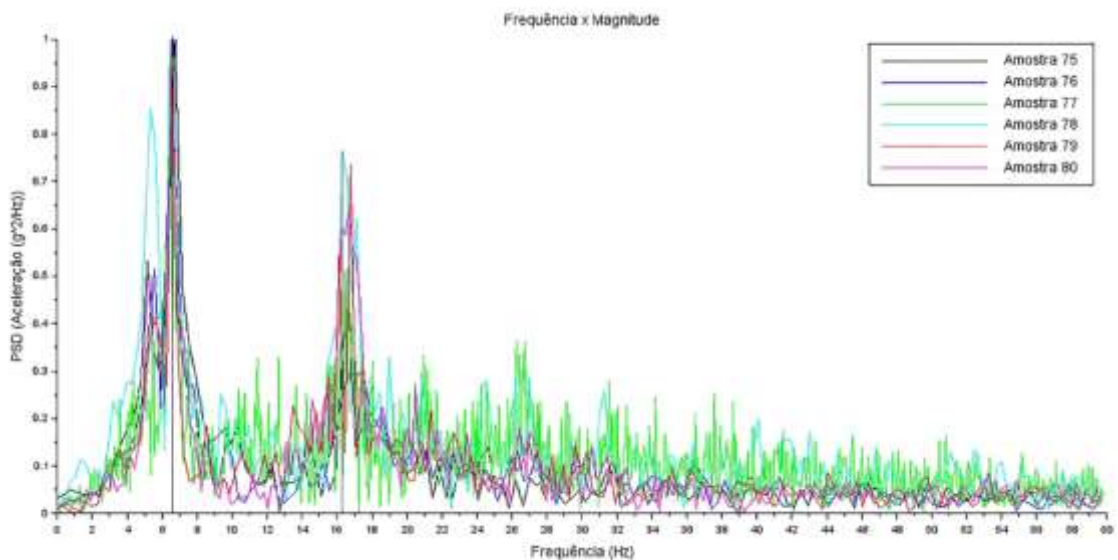
Figura 80: *RDT* resultante - amostras 75 a 81



Fonte: Autor.

A Figura 81 apresenta a *FFT* resultante das amostras 75 a 81. É possível observar dois picos de frequências naturais: um ligeiramente maior que 6 Hz, com maior energia e; um segundo pico ligeiramente maior que 16 Hz com menor energia.

Figura 81: *FFT* resultante – amostras 75 a 81



Fonte: Autor.

A Tabela 28 apresenta os resultados experimentais das amostras 82 a 87. A taxa de amortecimento máximo foi de 4,34% e a mínima de 2,45%.

A frequência natural possui dois modos dominantes com valores próximos a 6 Hz e 16 Hz.

O índice DI_{freq} apresentou ora valores positivos e ora negativos. As amostras 83 e 86 apresentaram reduções de frequências naturais maiores que 5%, o que representa à presença de danos.

O valor SNR indicou um valor máximo de atenuação de -16,45 dB e mínimo de -13,66 dB.

Tabela 28: Resultados experimentais obtidos para V2 - Amostras 82 a 87

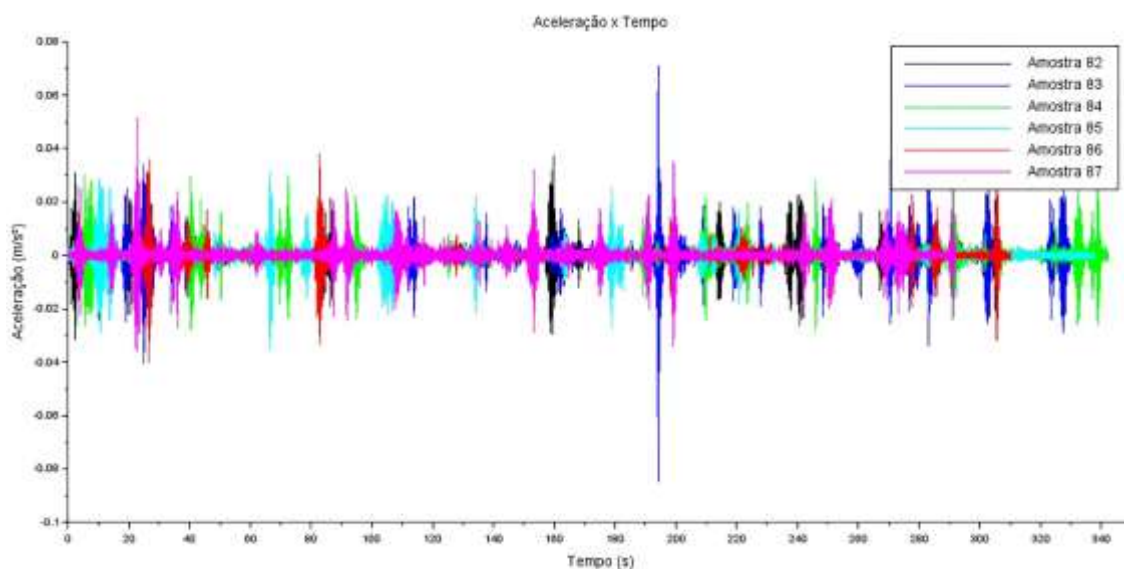
| Data | 11/04/19 | | Local | L/2 | | F. Butterworth/ RDT | | | | |
|------------|-------------|-------|-------------|--------|---------------------|---------------------|----------|-------------|--------|--------|
| Fase | Am. Nat/ F. | | Butterworth | | F. Butterworth/ RDT | | | | | |
| Am | Ap-a-p | DI | SNR | Ap-a-p | DI | ξ | ω | DI_{freq} | V | SNR |
| | (g) | | (dB) | (g) | | (%) | (Hz) | | | (dB) |
| 82 | 0,010 | -4,01 | -22,31 | 0,007 | -4,09 | 3,19 | 16,40 | -0,176 | -37,09 | -14,39 |
| 83 | 0,017 | -3,79 | -21,48 | 0,016 | -3,82 | 3,05 | 6,30 | 0,142 | -50,19 | -15,49 |
| 84 | 0,009 | -4,04 | -21,72 | 0,006 | -4,13 | 4,34 | 16,06 | -0,128 | -40,56 | -16,45 |
| 85 | 0,009 | -4,04 | -22,07 | 0,007 | -4,10 | 2,45 | 16,23 | -0,152 | -40,14 | -15,22 |
| 86 | 0,011 | -3,96 | -22,10 | 0,008 | -4,07 | 3,24 | 6,44 | 0,103 | -64,17 | -13,66 |
| 87 | 0,013 | -3,92 | -22,28 | 0,009 | -4,04 | 2,75 | 6,58 | 0,064 | -57,35 | -15,60 |
| \bar{x} | | | | | | - | - | | | |
| σ | | | | | | - | - | | | |
| σ^2 | | | | | | - | - | | | |

Onde: Am.= amostra; Am. Nat.= amostra natural; F. Butterworth = Filtro Butterworth; Ap-a-p=Aceleração de pico-a-pico; DI=índice de dano de aceleração pico-a-pico; SNR= coeficiente sinal-ruído; ξ =amortecimento; ω =frequência natural; DI_{freq} =índice de dano que considera a variação da frequência natural; V=índice de vibração; \bar{x} = média; σ = desvio padrão; σ^2 = variância

Fonte: Autor.

A Figura 82 apresenta as amostras 82 a 87 em domínio do tempo após a aplicação do filtro Butterworth.

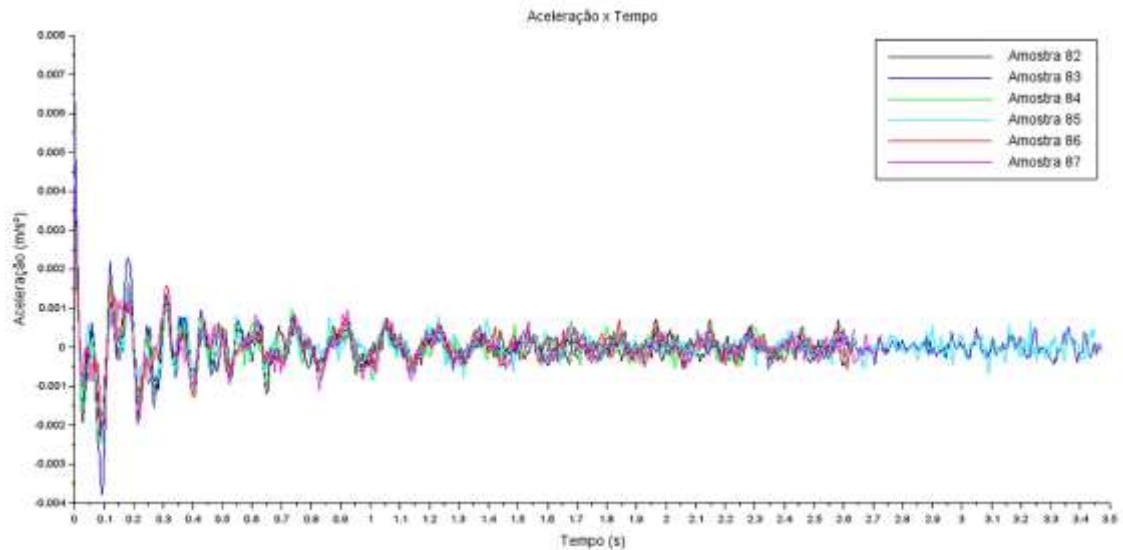
Figura 82: Amostras 82 a 87 após a aplicação do filtro Butterworth



Fonte: Autor.

A Figura 83 apresenta o *RDT* resultante das amostras 82 a 87. É possível observar que o decaimento não ocorre de maneira contínua e, assim, alguns picos de aceleração apresentam valores menores que aqueles que os sucedem.

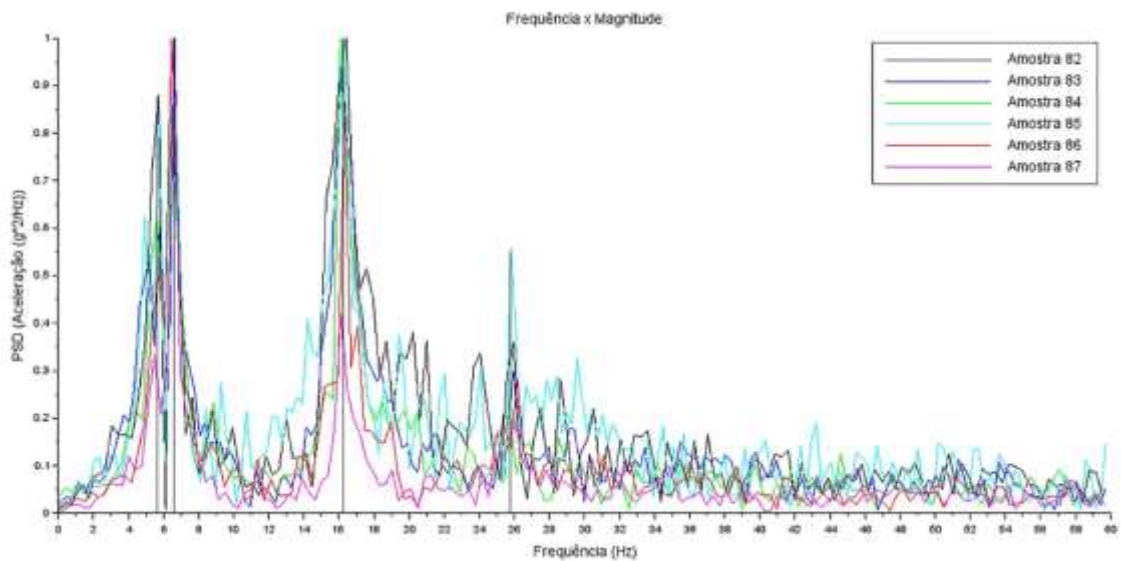
Figura 83: *RDT* resultante - amostras 82 a 87



Fonte: Autor.

A Figura 84 apresenta a *FFT* resultante das amostras 82 a 87. É possível observar a ocorrência de quatro picos de frequência natural: um maior que 5 Hz; um ligeiramente maior que 6 Hz; um ligeiramente maior que 16 Hz e; um maior que 25 Hz.

Figura 84: *FFT* resultante - amostras 82 a 87



Fonte: Autor.

A Tabela 29 apresenta os resultados experimentais das amostras 88 a 94. Entre os resultados, é possível observar que o amortecimento máximo foi de 3,48% e o mínimo de 1,82%.

A frequência natural obteve três modos de vibração diferentes: próximos a 5 Hz; 6 Hz e; 17 Hz. Os picos de frequências naturais próximos a 5 Hz e 6 Hz foram comparados ao primeiro modo de flexão vertical obtido no modelo numérico. O valor próximo a 16 Hz foi comparado ao segundo modo de flexão vertical.

O índice DI_{freq} indicou valores positivos e negativos e indicam a existência de danos. As amostras 91, 92 e 93 apresentaram reduções de frequências naturais maiores que 5% e indicam a presença de danos.

O valor SBR após aplicar o filtro *RDT* indicou uma atenuação máxima de -17,07 dB e mínima de -11,46 dB, o que indica uma melhoria na qualidade do sinal.

Tabela 29: Resultados experimentais obtidos para V2 - Amostras 88 a 94

| Data | 02/05/19 | | Local | L/2 | F. Butterworth/ RDT | | | DI_{freq} | V | SNR (dB) |
|------------|-------------------------|-------|---------------------|------------|---------------------|-----------|---------------|-------------|--------|----------|
| Fase | Am. Nat/ F. Butterworth | | F. Butterworth/ RDT | | | | | | | |
| Am | Ap-a-p (g) | DI | SNR (dB) | Ap-a-p (g) | DI | ξ (%) | ω (Hz) | | | |
| 88 | 0,008 | -4,06 | -22,30 | 0,006 | -4,12 | 2,63 | 6,67 | 0,038 | -69,93 | -13,83 |
| 89 | 0,007 | -4,09 | -22,21 | 0,006 | -4,12 | 3,44 | 17,55 | -0,347 | -39,58 | -15,73 |
| 90 | 0,011 | -3,99 | -21,07 | 0,010 | -4,02 | 1,91 | 6,60 | 0,058 | -57,41 | -16,12 |
| 91 | 0,007 | -4,10 | -21,94 | 0,006 | -4,12 | 1,82 | 5,71 | 0,295 | -75,61 | -15,16 |
| 92 | 0,008 | -4,08 | -21,67 | 0,006 | -4,11 | 2,30 | 6,43 | 0,106 | -65,41 | -17,07 |
| 93 | 0,009 | -4,04 | -21,53 | 0,008 | -4,08 | 3,48 | 5,46 | 0,355 | -70,42 | -14,56 |
| 94 | 0,005 | -4,17 | -21,55 | 0,004 | -4,18 | 1,91 | 17,35 | -0,317 | -46,01 | -11,46 |
| \bar{x} | | | | | | - | - | | | |
| σ | | | | | | - | - | | | |
| σ^2 | | | | | | - | - | | | |

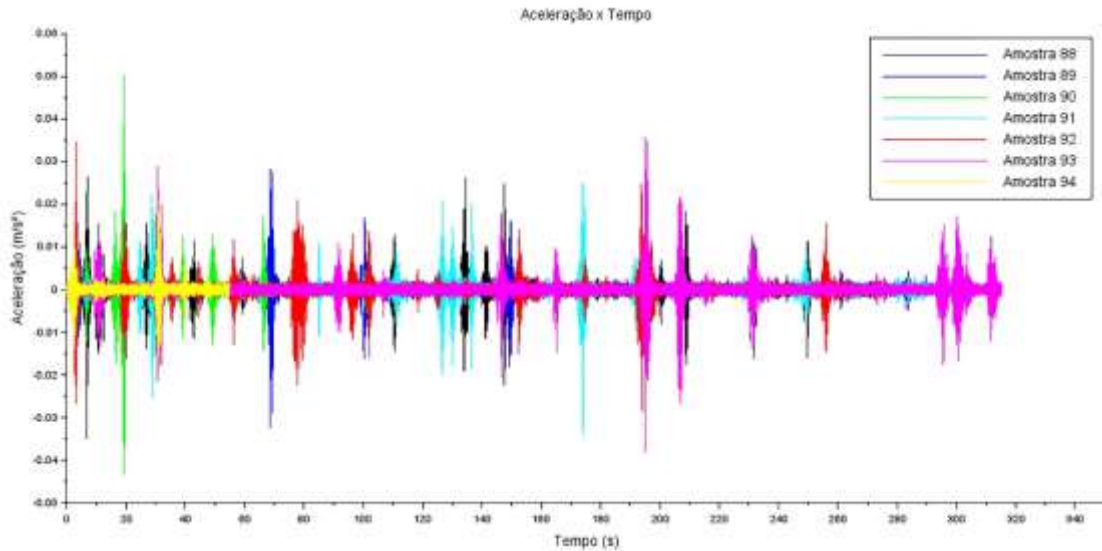
Onde: Am.= amostra; Am. Nat.= amostra natural; F. Butterworth = Filtro Butterworth; Ap-a-p=Aceleração de pico-a-pico; DI=índice de dano de aceleração pico-a-pico; SNR= coeficiente sinal-ruído; ξ =amortecimento; ω =frequência natural; DI_{freq} =índice de dano que considera a variação da frequência natural; V=índice de vibração; \bar{x} = média; σ = desvio padrão; σ^2 = variância

Fonte: Autor.

A Figura 85

Figura 85 apresenta as amostras 88 a 94 em domínio do tempo após a aplicação do filtro Butterworth.

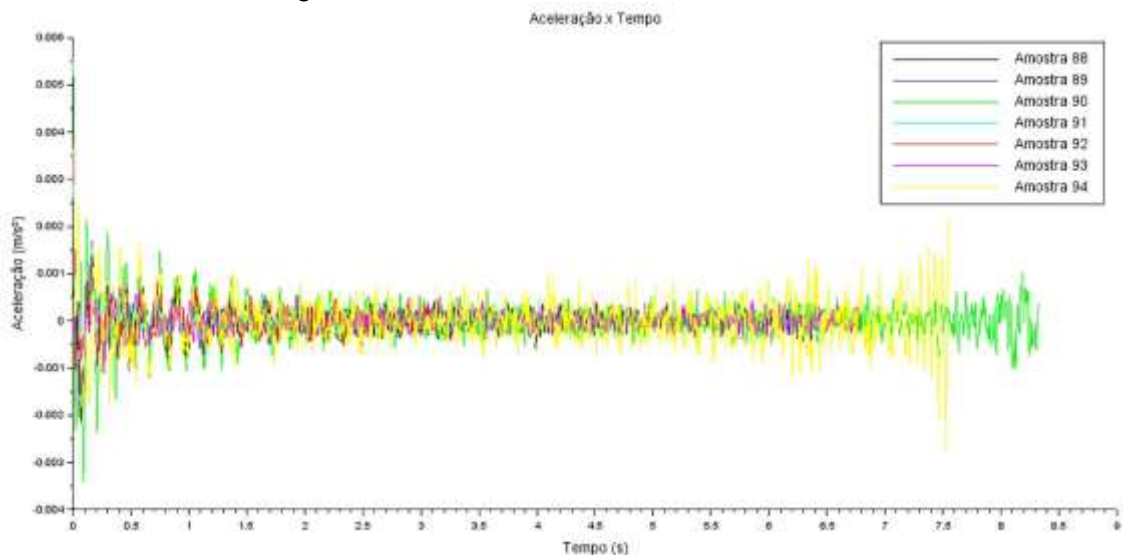
Figura 85: Amostras 88 a 94 após a aplicação do filtro Butterworth



Fonte: Autor.

A Figura 86 apresenta o *RDT* resultante das amostras 88 a 94.

Figura 86: *RDT* resultante - amostras 88 a 94

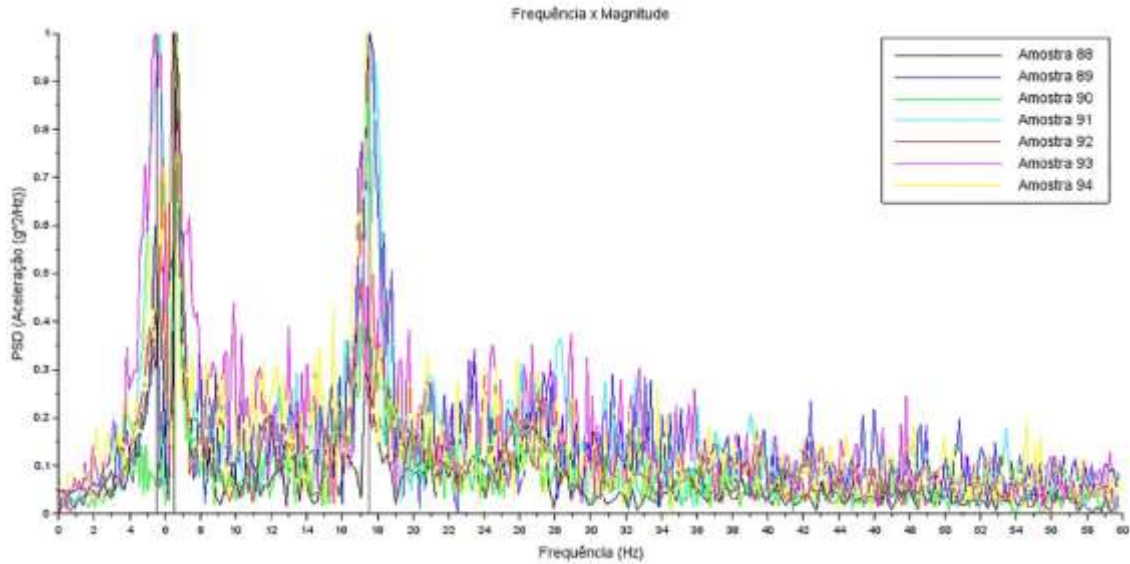


Fonte: Autor.

A Figura 87

Figura 87 apresenta a *FFT* resultante das amostras 88 a 94. A análise da *FFT* indicou a existência de três modos: dois maiores que 5 Hz e 6 Hz e; um terceiro maior que 17 Hz. Os resultados obtidos para o viaduto V2 para o restante das amostras podem ser visualizados no Anexo F – V2: Resultados experimentais.

Figura 87: *FFT* resultante - amostras 88 a 94



A Tabela 30 apresenta as respostas experimentais obtidas para as amostras 141 a 146 extraídas em L/3.

O amortecimento apresentou valores máximo e mínimo de 3,53% e 2,39%, respectivamente.

Para as frequências naturais foram identificados diferentes valores: um ligeiramente maior que 6 Hz; um maior que 13 Hz e; um ligeiramente maior que 14 Hz.

O índice DI_{freq} apresentou valores positivos, o que representa a existência de danos. As amostras 141, 143 e 145 apresentaram reduções maiores que 5% ao serem comparados com o segundo modo de flexão numérico e indicam a presença de danos.

O SNR após aplicar o RDT indicou a ocorrência de atenuações máxima e mínima de -17,99 dB e -14,36 dB, o que representa a melhoria na qualidade da amostra.

Tabela 30: Resultados experimentais obtidos para V2 - Amostras 141 a 146

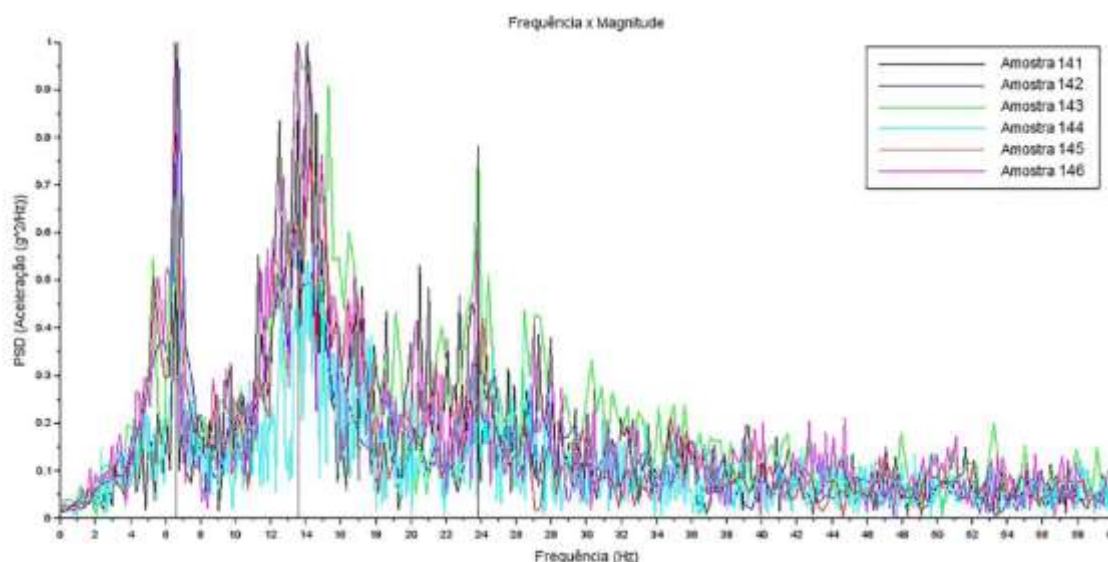
| Data | 17/08/21 | | Local | | L/3 | | | | | | |
|------------|-------------------------|-------|---------------------|---------------|-------|--------------|------------------|--------------------|--------|-------------|--|
| Fase | Am. Nat/ F. Butterworth | | F. Butterworth/ RDT | | | | | | | | |
| Am | Ap-a-p (g) | DI | SNR (dB) | Ap-a-p (g) | DI | ξ (%) | ω (Hz) | DI _{freq} | V | SNR (dB) | |
| 141 | 0,008 | -4,05 | -21,41 | 0,007 | -4,10 | 3,53 | 14,06 | 0,135 | -45,44 | -15,60 | |
| 142 | 0,008 | -4,06 | -21,37 | 0,006 | -4,11 | 3,30 | 6,71 | 0,026 | -66,85 | -14,36 | |
| 143 | 0,006 | -4,12 | -21,69 | 0,005 | -4,15 | 3,37 | 13,52 | 0,200 | -52,99 | -15,93 | |
| 144 | 0,006 | -4,14 | -21,58 | 0,005 | -4,17 | 2,39 | 6,55 | 0,072 | -74,80 | -16,92 | |
| 145 | 0,008 | -4,06 | -21,26 | 0,007 | -4,09 | 3,45 | 6,54 | 0,075 | -62,92 | -15,00 | |
| 146 | 0,009 | -4,05 | -21,23 | 0,007 | -4,10 | 3,36 | 13,51 | 0,202 | -41,62 | -17,99 | |
| \bar{x} | | | | | | - | - | | | | |
| σ | | | | | | - | - | | | | |
| σ^2 | | | | | | - | - | | | | |

Onde: Am.= amostra; Am. Nat.= amostra natural; F. Butterworth = Filtro Butterworth; Ap-a-p=Aceleração de pico-a-pico; DI=índice de dano de aceleração pico-a-pico; SNR= coeficiente sinal-ruído; ξ =amortecimento; ω =frequência natural; DI_{freq}=índice de dano que considera a variação da frequência natural; V=índice de vibração; \bar{x} = média; σ = desvio padrão; σ^2 = variância

Fonte: Autor.

A Figura 88 apresenta a *FFT* resultante das amostras extraídas a L/3 do viaduto V2. É possível identificar três modos de vibração com frequências próximas a 6 Hz, 14 Hz e 24 Hz.

Figura 88: *FFT* das amostras extraídas em L/3 de V2



Fonte: Autor.

A Tabela 31 apresenta as taxas de amortecimento e frequências naturais obtidas por cada conjunto de medições em V2. As médias se referem apenas aos conjuntos onde um único modo foi identificado, em amostras onde outros modos foram dominantes a média não é apresentada.

Tabela 31: Valores de amortecimento e frequência natural para V2

| Am. | Local | ξ_{med} (%) | ξ_{max} (%) | ξ_{min} (%) | σ | σ^2 | ω_{med} (Hz) | ω_{max} (Hz) | ω_{min} (Hz) | σ | σ^2 |
|-----------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|----------|------------|------------------------|------------------------|------------------------|----------|------------|
| 75 a 81 | L/2 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 82 a 87 | L/2 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 88 a 94 | L/2 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 95 a 100 | L/2 | 3,11 | 3,64 | 2,76 | 0,32 | 0,10 | 6,44 | 6,69 | 5,34 | 0,54 | 0,29 |
| 101 a 106 | L/2 | 2,92 | 3,51 | 2,28 | 0,48 | 0,23 | 6,59 | 6,85 | 5,67 | 0,45 | 0,21 |
| 107 a 112 | L/2 | 3,32 | 4,38 | 2,71 | 0,57 | 0,33 | 6,38 | 6,80 | 5,48 | 0,59 | 0,35 |
| 113 a 118 | L/2 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 119 a 124 | L/2 | 2,65 | 3,05 | 2,13 | 0,35 | 0,12 | 6,69 | 6,91 | 6,59 | 0,12 | 0,02 |
| 125 a 130 | L/2 | 2,54 | 3,37 | 1,99 | 0,53 | 0,28 | 6,58 | 6,77 | 6,40 | 0,13 | 0,02 |
| 131 a 135 | L/2 | 3,27 | 3,68 | 2,73 | 0,35 | 0,12 | 6,58 | 6,63 | 6,50 | 0,05 | 0,002 |
| 136 a 140 | L/2 | 2,95 | 3,78 | 2,48 | 0,49 | 0,24 | 6,55 | 6,57 | 6,49 | 0,05 | 0,003 |
| 141 a 146 | L/3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

Am.=amostras; ξ_{med} =amortecimento médio; ξ_{max} =amortecimento máximo; ξ_{min} =amortecimento mínimo; ω_{med} = média da frequência natural; ω_{max} =valor máximo de frequência natural; ω_{min} =valor de frequência natural mínimo; σ =desvio padrão; σ^2 =variância

Fonte: Autor.

A aplicação do módulo CESSIPY através dos métodos SSI-COV e SSI-DATA apresentou os resultados da Tabela 32. É possível identificar que predominam valores de frequência próximos a 5 Hz, como frequência fundamental. Existem também outros picos de frequência referentes à frequência de 16 Hz.

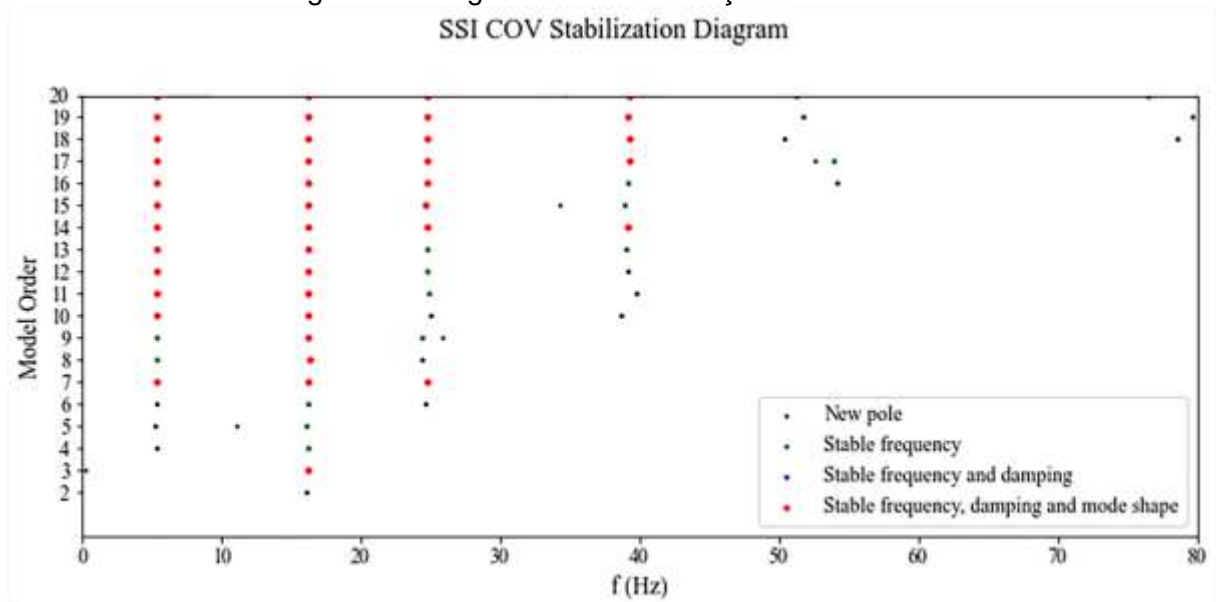
Tabela 32: Resultados SSI-COV e SSI-DATA - Viaduto 2

| Am. | SSI-COV | | | | | | SSI-DATA | | | | | |
|-----|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| | f_1 (Hz) | ξ_1 (%) | f_2 (Hz) | ξ_2 (%) | f_3 (Hz) | ξ_3 (%) | f_1 (Hz) | ξ_1 (%) | f_2 (Hz) | ξ_2 (%) | f_3 (Hz) | ξ_3 (%) |
| 75 | 5,31 | 4,36 | 16,23 | 2,88 | 24,34 | 5,7 | 5,32 | 4,66 | 16,26 | 2,8 | 24,74 | 7,8 |
| 84 | 5,98 | 32,4 | 15,93 | 4,8 | 25,98 | 3,14 | - | - | 16,08 | 5,24 | 26,04 | 3,0 |
| 88 | 5,17 | 5,6 | 17,28 | 2,7 | 25,72 | 12,0 | 5,17 | 5,7 | 17,28 | 2,8 | 25,99 | 5,7 |
| 95 | 5,98 | 1,25 | 17,27 | 3,9 | 24,96 | 6,6 | 6,0 | 9,9 | 17,26 | 3,3 | 24,86 | 7,0 |
| 101 | 4,49 | 10,4 | 17,58 | 6,2 | - | - | - | - | 17,59 | 9,28 | 24,9 | 5,9 |
| 108 | 5,13 | 8,1 | 17,59 | 1,3 | 28,45 | 8,0 | 5,14 | 8,6 | 17,59 | 1,4 | 28,57 | 9,3 |
| 113 | 5,05 | 7,7 | 16,19 | 8,6 | - | - | 5,05 | 7,8 | 16,19 | 8,6 | - | - |
| 121 | 5,81 | 4,56 | 16,65 | 4,09 | 25,8 | 1,9 | 5,83 | 4,3 | 16,67 | 3,89 | - | - |
| 125 | 6,12 | 3,45 | 15,79 | 2,09 | 25,0 | 12,2 | 6,13 | 3,4 | 15,84 | 2,98 | - | - |
| 131 | 5,95 | 9,8 | 15,99 | 6,86 | 24,81 | - | 5,95 | 9,2 | 16,05 | 6,1 | - | - |
| 136 | 5,38 | 4,7 | 16,33 | 1,5 | 25,75 | 6,9 | 5,38 | 4,4 | 16,32 | 1,47 | 25,76 | 6,9 |
| 141 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 142 | 6,11 | 1,84 | 14,8 | 13,5 | 23,49 | 7,03 | 6,32 | 3,97 | - | - | 23,48 | 6,9 |

Fonte: Autor.

A Figura 89 apresenta o diagrama de estabilização do método SSI-COV para a amostra número 75. É possível identificar quatro modos estáveis em relação à frequência, amortecimento e forma modal, na cor vermelha.

Figura 89: Diagrama de estabilização - amostra 75



Fonte: Autor.

As frequências e amortecimentos obtidos com o método *EFDD* para o viaduto V2 são apresentados na Tabela 33. As frequências referentes ao primeiro modo possuem valores próximos a 5 Hz e 6 Hz. As taxas de amortecimento referentes a este modo apresentaram valores maiores que 2,5% e 3,5%.

As frequências naturais referentes ao segundo modo apresentaram valores próximos a 15 Hz, 16 Hz e 17 Hz. As taxas de amortecimento referentes ao segundo modo indicaram apenas um valor maior que 3,5%, três valores maiores que 2,5% e sete valores maiores que 2,5%.

A terceira frequência natural identificada possui valores próximos a 25 Hz, 26 Hz e 27 Hz. O amortecimento é maior que 2,5% em três amostras e maiores que 2% em apenas uma amostra. Ainda é possível verificar que algumas taxas de amortecimento não foram identificadas.

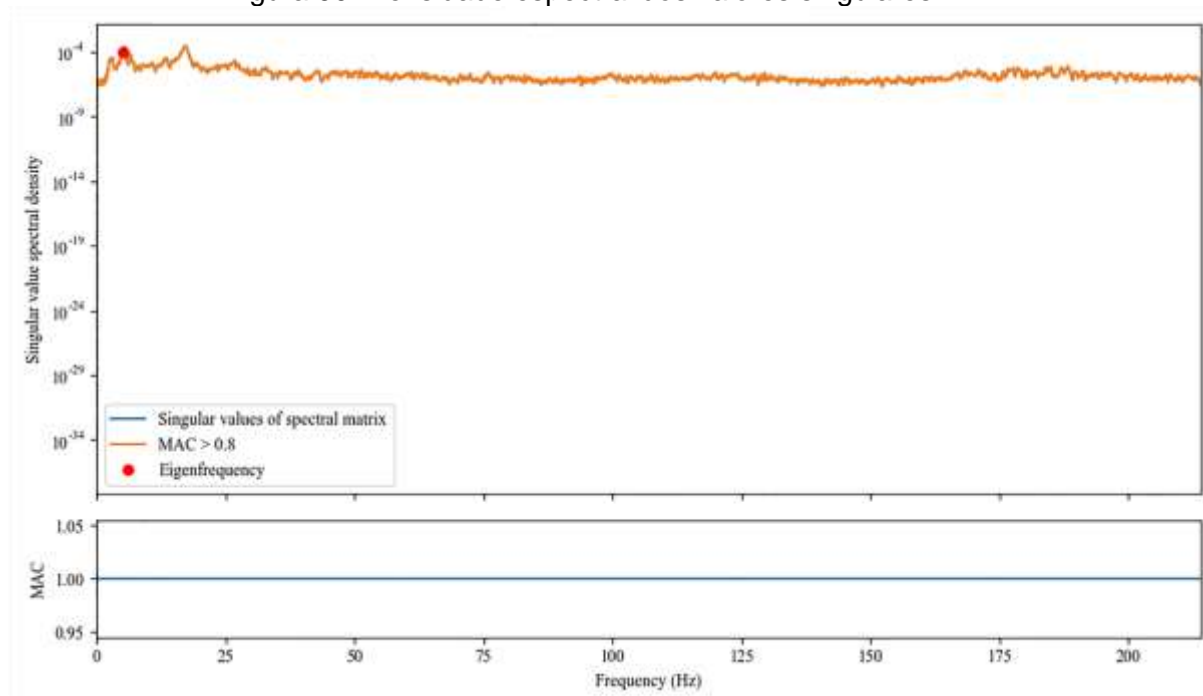
Tabela 33 : Resultados *EFDD* - Viaduto V2

| Am. | <i>EFDD</i> | | | | | |
|-----|---------------|-------------|---------------|----------------|---------------|-------------|
| | f_1 (Hz) | ξ_1 (%) | f_2 (Hz) | ξ_2 (%) | f_3 (Hz) | ξ_3 (%) |
| 75 | 5,10 | 3,22 | 16,35 | 2,28 | 25,07 | 2,82 |
| 84 | 6,27 | 4,51 | 15,68 | 2,48 | 25,04 | 1,54 |
| 88 | 5,35 | 3,84 | 16,73 | 2,03 | 26,45 | 2,67 |
| 95 | 5,57 | 3,69 | 17,03 | 1,61 | 27,07 | 2,19 |
| 101 | 5,05 | 3,94 | 16,87 | 2,71 | - | - |
| 108 | 6,58 | 2,81 | 17,31 | 1,98 | - | - |
| 113 | 6,69 | 4,32 | 16,46 | 2,02 | - | - |
| 121 | 5,27 | 3,98 | 16,52 | 3,96 | 26,74 | 1,86 |
| 125 | 6,31 | 4,41 | 15,68 | 1,84 | - | - |
| 131 | 6,26 | 4,04 | 16,65 | 2,94 | - | - |
| 136 | 5,38 | 4,86 | 15,81 | 2,38 | 26,12 | 2,60 |
| 141 | 4,25 | 4,12 | 16,43 | 2,56 | 23,44 | 1,84 |
| 142 | 6,26 | 2,54 | 23,26 | 1,23 | - | - |

Fonte: Autor.

A Figura 90 apresenta os valores singulares da matriz espectral. É possível os valores singulares da densidade espectral. O trecho onde o MAC é maior que 0,8 é indicado na cor laranja.

Figura 90: Densidade espectral dos valores singulares – V2



Fonte: Autor.

4.6 Viga T

Modelo analítico

Para o conhecimento do comportamento analítico, a definição das frequências naturais foi realizado a partir da Equação (9). Os valores utilizados foram:

- Inércia $I = 452333,33 \text{ cm}^4$;
- Módulo de elasticidade $E = 28 \text{ GPa}$ – definido através do ensaio de esclerometria apresentado no Anexo D – Viga T: Ensaio de esclerometria;
- Comprimento $L = 4 \text{ m}$;
- Massa linear $\bar{m} = 5,2 \text{ kN/m}$.

Foram determinadas frequências para os modos n de 1 até 4. A Tabela 34 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 34: Frequências naturais analíticas

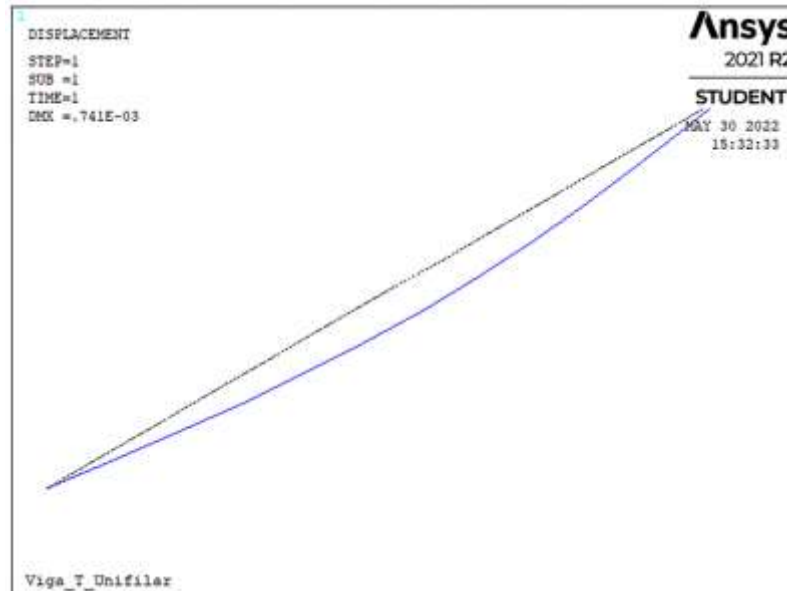
| n | Frequência natural (rad/s) | Frequência natural (Hz) |
|---|----------------------------|-------------------------|
| 1 | 192,54 | 30,64 |
| 2 | 770,15 | 122,57 |
| 3 | 1732,84 | 275,79 |
| 4 | 3080,61 | 490,29 |

Fonte: Autor.

Modelo numérico

Antes da modelagem final, a viga criada com o BEAM189 foi dividida em seis elementos, com carga linear igual a 4,8 kN/m. A malha final aplicada aos modelos numéricos sólido e de casca foi igual a 10 cm, pois forneceu deslocamentos aproximados aqueles obtidos pela viga criada a partir do elemento BEAM189. A Figura 91 apresenta a flecha obtida após a análise estática aplicada a viga com o elemento BEAM189.

Figura 91: Flecha da viga - BEAM189



Fonte: Autor.

A Tabela 35 apresenta a flecha obtida para os três modelos. Para estabelecer as diferenças entre as respostas, a viga criada com o BEAM189 foi utilizada como parâmetro. É possível observar a diferença para os modelos de criados a partir dos elementos SHELL181 e SOLID185 é menor que 5%. Assim, acredita-se que a malha de 10 cm está adequada para a modelagem numérica.

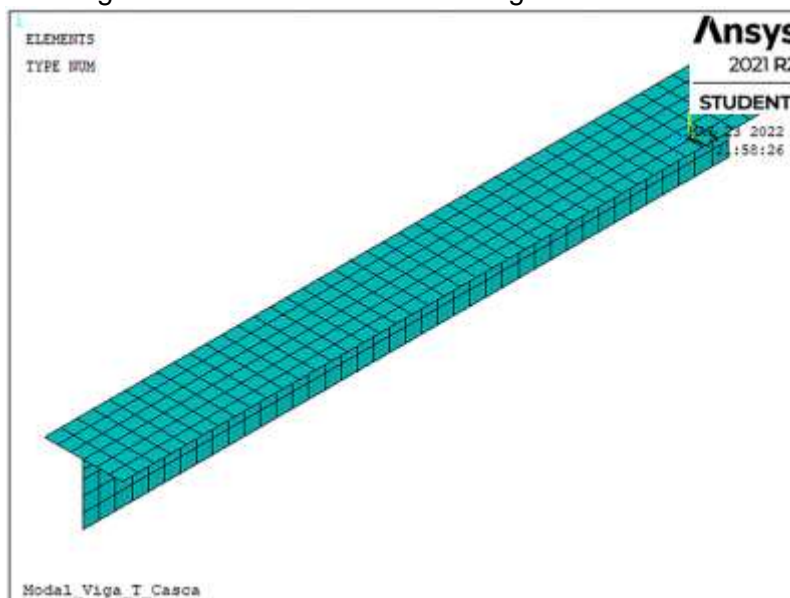
Tabela 35: Flechas obtidas para os modelos criados

| Elemento | Malha (cm) | Deslocamento (mm) | Diferença (%) |
|----------|------------|-------------------|---------------|
| BEAM189 | - | 0,741 | - |
| SHELL181 | 10x10 | 0,779 | 4,88 |
| SOLID185 | 10x10 | 0,755 | 1,85 |

Fonte: Autor.

Para a análise modal, os modelos numéricos em casca e sólido foram adotados um fck igual a 25 MPa e módulo de elasticidade igual a 28. A Figura 92 apresenta o modelo numérico da viga T criado com o elemento SHELL181.

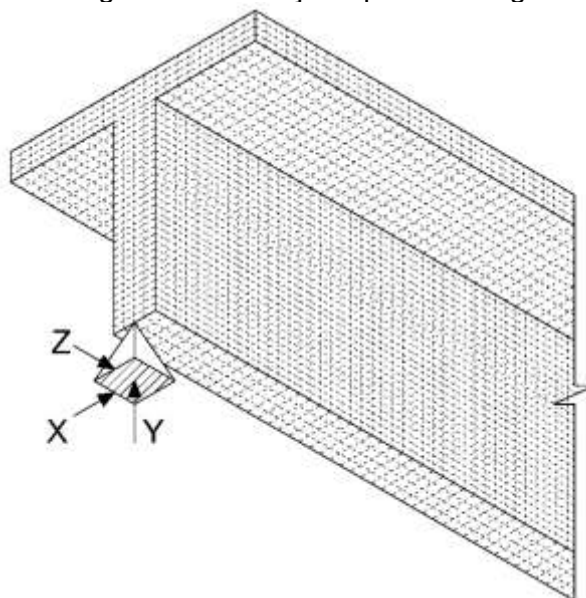
Figura 92: Modelo numérico da viga T – SHELL181



Fonte: Autor.

A Figura 93 apresenta a restrição utilizada nas extremidades da alma. A restrição impede o movimento de translação nos três eixos.

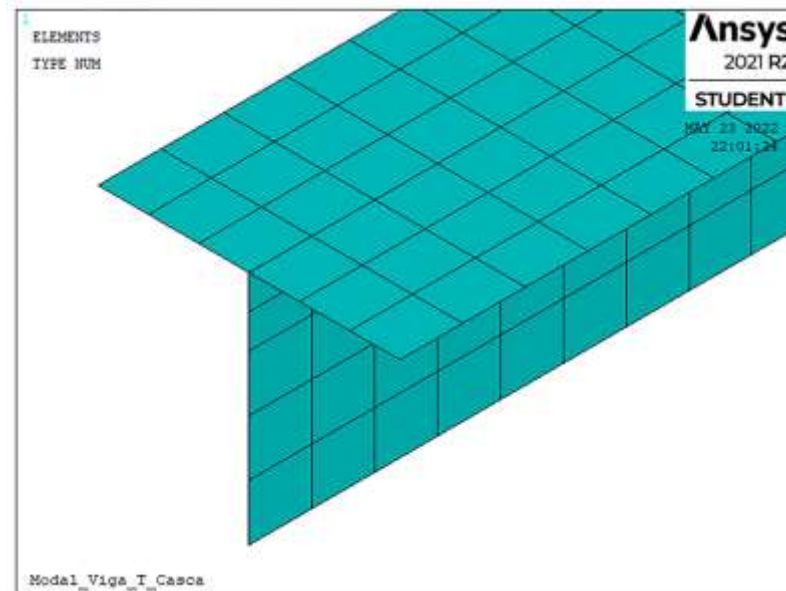
Figura 93: Restrição aplicada à viga



Fonte: Autor.

A Figura 94 apresenta a malha com dimensão de 10 cm aplicada à mesa e a alma do modelo numérico da viga T com elemento de casca.

Figura 94: Malha do modelo de casca da viga T



Fonte: Autor.

Os resultados da análise modal são apresentados na Tabela 36. Podem-se visualizar modos de torção e flexão. Como a metodologia analítica indicou uma frequência natural próxima a 30 Hz junto ao modo fundamental de flexão, acredita-se que o modo número 6, com forma modal de flexão e frequência natural de 33,95 Hz está correto.

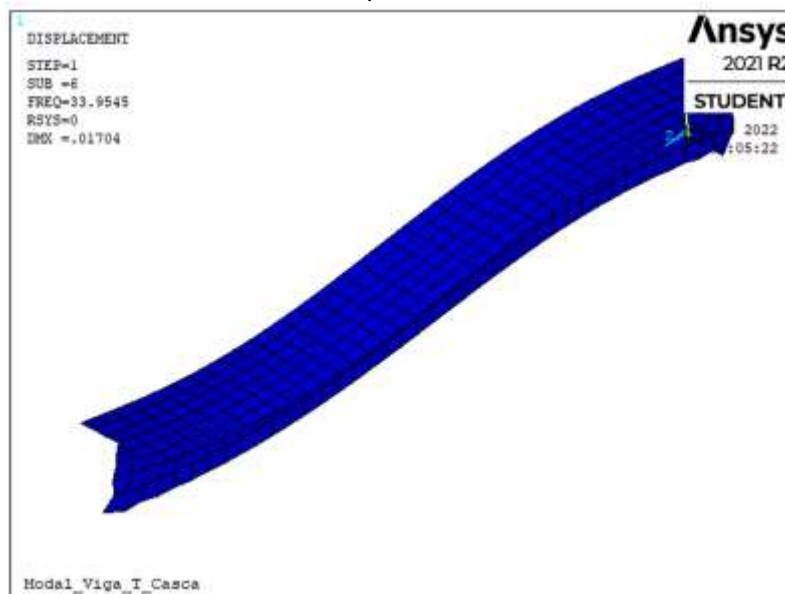
Tabela 36: Resultados numéricos do modelo de casca - Viga T

| Tamanho da malha | Modo | Forma modal | Frequência natural (Hz) |
|------------------|------|-------------|-------------------------|
| 10,00 x 10,00 | 1 | Torção | 6,09 |
| | 2 | Torção | 13,22 |
| | 3 | Torção | 15,99 |
| | 4 | Flexão | 17,86 |
| | 5 | Torção | 31,15 |
| | 6 | Flexão | 33,95 |
| | 7 | Torção | 37,20 |
| | 8 | Torção | 51,16 |
| | 9 | Torção | 63,52 |
| | 10 | Torção | 68,55 |

Fonte: Autor.

A Figura 95 apresenta a forma modal associada à segunda frequência numérica de flexão do sexto modo.

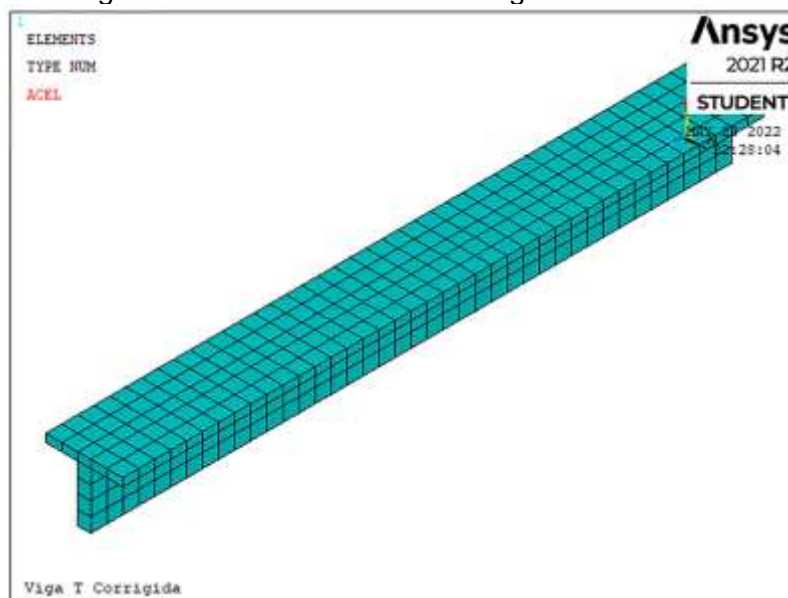
Figura 95: Forma modal associada à frequência numérica de flexão – modelo de casca



Fonte: Autor

O modelo numérico com o elemento SOLID185 foi criado com a mesma configuração de malha. A Figura 96 apresenta a viga T criada com o elemento sólido.

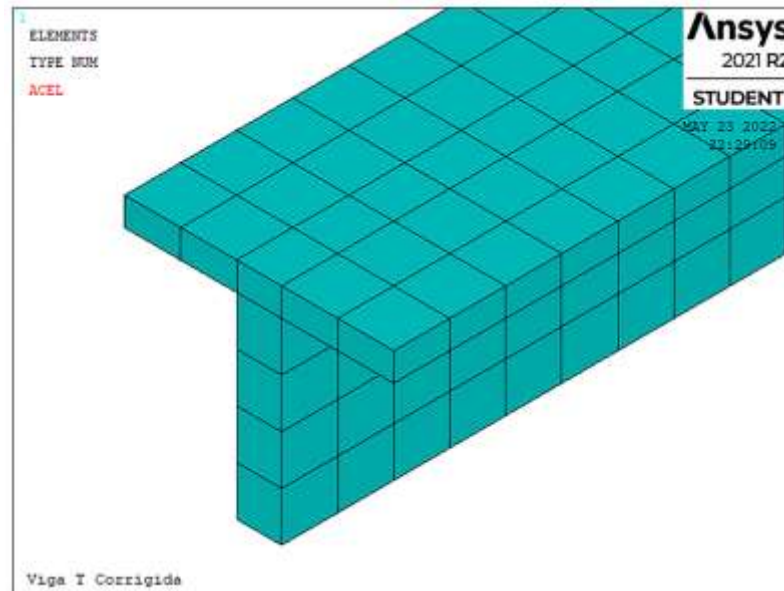
Figura 96: Modelo numérico da viga T – SOLID185



Fonte: Autor.

A Figura 97 apresenta a malha aplicada à mesa e a alma da viga T.

Figura 97: Malha do modelo sólido da viga T



Fonte: Autor.

O modo de flexão identificado se refere ao sexto modo. Vale destacar que as armaduras não foram simuladas. A Tabela 37 apresenta os resultados obtidos para o modelo sólido da viga T. A mesma observação sobre o modo de flexão realizado na representação por casca pode ser considerada para este modelo, com frequência natural de 37,94 Hz.

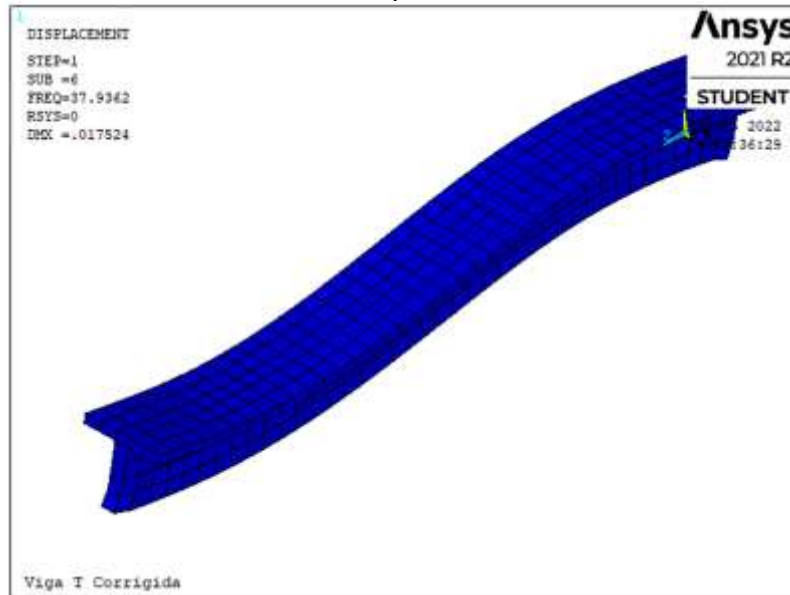
Tabela 37: Resultados numéricos do modelo sólido - Viga T

| Tamanho da malha (cm) | Modo | Forma modal | Frequência natural (Hz) |
|-----------------------|------|-------------|-------------------------|
| 10x10 | 1 | Torção | 6,97 |
| | 2 | Torção | 15,08 |
| | 3 | Torção | 18,19 |
| | 4 | Flexão | 19,43 |
| | 5 | Torção | 34,74 |
| | 6 | Flexão | 37,94 |
| | 7 | Torção | 40,36 |
| | 8 | Torção | 56,51 |
| | 9 | Torção | 74,64 |
| | 10 | Torção | 75,88 |

Fonte: Autor.

A Figura 98 apresenta a forma modal associada a frequência natural de 37,94 Hz.

Figura 98: Forma modal associada à frequência numérica de flexão – modelo sólido



Fonte: Autor.

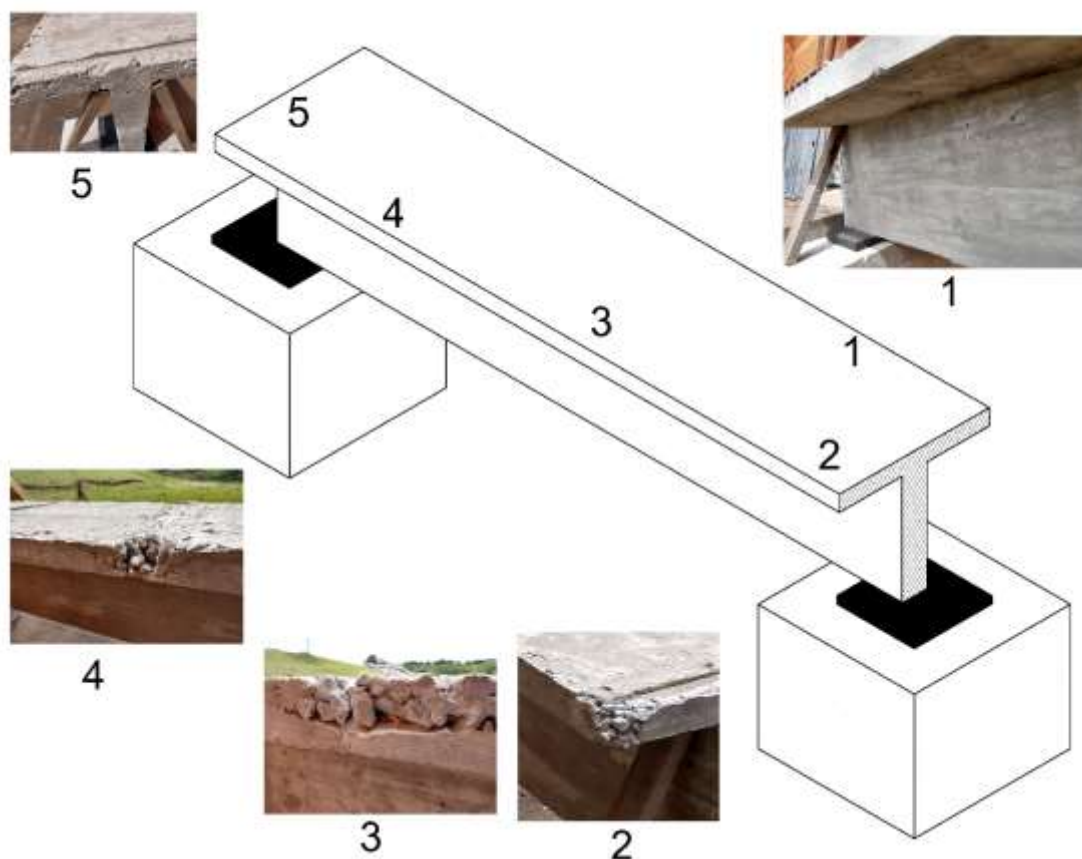
Ensaio preliminar da viga T

Antes da realização do ensaio, uma inspeção visual foi realizada com o objetivo de identificar danos devido à concretagem ou à exposição ao tempo. A concretagem da viga T foi realizada no dia 22/09/2020.

Os ensaios com a viga sem danos ocorreram no dia 29/09/2020. O ensaio final, onde foram inseridos cortes à viga, ocorreu no dia 26/10/2021. Ou seja, a viga permaneceu exposta às condições ambientais por aproximadamente um ano.

A Figura 99 apresenta a localização dos danos na viga T. É possível identificar a quebra do concreto em (1), falhas de concretagem em (2), (3), (4) e a armadura exposta em (5).

Figura 99: Localização dos danos na viga T



Fonte: Autor.

A Tabela 38 apresenta as respostas do ensaio experimental realizado através do aplicativo *iDynamics*, com golpes do martelo de borracha aplicado em L/2. As frequências naturais resultantes apresentam valores próximo a 34 Hz.

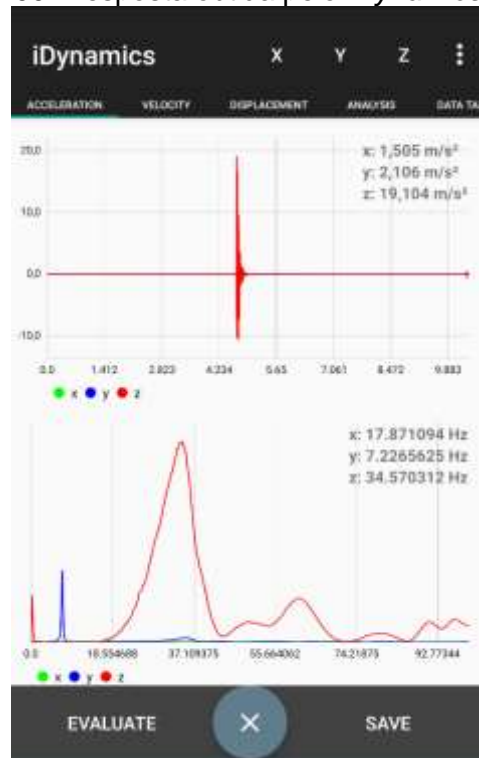
Tabela 38: Respostas obtidas pelo *iDynamics*

| Amostra | Frequência natural (Hz) |
|----------------------|-------------------------|
| <i>iDynamics</i> – 1 | 33,98 |
| <i>iDynamics</i> - 2 | 34,57 |

Fonte: Autor.

Uma das amostras é apresentada na Figura 100, onde é possível visualizar o layout do aplicativo *iDynamics* com gráficos em domínio de tempo e frequência. Além disso, no domínio do tempo observa-se uma resposta de curta duração e alta magnitude referente ao golpe do martelo de borracha. No domínio da frequência são identificados picos de frequência com destaque para aquele referente ao eixo vertical com valor de 34,57 Hz.

Figura 100: Resposta obtida pelo *iDynamics* - Viga T



Fonte: Autor.

Acelerômetro *ST Microelectronics*

O acelerômetro *ST Microelectronics* indicou uma frequência de 31,68 Hz dominante. A Tabela 39 apresenta as frequências experimentais da viga T apenas com os danos de fabricação.

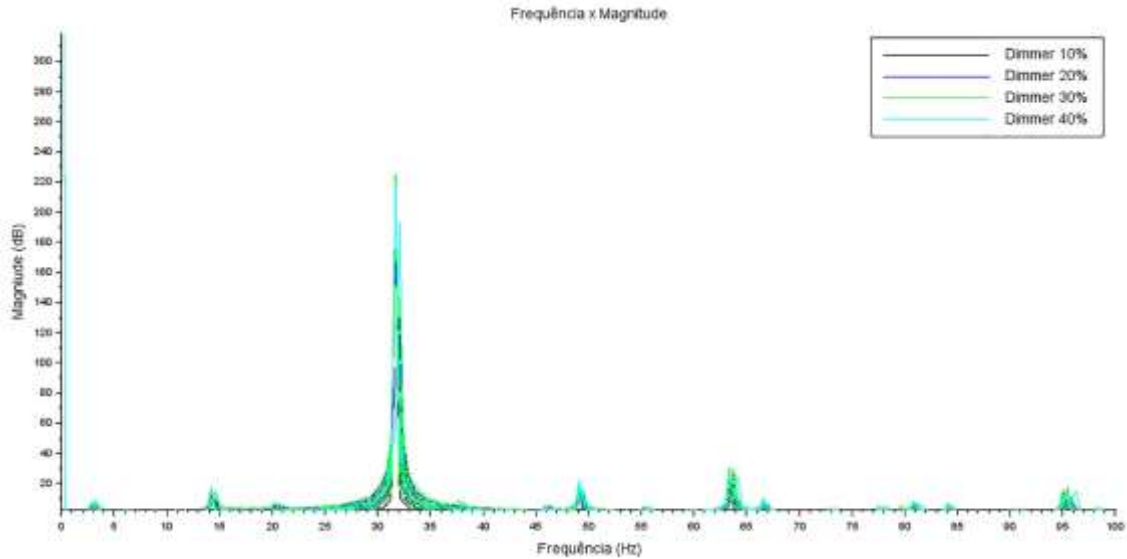
Tabela 39: Resultados experimentais preliminares - Viga T

| Dimmer | Frequência natural (Hz) |
|------------|-------------------------|
| 10% | 31,68 |
| 20% | 31,68 |
| 30% | 31,68 |
| 40% | 32,09 |
| \bar{x} | 31,78 |
| σ | 0,205 |
| σ^2 | 0,042 |

Fonte: Autor.

A Figura 101 representa a *FFT* aplicada aos dados da viga já realizada pelo aplicativo *ST BLE sensor*. É possível visualizar a existência de picos próximos a 15 Hz, 50 Hz, 65 Hz e 95 Hz.

Figura 101: Resultado experimental preliminar - Viga T: *ST Microelectronics*



Fonte: Autor

Para a comparação com as respostas estruturais da viga T, a frequência natural resultante do modelo numérico em casca será utilizada, pois apresenta menor diferença em relação à com origem no modelo sólido.

Aplicativo *Vibration Alarm*

Com o smartphone, através do aplicativo *Vibration Alarm*, os resultados experimentais da viga T apenas com os danos de fabricação são apresentados na Tabela 40. É possível observar uma frequência natural média de 32,53 Hz, com desvio padrão de 0,47 Hz e variância igual a 0,22. O amortecimento médio foi de 0,025%, com desvio padrão de 0,008% e variância de 0,0001. O índice $D_{I_{freq}}$ médio obteve resultado de 0,081, com desvio padrão de 0,028 e variância de 0,001.

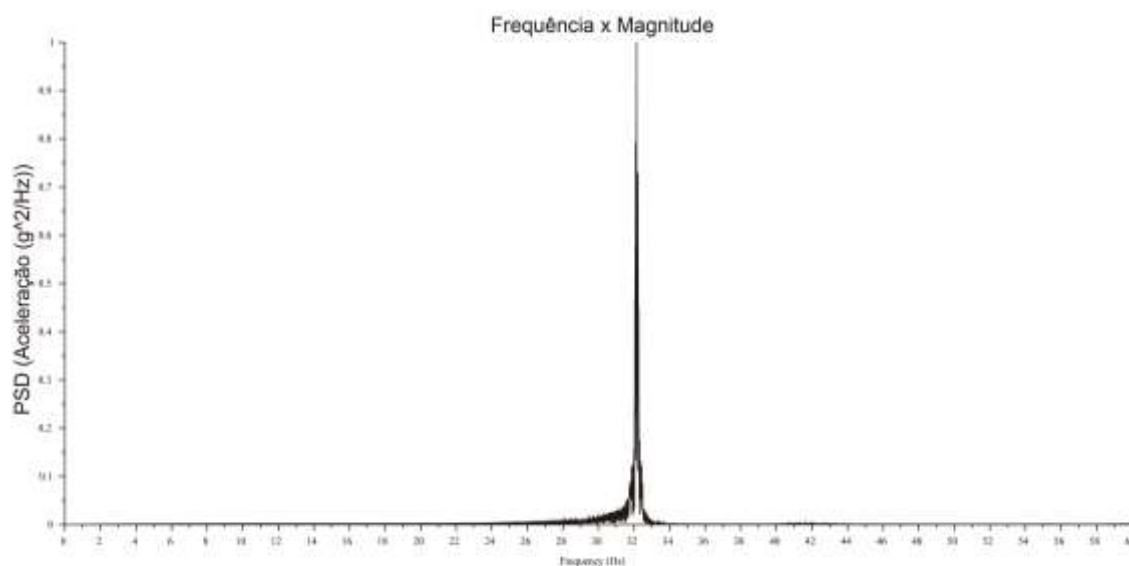
O tempo utilizado foi de dois minutos já que o módulo CESSIPy necessitava de, no mínimo, uma amostra com duração de um minuto.

Tabela 40: Resultados experimentais da viga T – *Vibration Alarm*

| Data | 29/09/21 | | L/3 | | | | | |
|------------|-------------|------|------------|-------|----------------|-----------|--------------------|----------|
| Fase | Am. Natural | | | | F. Butterworth | | | |
| Am | Ap-a-p (g) | DI | Ap-a-p (g) | DI | ω (Hz) | ξ (%) | DI _{freq} | SNR (dB) |
| 147 | 1,39 | 1,20 | 0,917 | 0,81 | 32,02 | 0,026 | 0,110 | -22,24 |
| 148 | 1,25 | 1,08 | 0,848 | 0,75 | 32,14 | 0,027 | 0,103 | -22,30 |
| 149 | 1,23 | 1,07 | 0,905 | 0,80 | 32,14 | 0,026 | 0,103 | -22,32 |
| 150 | 1,20 | 1,04 | 0,851 | 0,75 | 32,41 | 0,037 | 0,088 | -22,35 |
| 151 | 1,31 | 1,14 | 0,925 | 0,81 | 32,00 | 0,037 | 0,111 | -22,34 |
| 152 | 1,56 | 1,34 | 0,986 | 0,86 | 31,97 | 0,011 | 0,113 | -22,39 |
| 153 | 1,22 | 1,06 | 0,826 | 0,73 | 32,82 | 0,014 | 0,065 | -22,33 |
| 154 | 1,25 | 1,09 | 0,835 | 0,74 | 32,80 | 0,030 | 0,066 | -22,32 |
| 155 | 1,30 | 1,13 | 0,858 | 0,76 | 32,34 | 0,037 | 0,092 | -22,43 |
| 156 | 1,48 | 1,28 | 0,963 | 0,84 | 32,62 | 0,021 | 0,076 | -22,43 |
| 157 | 1,31 | 1,13 | 0,847 | 0,75 | 32,51 | 0,023 | 0,082 | -22,40 |
| 158 | 1,18 | 1,03 | 0,824 | 0,73 | 32,80 | 0,016 | 0,066 | -22,38 |
| 159 | 1,31 | 1,13 | 0,913 | 0,80 | 33,23 | 0,023 | 0,041 | -22,49 |
| 160 | 1,30 | 1,12 | 0,880 | 0,78 | 32,53 | 0,025 | 0,021 | -22,38 |
| \bar{x} | | 1,12 | | 0,78 | 32,53 | 0,025 | 0,081 | |
| σ | | 0,09 | | 0,04 | 0,47 | 0,008 | 0,028 | |
| σ^2 | | 0,01 | | 0,002 | 0,22 | 0,0001 | 0,001 | |

Fonte: Autor.

A Figura 102 apresenta a o *FFT* resultante da amostra 149. O pico de frequência se encontra próximo a 32 Hz.

Figura 102: *FFT* resultante - amostra 149

Fonte: Autor.

Acelerômetro *WitMotion*

Os resultados obtidos com o acelerômetro *WitMotion* são apresentados na Tabela 41. É possível observar que a frequência natural média foi de 32,44 Hz, com

desvio padrão de 0,49 Hz e variância de 0,24. O amortecimento médio foi de 0,04%, desvio padrão de 0,016% e variância de 0,0003. O Dl_{freq} obteve um resultado médio de 0,087, com desvio padrão de 0,028 e variância de 0,001.

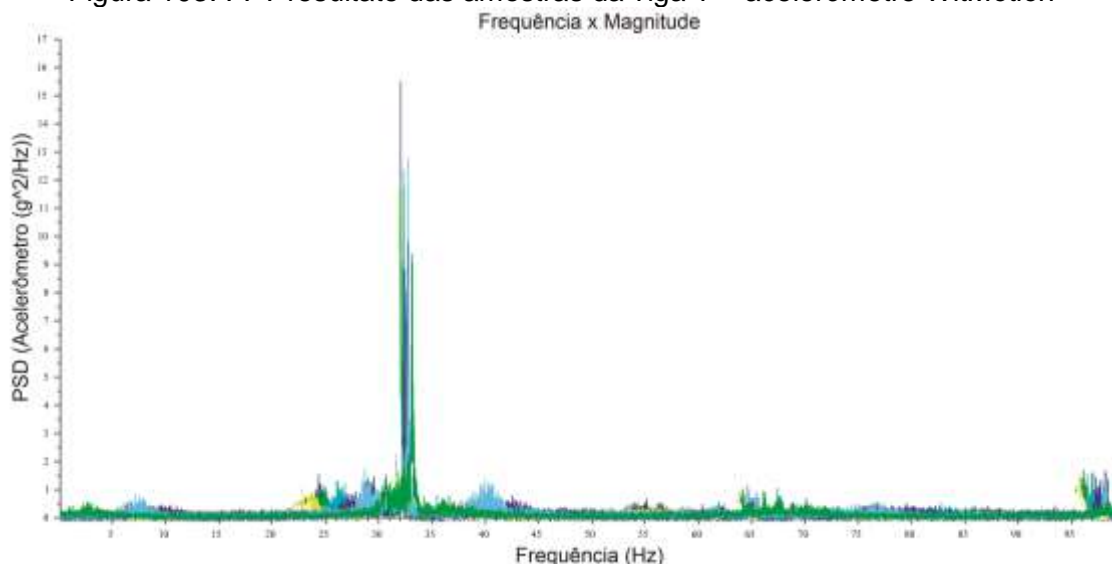
Tabela 41 : Resultados experimentais da viga T - o acelerômetro *WitMotion*

| Data | 29/09/21 | | L/3 | | F. Butterworth | | Dlfreq | SNR (dB) |
|------------|------------------------|-------|------------|------|----------------|-----------|--------|----------|
| Fase Am | Am. Natural Ap-a-p (g) | DI | Ap-a-p (g) | DI | ω (Hz) | ξ (%) | | |
| 161 | 1,334 | 0,55 | 1,034 | 0,44 | 31,91 | 0,086 | 0,117 | -14,42 |
| 162 | 1,409 | 0,58 | 1,071 | 0,45 | 32,06 | 0,030 | 0,108 | -14,06 |
| 163 | 1,418 | 0,58 | 1,124 | 0,47 | 32,06 | 0,043 | 0,108 | -14,13 |
| 164 | 1,416 | 0,58 | 1,118 | 0,47 | 32,29 | 0,028 | 0,095 | -14,01 |
| 165 | 1,435 | 0,59 | 1,102 | 0,46 | 31,92 | 0,054 | 0,116 | -14,08 |
| 166 | 1,480 | 0,61 | 1,051 | 0,44 | 31,89 | 0,027 | 0,118 | -14,03 |
| 167 | 1,426 | 0,59 | 1,052 | 0,44 | 32,79 | 0,049 | 0,067 | -14,35 |
| 168 | 1,402 | 0,58 | 1,099 | 0,46 | 32,73 | 0,040 | 0,071 | -14,09 |
| 169 | 1,506 | 0,62 | 1,101 | 0,46 | 32,26 | 0,053 | 0,097 | -14,07 |
| 170 | 1,628 | 0,66 | 1,199 | 0,50 | 32,54 | 0,027 | 0,081 | -13,71 |
| 171 | 1,599 | 0,65 | 1,260 | 0,52 | 32,43 | 0,037 | 0,087 | -13,69 |
| 172 | 1,581 | 0,65 | 1,286 | 0,53 | 32,72 | 0,043 | 0,071 | -13,91 |
| 173 | 1,568 | 0,64 | 1,272 | 0,53 | 33,10 | 0,027 | 0,049 | -14,79 |
| 174 | 1,525 | 0,63 | 1,108 | 0,47 | 33,51 | 0,052 | 0,026 | -16,05 |
| \bar{x} | | 0,61 | | | 32,44 | 0,04 | 0,087 | |
| σ | | 0,03 | | | 0,49 | 0,016 | 0,028 | |
| σ^2 | | 0,001 | | | 0,24 | 0,0003 | 0,001 | |

Fonte: Autor.

A Figura 103 apresenta a *FFT* da viga T dos dados extraídos com acelerômetro *WitMotion*. As frequências possíveis de identificação estão em uma faixa próxima a 32 Hz.

Figura 103: *FFT* resultate das amostras da viga T – acelerômetro *WitMotion*

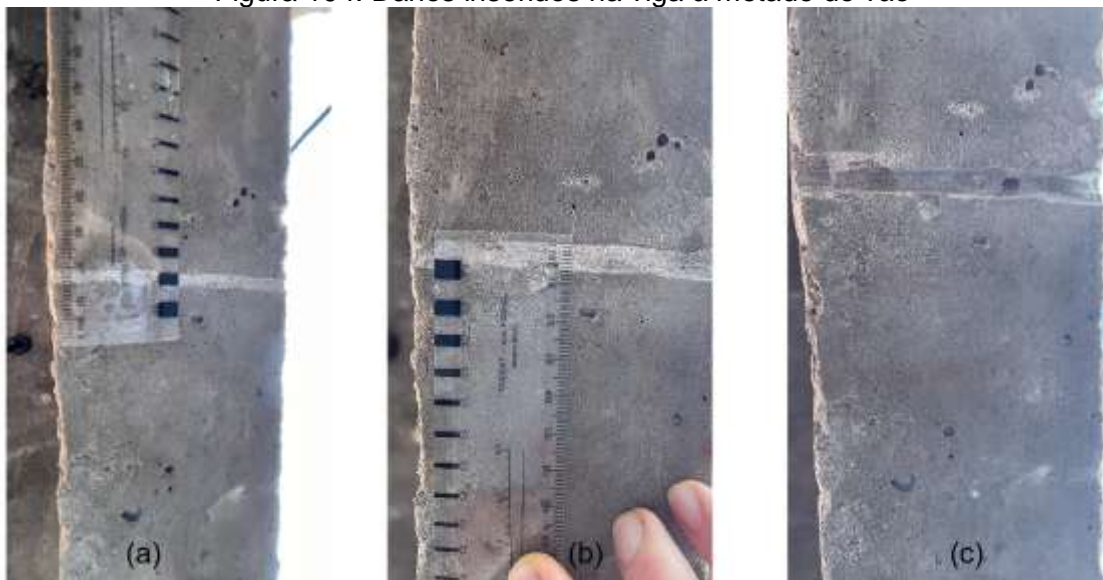


Fonte: Autor.

Ensaio final com danos na viga T

Os danos foram inseridos a partir de cortes no fundo da alma da viga. A Figura 104 apresenta os danos inseridos no fundo da viga, à metade do vão. É possível observar em (a) o corte com profundidade de 2 mm, em (b) o agravamento do corte, agora com 4 mm e em (c) o último nível de dano com 5 mm . Os cortes aparecem na horizontal e apresentam cor acinzentada.

Figura 104: Danos inseridos na viga à metade do vão



Fonte: Autor.

Vibration Alarm

A Tabela 42 apresenta os resultados após efetuar o corte de 2 mm de profundidade na metade do vão. É possível verificar que existe uma queda na frequência natural como é esperado para a ocorrência dos danos. A redução é da ordem de 7,75% em relação à média da frequência natural sem danos – 32,53 Hz.

O amortecimento não apresenta aumento, já o índice DI_{freq} apresenta um aumento médio de 63,01% em relação à condição sem danos para os dados extraídos a partir do uso do aplicativo *Vibration Alarm*.

Tabela 42: L/2 -Resultados após inserir o corte de 2 mm – *Vibration Alarm*

| Data | | L/3 | | | | | | | |
|-----------|------------|-------------|-------|------------|-------|----------------|-----------|--------|----------|
| Motor (%) | Fase Am | Am. Natural | | Ap-a-p | | F. Butterworth | | Dlfreq | SNR (dB) |
| | | Ap-a-p (g) | DI | Ap-a-p (g) | DI | ω (Hz) | ξ (%) | | |
| 10 | 175 | 0,112 | -0,89 | 0,071 | -2,15 | 30,12 | 0,023 | 0,213 | -22,27 |
| 20 | 176 | 0,082 | -1,79 | 0,056 | -2,58 | 30,11 | 0,008 | 0,213 | -22,15 |
| 30 | 177 | 0,081 | -1,82 | 0,057 | -2,56 | 29,79 | 0,024 | 0,230 | -22,48 |
| | \bar{x} | | | | | 30,01 | 0,019 | 0,219 | |
| | σ | | | | | 0,19 | 0,009 | 0,010 | |
| | σ^2 | | | | | 0,04 | 0,0001 | 0,0001 | |

Fonte: Autor.

A Tabela 43 apresenta os resultados após aumentar a profundidade do corte para 4 mm. É possível observar a queda da frequência natural em torno de 7,65% em relação à média da condição sem danos e a variação do amortecimento sem apresentar um aumento do amortecimento médio.

O índice Dl_{freq} apresenta um aumento médio de 62,67% em relação à condição sem danos a partir do uso do aplicativo *Vibration Alarm*.

Tabela 43: L/2 -Resultados após inserir o corte de 4 mm – *Vibration Alarm*

| Data | | L/3 | | | | | | | |
|-----------|------------|-------------|-------|------------|-------|----------------|-----------|--------|----------|
| Motor (%) | Fase Am | Am. Natural | | Ap-a-p | | F. Butterworth | | Dlfreq | SNR (dB) |
| | | Ap-a-p (g) | DI | Ap-a-p (g) | DI | ω (Hz) | ξ (%) | | |
| 10 | 178 | 0,107 | -1,05 | 0,070 | -2,16 | 29,39 | 0,035 | 0,251 | -22,14 |
| 20 | 179 | 0,132 | -0,25 | 0,086 | -1,67 | 30,69 | 0,015 | 0,183 | -22,02 |
| | \bar{x} | | | | | 30,04 | 0,025 | 0,217 | |
| | σ | | | | | 0,92 | 0,014 | 0,048 | |
| | σ^2 | | | | | 0,84 | 0,0002 | 0,002 | |

Fonte: Autor.

A Tabela 44 apresenta os resultados após aumentar a profundidade do corte para 5 mm. É possível observar o mesmo comportamento verificado nos outros cortes: a queda da frequência, a variação do amortecimento e o aumento de Dl_{freq} . Assim, estes comentários não serão mais apresentados antes das tabelas.

Tabela 44: L/2 -Resultados após inserir o corte de 5 mm – *Vibration Alarm*

| Data | | L/3 | | | | | | | |
|-----------|------------|-------------|-------|------------|-------|----------------|-----------|--------|----------|
| Motor (%) | Fase Am | Am. Natural | | Ap-a-p | | F. Butterworth | | Dlfreq | SNR (dB) |
| | | Ap-a-p (g) | DI | Ap-a-p (g) | DI | ω (Hz) | ξ (%) | | |
| 10 | 180 | 0,106 | -1,07 | 0,070 | -2,16 | 29,14 | 0,023 | 0,263 | -22,43 |
| 20 | 181 | 0,121 | -0,61 | 0,079 | -1,89 | 30,65 | 0,014 | 0,185 | -21,95 |
| | \bar{x} | | | | | 29,89 | 0,018 | 0,224 | |
| | σ | | | | | 1,07 | 0,007 | 0,055 | |
| | σ^2 | | | | | 1,14 | 0,00005 | 0,003 | |

Fonte: Autor.

A Tabela 45 apresenta os resultados obtidos com o smartphone a partir da aplicação *Vibration Alarm* ao inserir o corte de 2 mm de profundidade na posição L/3.

Tabela 45: L/3 -Resultados após inserir o corte de 2 mm - *Vibration Alarm*

| Data | | L/3 | | | | | | | |
|-----------|------------|-------------|-------|------------|-------|----------------|-----------|--------|----------|
| Motor (%) | Fase Am | Am. Natural | | Ap-a-p | | F. Butterworth | | Dlfreq | SNR (dB) |
| | | Ap-a-p (g) | DI | Ap-a-p (g) | DI | ω (Hz) | ξ (%) | | |
| 10 | 182 | 0,089 | -1,58 | 0,059 | -2,49 | 28,98 | 0,015 | 0,271 | -22,37 |
| 20 | 183 | 0,110 | -0,94 | 0,074 | -2,06 | 29,94 | 0,011 | 0,222 | -22,03 |
| 30 | 184 | 0,120 | -0,63 | 0,079 | -1,88 | 30,54 | 0,029 | 0,191 | -21,91 |
| | \bar{x} | | | | | 29,82 | 0,018 | 0,228 | |
| | σ | | | | | 0,79 | 0,010 | 0,041 | |
| | σ^2 | | | | | 0,62 | 0,0001 | 0,002 | |

Fonte: Autor.

A Tabela 46 apresenta os resultados obtidos com o smartphone a partir da aplicação *Vibration Alarm* ao aumentar a profundidade do corte para 4 mm em L/3.

Tabela 46: L/3 -Resultados após inserir o corte de 4 mm – *Vibration Alarm*

| Data | | L/3 | | | | | | | |
|-----------|------------|-------------|-------|------------|-------|----------------|-----------|--------|----------|
| Motor (%) | Fase Am | Am. Natural | | Ap-a-p | | F. Butterworth | | Dlfreq | SNR (dB) |
| | | Ap-a-p (g) | DI | Ap-a-p (g) | DI | ω (Hz) | ξ (%) | | |
| 10 | 185 | 0,109 | -0,96 | 0,072 | -2,12 | 30,34 | 0,044 | 0,201 | -21,98 |
| 20 | 186 | 0,116 | -0,77 | 0,076 | -1,98 | 29,97 | 0,010 | 0,221 | -22,01 |
| 30 | 187 | 0,124 | -0,50 | 0,080 | -1,86 | 30,36 | 0,017 | 0,201 | -21,95 |
| | \bar{x} | | | | | 30,22 | 0,024 | 0,208 | |
| | σ | | | | | 0,22 | 0,018 | 0,012 | |
| | σ^2 | | | | | 0,05 | 0,0003 | 0,0001 | |

Fonte: Autor.

A Tabela 47 apresenta os resultados obtidos com o smartphone a partir da aplicação *Vibration Alarm* ao aumentar a profundidade do corte para 5 mm em L/3.

Tabela 47: L/3 -Resultados após inserir o corte de 5 mm – *Vibration Alarm*

| | | Data | 26/10/21 | | L/3 | | | | | |
|-----------|------------|-------------|----------|------------|-------|----------------|-----------|--------|----------|--|
| Motor (%) | Fase Am | Am. Natural | | Ap-a-p (g) | DI | F. Butterworth | | Dlfreq | SNR (dB) | |
| | | Ap-a-p (g) | DI | Ap-a-p (g) | DI | ω (Hz) | ξ (%) | | | |
| 10 | 188 | 0,098 | -1,31 | 0,066 | -2,29 | 29,63 | 0,214 | 0,238 | -22,04 | |
| 20 | 189 | 0,120 | -0,65 | 0,078 | -1,91 | 29,95 | 0,021 | 0,222 | -22,02 | |
| 30 | 190 | 0,126 | -0,46 | 0,081 | -1,83 | 30,63 | 0,013 | 0,186 | -21,94 | |
| | \bar{x} | | | | | 30,07 | 0,083 | 0,215 | | |
| | σ | | | | | 0,51 | 0,113 | 0,027 | | |
| | σ^2 | | | | | 0,26 | 0,0129 | 0,001 | | |

Fonte: Autor.

A Tabela 48 apresenta os resultados obtidos com o smartphone a partir da aplicação *Vibration Alarm* ao inserir o corte de 2 mm em 3L/4.

Tabela 48: 3L/4 - Resultados após inserir o corte de 2 mm – *Vibration Alarm*

| | | Data | 26/10/21 | | L/3 | | | | | |
|-----------|------------|-------------|----------|------------|-------|----------------|-----------|--------|----------|--|
| Motor (%) | Fase Am | Am. Natural | | Ap-a-p (g) | DI | F. Butterworth | | Dlfreq | SNR (dB) | |
| | | Ap-a-p (g) | DI | Ap-a-p (g) | DI | ω (Hz) | ξ (%) | | | |
| 10 | 191 | 0,105 | -1,09 | 0,073 | -2,07 | 29,45 | 0,028 | 0,247 | -22,03 | |
| 20 | 192 | 0,120 | -0,63 | 0,083 | -1,77 | 29,83 | 0,014 | 0,228 | -22,03 | |
| 30 | 193 | 0,125 | -0,50 | 0,084 | -1,74 | 30,41 | 0,021 | 0,198 | -21,96 | |
| | \bar{x} | | | | | 29,89 | 0,021 | 0,224 | | |
| | σ | | | | | 0,48 | 0,007 | 0,025 | | |
| | σ^2 | | | | | 0,23 | 0,0001 | 0,001 | | |

Fonte: Autor.

A Tabela 49 apresenta os resultados obtidos com o smartphone a partir da aplicação *Vibration Alarm* ao aumentar o corte para a profundidade de 4 mm em 3L/4.

Tabela 49: 3L/4 - Resultados após inserir o corte de 4 mm – *Vibration Alarm*

| Data | | 26/10/21 | | L/3 | | | | | |
|-----------|------------|-------------|-------|------------|-------|----------------|-----------|--------|----------|
| Motor (%) | Fase Am | Am. Natural | | Ap-a-p | | F. Butterworth | | Dlfreq | SNR (dB) |
| | | Ap-a-p (g) | DI | Ap-a-p (g) | DI | ω (Hz) | ξ (%) | | |
| 10 | 194 | 0,107 | -1,04 | 0,070 | -2,16 | 29,65 | 0,020 | 0,237 | -22,04 |
| 20 | 195 | 0,122 | -0,56 | 0,082 | -1,80 | 29,96 | 0,025 | 0,221 | -22,01 |
| 30 | 196 | 0,126 | -0,46 | 0,081 | -1,83 | 30,31 | 0,009 | 0,203 | -21,97 |
| | \bar{x} | | | | | 29,97 | 0,018 | 0,221 | |
| | σ | | | | | 0,33 | 0,008 | 0,017 | |
| | σ^2 | | | | | 0,11 | 0,0001 | 0,0003 | |

Fonte: Autor.

A Tabela 50 apresenta os resultados obtidos com o smartphone a partir da aplicação *Vibration Alarm* ao aumentar o corte para a profundidade de 5 mm em 3L/4.

Tabela 50: 3L/4 - Resultados após inserir o corte de 5mm – *Vibration Alarm*

| Data | | 26/10/21 | | L/3 | | | | | |
|-----------|------------|-------------|-------|------------|-------|----------------|-----------|--------|----------|
| Motor (%) | Fase Am | Am. Natural | | Ap-a-p | | F. Butterworth | | Dlfreq | SNR (dB) |
| | | Ap-a-p (g) | DI | Ap-a-p (g) | DI | ω (Hz) | ξ (%) | | |
| 10 | 197 | 0,108 | -0,99 | 0,070 | -2,15 | 29,80 | 0,013 | 0,229 | -22,02 |
| 20 | 198 | 0,127 | -0,42 | 0,081 | -1,83 | 30,39 | 0,028 | 0,199 | -21,98 |
| 30 | 199 | 0,127 | -0,43 | 0,085 | -1,71 | 30,38 | 0,021 | 0,199 | -21,99 |
| | \bar{x} | | | | | 30,19 | 0,021 | 0,209 | |
| | σ | | | | | 0,34 | 0,008 | 0,018 | |
| | σ^2 | | | | | 0,11 | 0,0001 | 0,0003 | |

Fonte: Autor.

A Tabela 51 apresenta as médias dos valores de frequência natural e amortecimento para o ensaio com danos em diferentes pontos e dados extraídos através do *Vibration Alarm*.

Tabela 51: Média das frequências naturais e amortecimento após danos – *Vibration Alarm*

| Amostras | Local do dano | Profundidade (mm) | ω (Hz) | ξ (%) |
|-----------|---------------|-------------------|---------------|-----------|
| 175 a 177 | L/2 | 2 | 30,01 | 0,019 |
| 178 a 179 | L/2 | 4 | 30,04 | 0,025 |
| 180 a 181 | L/2 | 5 | 28,89 | 0,018 |
| 182 a 184 | L/3 | 2 | 29,82 | 0,018 |
| 185 a 187 | L/3 | 4 | 30,22 | 0,024 |
| 188 a 190 | L/3 | 5 | 30,07 | 0,083 |
| 191 a 193 | 3L/4 | 2 | 29,89 | 0,021 |
| 194 a 196 | 3L/4 | 4 | 29,97 | 0,18 |
| 197 a 200 | 3L/4 | 5 | 30,19 | 0,021 |

Fonte: Autor.

Acelerômetro *WitMotion*

A Tabela 52 apresenta os resultados obtidos a partir dos dados extraídos com o acelerômetro *WitMotion* ao inserir o corte de 2 mm de profundidade em L/2. É possível verificar a queda da frequência natural média em torno de 7,74%.

O amortecimento apresentou valores menores que o amortecimento médio para a condição sem danos, além da variação já esperada. O índice DI_{freq} aumentou em torno de 60,99% em relação aos dados sem danos obtidos através do acelerômetro *WitMotion*.

Tabela 52: L/2 - Resultados após inserir o corte de 2 mm - *WitMotion*

| Data | | 26/10/21 | | L/3 | | | | | |
|-----------|------------|-------------|--------|------------|-------|----------------|-----------|--------|----------|
| Motor (%) | Fase Am | Am. Natural | | Ap-a-p | | F. Butterworth | | DIfreq | SNR (dB) |
| | | Ap-a-p (g) | DI | Ap-a-p (g) | DI | ω (Hz) | ξ (%) | | |
| 10 | 200 | 1,189 | 0,50 | 0,097 | -1,35 | 30,04 | 0,036 | 0,217 | -17,21 |
| 20 | 201 | 1,149 | 0,48 | 0,095 | -1,39 | 30,03 | 0,023 | 0,217 | -15,79 |
| 30 | 202 | 1,078 | 0,45 | 0,092 | -1,50 | 29,71 | 0,033 | 0,234 | -19,56 |
| | \bar{x} | | 0,48 | | | 29,93 | 0,031 | 0,223 | |
| | σ | | 0,02 | | | 0,19 | 0,007 | 0,010 | |
| | σ^2 | | 0,0005 | | | 0,04 | 0,00005 | 0,0001 | |

Fonte: Autor.

A Tabela 53 apresenta os resultados obtidos a partir dos dados extraídos com o acelerômetro *WitMotion* ao aumentar a profundidade do corte para 4 mm em L/2. É possível observar que existe uma diminuição da frequência natural em torno de 7,12% e que este comportamento não é linear.

A taxa de amortecimento não apresenta um aumento médio esperado com à presença de danos. O índice Dl_{freq} apresenta um aumento médio de 58,96% e indica a presença de danos.

Tabela 53: L/2 - Resultados após inserir o corte de 4mm - WitMotion

| Data | | 26/10/21 | | | | | | | |
|-----------|------------|-------------|------|----------------|-------|---------------|-----------|--------|----------|
| | | L/3 | | | | | | | |
| Motor (%) | Fase Am | Am. Natural | | F. Butterworth | | | | Dlfreq | SNR (dB) |
| | | Ap-a-p (g) | DI | Ap-a-p (g) | DI | ω (Hz) | ξ (%) | | |
| 10 | 203 | 1,224 | 0,51 | 0,099 | -1,29 | 29,69 | 0,053 | 0,235 | -16,25 |
| 20 | 204 | 1,517 | 0,62 | 0,115 | -0,79 | 30,57 | 0,023 | 0,189 | -14,42 |
| | \bar{x} | | 0,57 | | | 30,13 | 0,038 | 0,212 | |
| | σ | | 0,08 | | | 0,62 | 0,021 | 0,033 | |
| | σ^2 | | 0,01 | | | 0,39 | 0,0005 | 0,001 | |

Fonte: Autor.

A Tabela 54 apresenta os resultados obtidos a partir dos dados extraídos com o acelerômetro WitMotion ao aumentar a profundidade do corte para 5 mm em L/2. É possível observar a diminuição das frequências naturais, a variação do amortecimento e o aumento de Dl_{freq} , comportamento este já identificado anteriormente na Tabela 52 Tabela 53 e na Tabela 53. Portanto, comentários como este não serão mais apresentados.

Tabela 54: L/2 - Resultados após inserir o corte de 5 mm - WitMotion

| Data | | 26/10/21 | | | | | | | |
|-----------|------------|-------------|------|----------------|-------|---------------|-----------|--------|----------|
| | | L/3 | | | | | | | |
| Motor (%) | Fase Am | Am. Natural | | F. Butterworth | | | | Dlfreq | SNR (dB) |
| | | Ap-a-p (g) | DI | Ap-a-p (g) | DI | ω (Hz) | ξ (%) | | |
| 10 | 205 | 1,158 | 0,49 | 0,094 | -1,44 | 29,06 | 0,026 | 0,267 | -18,20 |
| 20 | 206 | 1,707 | 0,69 | 0,123 | -0,55 | 30,56 | 0,033 | 0,190 | -13,01 |
| | \bar{x} | | | | | 29,81 | 0,029 | 0,228 | |
| | σ | | | | | 1,06 | 0,004 | 0,055 | |
| | σ^2 | | | | | 1,13 | 0,00002 | 0,003 | |

Fonte: Autor.

A Tabela 55 apresenta os resultados obtidos a partir dos dados extraídos com o acelerômetro WitMotion ao inserir o corte de 2 mm em L/3.

Tabela 55: L/3 - Resultados após inserir o corte de 2mm - *WitMotion*

| Data | | 26/10/21 | | L/3 | | | | | |
|-----------|------------|-------------|------|------------|-------|----------------|-----------|--------|----------|
| Motor (%) | Fase Am | Am. Natural | | Ap-a-p (g) | | F. Butterworth | | Dlfreq | SNR (dB) |
| | | Ap-a-p (g) | DI | Ap-a-p (g) | DI | ω (Hz) | ξ (%) | | |
| 10 | 207 | 0,961 | 0,41 | 0,077 | -1,94 | 28,90 | 0,018 | 0,275 | -18,12 |
| 20 | 208 | 1,468 | 0,60 | 0,109 | -0,96 | 29,86 | 0,018 | 0,226 | -13,71 |
| 30 | 209 | 1,509 | 0,62 | 0,119 | -0,66 | 30,46 | 0,040 | 0,195 | -13,16 |
| | \bar{x} | | | | | 29,74 | 0,025 | 0,232 | |
| | σ | | | | | 0,79 | 0,013 | 0,040 | |
| | σ^2 | | | | | 0,62 | 0,0002 | 0,002 | |

Fonte: Autor.

A Tabela 56 apresenta os resultados obtidos a partir dos dados extraídos com o acelerômetro *WitMotion* ao aumentar a profundidade do corte para 4 mm em L/3.

Tabela 56: L/3 - Resultados após inserir o corte de 4 mm - *WitMotion*

| Data | | 26/10/21 | | L/3 | | | | | |
|-----------|------------|-------------|------|------------|-------|----------------|-----------|--------|----------|
| Motor (%) | Fase Am | Am. Natural | | Ap-a-p (g) | | F. Butterworth | | Dlfreq | SNR (dB) |
| | | Ap-a-p (g) | DI | Ap-a-p (g) | DI | ω (Hz) | ξ (%) | | |
| 10 | 210 | 1,438 | 0,59 | 0,105 | -1,11 | 30,26 | 0,064 | 0,206 | -13,84 |
| 20 | 211 | 1,494 | 0,61 | 0,110 | -0,95 | 29,89 | 0,018 | 0,225 | -13,44 |
| 30 | 212 | 1,593 | 0,65 | 0,121 | -0,62 | 30,27 | 0,031 | 0,205 | -12,92 |
| | \bar{x} | | | | | 30,14 | 0,038 | 0,212 | |
| | σ | | | | | 0,22 | 0,024 | 0,011 | |
| | σ^2 | | | | | 0,05 | 0,0006 | 0,0001 | |

Fonte: Autor.

A Tabela 57 apresenta os resultados obtidos a partir dos dados extraídos com o acelerômetro *WitMotion* ao aumentar a profundidade do corte para 5 mm em L/3.

Tabela 57: L/3 - Resultados após inserir o corte de 5 mm - *WitMotion*

| Data | | 26/10/21 | | L/3 | | | | | |
|-----------|------------|-------------|------|------------|-------|----------------|-----------|--------|----------|
| Motor (%) | Fase Am | Am. Natural | | Ap-a-p (g) | | F. Butterworth | | Dlfreq | SNR (dB) |
| | | Ap-a-p (g) | DI | Ap-a-p (g) | DI | ω (Hz) | ξ (%) | | |
| 10 | 213 | 1,253 | 0,52 | 0,098 | -1,32 | 29,56 | 0,231 | 0,242 | -14,73 |
| 20 | 214 | 1,661 | 0,68 | 0,122 | -0,59 | 29,87 | 0,018 | 0,226 | -13,15 |
| 30 | 215 | 1,602 | 0,65 | 0,126 | -0,46 | 30,55 | 0,026 | 0,190 | -12,88 |
| | \bar{x} | | | | | 29,99 | 0,092 | 0,219 | |
| | σ | | | | | 0,51 | 0,121 | 0,026 | |
| | σ^2 | | | | | 0,26 | 0,0145 | 0,0007 | |

Fonte: Autor.

A Tabela 58 apresenta os resultados obtidos a partir do acelerômetro *WitMotion* para o dano inserido com profundidade de 2 mm em 3L/4.

Tabela 58: 3L/4 - Resultados após inserir o corte de 2 mm - *WitMotion*

| Data | | 26/10/21 | | L/3 | | | | | |
|-----------|------------|-------------|------|------------|-------|----------------|-----------|--------|----------|
| Motor (%) | Fase Am | Am. Natural | | Ap-a-p (g) | | F. Butterworth | | Dlfreq | SNR (dB) |
| | | Ap-a-p (g) | DI | Ap-a-p (g) | DI | ω (Hz) | ξ (%) | | |
| 10 | 216 | 1,390 | 0,57 | 0,105 | -1,10 | 29,37 | 0,037 | 0,251 | -14,76 |
| 20 | 217 | 1,714 | 0,70 | 0,120 | -0,64 | 29,75 | 0,026 | 0,232 | -13,38 |
| 30 | 218 | 1,606 | 0,66 | 0,119 | -0,66 | 30,33 | 0,026 | 0,202 | -14,73 |
| | \bar{x} | | | | | 29,82 | 0,030 | 0,229 | |
| | σ | | | | | 0,48 | 0,006 | 0,025 | |
| | σ^2 | | | | | 0,23 | 0,00004 | 0,001 | |

Fonte: Autor.

A Tabela 59 apresenta os resultados obtidos a partir do acelerômetro *WitMotion* ao aumentar a profundidade do dano para 4 mm em 3L/4.

Tabela 59: 3L/4 - Resultados após inserir o corte de 4 mm - *WitMotion*

| Data | | 26/10/21 | | L/3 | | | | | |
|-----------|------------|-------------|------|------------|-------|----------------|-----------|--------|----------|
| Motor (%) | Fase Am | Am. Natural | | Ap-a-p (g) | | F. Butterworth | | Dlfreq | SNR (dB) |
| | | Ap-a-p (g) | DI | Ap-a-p (g) | DI | ω (Hz) | ξ (%) | | |
| 10 | 219 | 1,313 | 0,54 | 0,102 | -1,19 | 29,57 | 0,038 | 0,241 | -13,99 |
| 20 | 220 | 1,572 | 0,64 | 0,116 | -0,76 | 29,88 | 0,037 | 0,225 | -12,89 |
| 30 | 221 | 1,581 | 0,65 | 0,117 | -0,74 | 30,24 | 0,016 | 0,206 | -12,78 |
| | \bar{x} | | | | | 29,90 | 0,030 | 0,224 | |
| | σ | | | | | 0,34 | 0,012 | 0,018 | |
| | σ^2 | | | | | 0,11 | 0,00016 | 0,0003 | |

Fonte: Autor.

A Tabela 60 apresenta os resultados obtidos a partir do acelerômetro *WitMotion* ao aumentar a profundidade do dano para 5 mm em 3L/4.

Tabela 60: 3L/4 - Resultados após inserir o corte de 5 mm - *WitMotion*

| Data | | 26/10/21 L/3 | | | | | | | |
|-----------|------------|--------------|------|------------|----------------|---------------|---------|----------|-----------|
| Motor (%) | Fase Am | Am. Natural | | | F. Butterworth | | Dlfreq | SNR (dB) | |
| | | Ap-a-p (g) | DI | Ap-a-p (g) | DI | ω (Hz) | | | ξ (%) |
| 10 | 222 | 1,345 | 0,56 | 0,100 | -1,24 | 29,74 | 0,019 | 0,233 | -13,63 |
| 20 | 223 | 1,542 | 0,63 | 0,119 | -0,67 | 30,30 | 0,038 | 0,203 | -12,33 |
| 30 | 224 | 1,538 | 0,63 | 0,122 | -0,57 | 30,30 | 0,037 | 0,203 | -12,39 |
| | \bar{x} | | | | | 30,11 | 0,031 | 0,213 | |
| | σ | | | | | 0,32 | 0,011 | 0,017 | |
| | σ^2 | | | | | 0,11 | 0,00012 | 0,0003 | |

Fonte: Autor.

A Tabela 61 apresenta as médias dos valores de frequência natural e amortecimento para o ensaio com danos em diferentes pontos e dados extraídos através do acelerômetro *WitMotion*.

Tabela 61: Média das frequências naturais e amortecimento após danos – *WitMotion*

| Amostras | Local do dano | Profundidade (mm) | ω (Hz) | ξ (%) |
|-----------|---------------|-------------------|---------------|-----------|
| 200 a 202 | L/2 | 2 | 29,93 | 0,031 |
| 203 a 204 | L/2 | 4 | 30,13 | 0,021 |
| 205 a 206 | L/2 | 5 | 29,81 | 0,029 |
| 207 a 209 | L/3 | 2 | 29,74 | 0,025 |
| 210 a 212 | L/3 | 4 | 30,14 | 0,038 |
| 213 a 215 | L/3 | 5 | 29,99 | 0,092 |
| 216 a 218 | 3L/4 | 2 | 29,82 | 0,030 |
| 219 a 221 | 3L/4 | 4 | 29,90 | 0,030 |
| 222 a 224 | 3L/4 | 5 | 30,11 | 0,031 |

Fonte: Autor

Os métodos *SSI-COV* e *SSI-DATA* utilizados através do módulo *CESSIPy* estão apresentados na Tabela 62. Os resultados se referem aos dados extraídos com o smartphone.

É possível observar que as frequências naturais sem danos – amostras 147 e 148 – apresentam valores maiores que as restantes. Já os valores do amortecimento apresentam variação e não obedecem à premissa de aumento na presença de danos em todas as amostras.

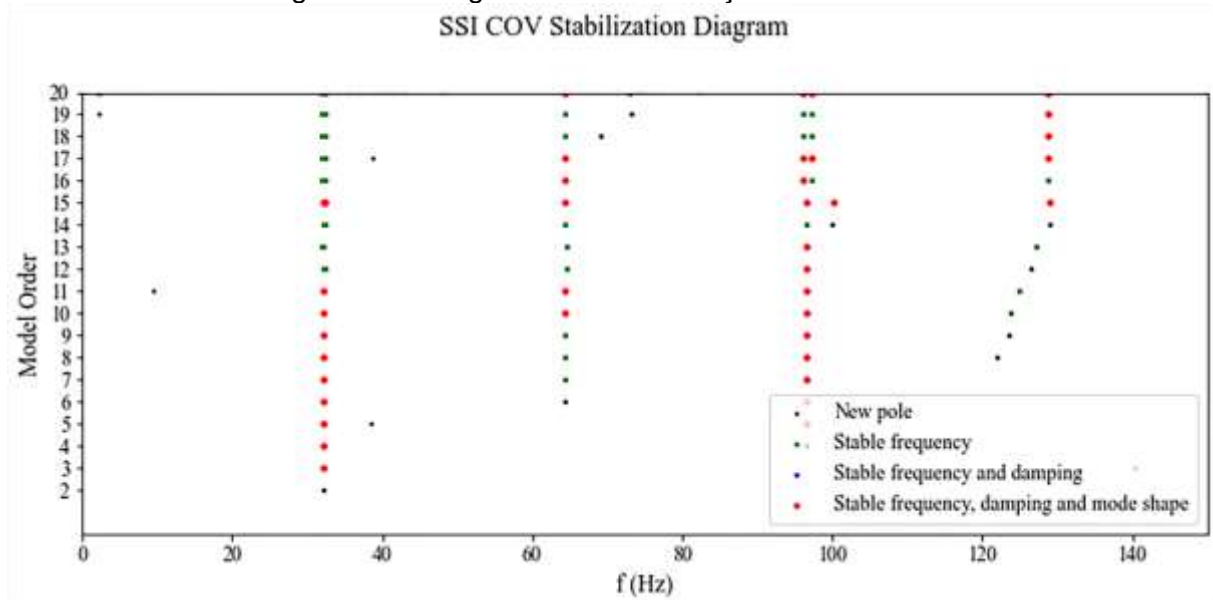
Tabela 62: Resultados SSI-COV e SSI-DATA - Viga T

| Am. | SSI-COV | | | | | | SSI-DATA | | | | | |
|-----|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|-------------|
| | f_1 (Hz) | ξ_1 (%) | f_2 (Hz) | ξ_2 (%) | f_3 (Hz) | ξ_3 (%) | f_1 (Hz) | ξ_1 (%) | f_2 (Hz) | ξ_2 (%) | f_3 (Hz) | ξ_3 (%) |
| 147 | 32,21 | 0,066 | 64,37 | 0,27 | 96,59 | 0,18 | 32,05 | 0,062 | 64,32 | 0,26 | 96,59 | 0,17 |
| 148 | 32,09 | 0,042 | 64,15 | 0,083 | 96,30 | 0,14 | 32,09 | 0,042 | 64,15 | 0,073 | 96,3 | 0,10 |
| 176 | 30,09 | 0,043 | 90,27 | 0,124 | - | - | 30,09 | 0,04 | 90,31 | 0,083 | 120,35 | 0,14 |
| 177 | 29,72 | 0,100 | 64,02 | 13,89 | 89,0 | 0,33 | 29,71 | 0,07 | 59,27 | 0,010 | 89,0 | 0,28 |
| 179 | 30,84 | 0,150 | 53,17 | 2,35 | 92,34 | 0,263 | 30,84 | 0,13 | 92,33 | 0,26 | 123,18 | 0,31 |
| 181 | 30,21 | 0,006 | 90,6 | 0,09 | 121,51 | 0,060 | 30,21 | 0,012 | 90,61 | 0,037 | 120,74 | 0,14 |
| 182 | 29,59 | 1,04 | 87,6 | 0,90 | 94,19 | 1,68 | 29,58 | 1,08 | 87,6 | 0,90 | 94,19 | 1,68 |
| 184 | 30,54 | 0,018 | 91,6 | 0,089 | - | - | 30,54 | 0,017 | 60,84 | 0,43 | 91,69 | 0,011 |
| 186 | 30,04 | 0,019 | 90,06 | 0,051 | 120,13 | 0,005 | 30,04 | 0,017 | 90,07 | 0,06 | 120,08 | 0,059 |
| 188 | 29,88 | 0,013 | 89,6 | 0,024 | - | - | 29,88 | 0,012 | 89,59 | 0,013 | 119,49 | 0,052 |
| 189 | 30,57 | 0,001 | 91,68 | 0,003 | 123,47 | 0,17 | 30,57 | 0,003 | 91,69 | 0,025 | 122,25 | 0,035 |
| 192 | 29,92 | 0,020 | 89,71 | 0,04 | 119,63 | 0,002 | 29,91 | 0,018 | 89,69 | 0,024 | 119,63 | 0,03 |
| 193 | 30,43 | 0,007 | 91,27 | 0,034 | - | - | 30,43 | 0,007 | 91,29 | 0,055 | 121,7 | 0,0094 |
| 199 | 30,45 | 0,046 | 61,07 | 0,66 | 91,28 | 0,14 | 30,45 | 0,049 | 91,29 | 0,13 | 121,83 | 0,00076 |

Fonte: Autor.

A Figura 105 apresenta a amostra 147, onde a viga está intacta, ou seja, apenas com os danos de fabricação. É possível observar quatro modos estabilizados em relação à frequência natural, amortecimento e forma modal, na cor vermelha.

Figura 105: Diagrama de estabilização - amostra 147



Fonte: Autor.

A Tabela 63 apresenta os resultados obtidos para a viga T através do *EFDD*. Nas amostras 147 e 148, as quais representam situações apenas com danos de construção, é possível verificar a ocorrência de frequências naturais referentes ao primeiro modo próximas a 32 Hz. As taxas de amortecimento destas amostras apresentaram valores de 0,59% e 0,30%.

Para as mesmas amostras, as frequências naturais do segundo modo se apresentaram com valores próximos a 64 Hz. As taxas de amortecimento foram iguais a 0,39% e 0,19%.

As frequências do terceiro modo para uma condição com danos de construção apresentou valores próximos a 96 Hz. A taxa de amortecimento foi igual a 0,27% e 0,18%.

Além disso, é possível observar uma frequência natural referente a um quarto modo com valores aproximados de 128 Hz. As taxas de amortecimento foram de 0,31% e 0,26%

A partir da amostra 176 foram aplicados danos na parte inferior da alma da viga em diferentes pontos. Esta amostra apresenta frequência natural de primeiro modo próxima a 29 Hz e taxa de amortecimento de 0,43%.

No segundo modo, a frequência natural foi próximo a 62,41 Hz e a taxa de amortecimento igual a 0,40%.

O terceiro modo apresentou uma frequência natural igual a 66,93 Hz e taxa de amortecimento igual a 0,70%.

No quarto modo identificado, uma frequência natural igual a 99,94 Hz pode ser identificada. A taxa de amortecimento foi igual a 0,25%.

Comparado ao estágio de danos de construção, as amostras que representam situações com os cortes aplicados ao fundo da alma da viga possuem valores de frequências naturais menores em todos os modos identificados. Isto caracteriza a existência de danos.

Em relação à taxa de amortecimento foi possível observar valores maiores que a situação com danos de fabricação e que podem ser associados aos danos por corte. Porém, este parâmetro apresenta variação e é possível observar valores menores que a situação apenas com os danos de fabricação.

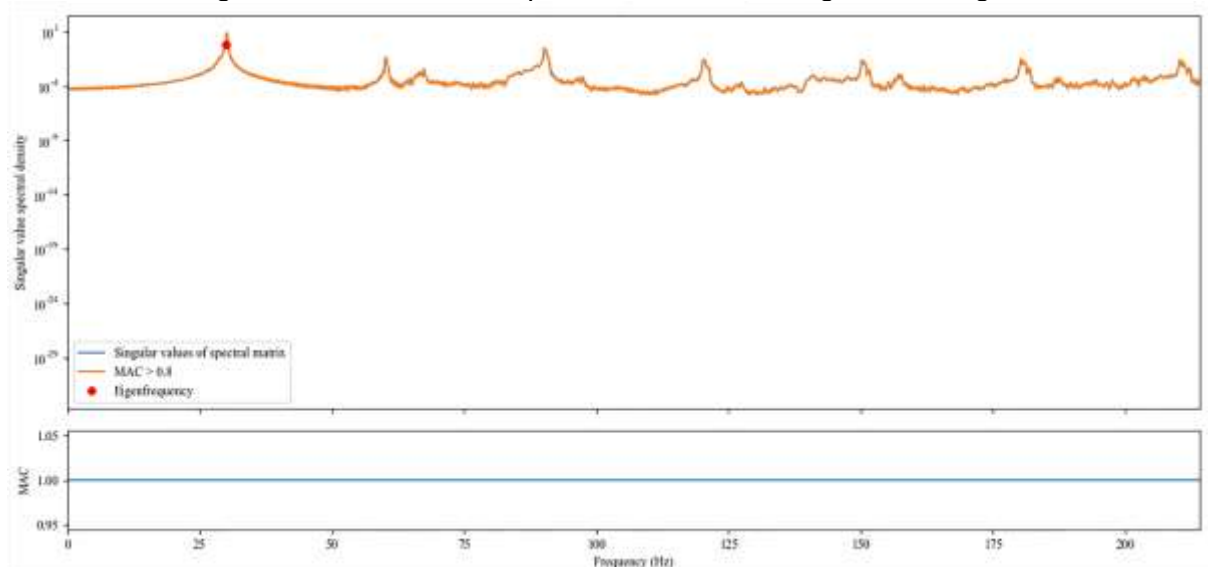
Tabela 63: Resultados *EFDD* – Viga T

| Am. | <i>EFDD</i> | | | | | | | |
|-----|---------------|-------------|---------------|----------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| | f_1 (Hz) | ξ_1 (%) | f_2 (Hz) | ξ_2 (%) | f_3 (Hz) | ξ_3 (%) | f_4 (Hz) | ξ_4 (%) |
| 147 | 32,00 | 0,59 | 64,35 | 0,39 | 96,17 | 0,27 | 128,47 | 0,31 |
| 148 | 32,14 | 0,30 | 64,07 | 0,19 | 96,03 | 0,18 | 128,18 | 0,26 |
| 176 | 29,73 | 0,43 | 62,41 | 0,40 | 66,93 | 0,70 | 99,94 | 0,25 |
| 177 | 60,13 | 0,18 | 123,72 | 0,30 | - | - | - | - |
| 179 | 29,42 | 0,76 | 59,38 | 0,50 | 88,88 | 0,51 | 118,81 | 0,49 |
| 181 | 61,56 | 0,49 | 122,87 | 0,49 | - | - | - | - |
| 182 | 30,05 | 0,22 | 60,13 | 0,21 | 89,92 | 0,34 | 120,65 | 0,10 |
| 184 | 31,16 | 1,19 | 58,63 | 0,71 | 87,73 | 0,31 | 117,67 | 0,28 |
| 186 | 30,32 | 0,22 | 61,10 | 0,47 | 91,25 | 0,23 | 121,72 | 0,29 |
| 188 | 29,88 | 0,35 | 59,55 | 0,36 | 89,60 | 0,08 | 119,95 | 0,18 |
| 189 | 29,44 | 0,49 | 59,05 | 0,54 | 89,54 | 0,11 | 112,51 | 0,16 |
| 192 | 29,72 | 0,27 | 59,06 | 0,57 | 89,06 | 0,17 | 109,64 | 0,12 |
| 193 | 30,10 | 0,33 | 59,55 | 0,49 | 90,89 | 0,12 | 121,66 | 0,08 |
| 199 | 30,54 | 0,29 | 50,88 | 0,25 | 90,91 | 0,19 | 121,51 | 0,20 |

Fonte: Autor.

A Figura 106 apresenta os valores singulares da matriz espectral. É possível os valores singulares da densidade espectral. O trecho onde o MAC é maior que 0,8 é indicado na cor laranja.

Figura 106: Densidade espectral dos valores singulares – Viga T



Fonte: Autor

5 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

As etapas realizadas podem ser compreendidas como parte de uma metodologia de monitoramento estrutural que utiliza, além da definição dos parâmetros dinâmicos de frequência natural e amortecimento, padrões de aceleração associados à existência de danos.

O equipamento básico para a realização deste monitoramento foi o smartphone, o qual foi aplicado em todos os estudos de caso. Porém, é importante ressaltar que embora a fixação do aparelho à estrutura tenha ocorrido por meio de uma fita dupla face e que esta fixação é indicada para o uso em estruturas com baixas frequências, nenhuma investigação sobre a influência deste método de fixação sobre as respostas foi realizada. Além disso, a fita dupla face utilizada não foi devidamente criada para esta finalidade.

Sobre os aplicativos utilizados, o *iDynamics*, o *myFrequency* e o *ST BLE Sensor* forneciam a frequência natural no momento da extração dos dados. Em especial, o aplicativo *ST BLE Sensor* permitia a operação do acelerômetro *ST Microelectronics* via *bluetooth* e o envio de dados ocorria através de e-mail. O *Vibration Alarm* armazenava os dados e o compartilhamento dos dados para o posterior processamento foi realizado a partir do serviço de nuvem de dados.

Deve-se ressaltar que o uso dos celulares não deve substituir os acelerômetros destinados às atividades de investigação estrutural. Porém, é necessário também destacar a capacidade deste dispositivo como uma alternativa para o monitoramento desde que as limitações do aparelho sejam conhecidas.

5.1 Correção da taxa de amostragem

A correção da taxa de amostragem indicou que o funcionamento do aparelho no momento da extração de amostras pode variar de 300 Hz até 390 Hz e representam uma queda de 29,91% e 8,88%, respectivamente.

No arquivo de texto gerado pelo *Vibration Alarm* é apresentado apenas um algarismo referente ao passo do tempo. Isto pode ser definido como um aspecto negativo da aplicação. Mesmo assim, a taxa de amostragem remanescente de 300

Hz a 390 Hz e poderia ser utilizada para a medição da maioria das infraestruturas civis.

5.2 Calibração e aceleração

Antes do uso das peças para calibração, apresentadas neste trabalho, foram confeccionadas duas peças a partir da impressão 3D devido ao maior grau de precisão. Porém, erros foram cometidos no momento de planejamento das peças e o tamanho dos sulcos que receberiam os celulares foram menores que o necessário, o que levou ao descarte das mesmas. Optou-se assim pelas peças de nylon industrial.

No que se refere ao método, foram realizadas diferentes combinações entre as peças de nylon industrial para identificar a menor angulação entre o vetor de aceleração e o eixo de aceleração vertical do acelerômetro. A angulação apresentada neste trabalho foi a melhor combinação, ou seja, a menor angulação.

A operação exigida pelo método de calibração foi simples e os valores finais permitiram a correção das acelerações já extraídas. Entretanto, as peças não garantiram um grau de precisão menor que $0,5^\circ$, indicado como limite por Kuhlmann, Garaizar e Reips (2020) por não comprometer as leituras de aceleração. Assim, a criação de novas peças com maior precisão é indicado.

A calibração adicional conferiu maior confiabilidade ao monitoramento realizado pelo smartphone. É possível observar que a curva de ajuste apresenta um coeficiente de determinação com valor alto entre os resultados obtidos com o celular e o acelerômetro, o que valida o celular para a extração de amostras.

5.3 Viaduto V1

Modelo numérico

A avaliação do modelo numérico indicou uma frequência menor àquela obtida pela parte experimental. Embora este comportamento seja associado à existência de danos, existem fatores desconhecidos como a espessura da camada de asfalto e a resistência do concreto e que podem influenciar nos resultados.

Os resultados do modelo numérico indicam uma frequência numérica para o primeiro modo de flexão de 11,83 Hz, o qual é utilizado para comparação com as respostas experimentais e definição de danos.

As malhas adotadas apresentam diferenças de resultado de ordem de 1% e respeitam o número de máximo de nós fornecidos pela versão estudantil do software.

Considera-se que este modelo numérico esteja calibrado ou bastante próximo de uma resposta considerada ideal.

Teste de vibração no viaduto V1

A análise dos resultados de vibração para V1 indicou que esta estrutura apresenta valores de aceleração pico-a-pico menores que 0,15g, o que configura um índice de dano *DI* de aceleração negativo. Isto se confirma ao observar as acelerações antes e depois de aplicar o filtro Butterworth de primeira ordem e, segundo Casas e Moughty (2017), representa que V1 não possui danos.

O *SNR* resultante dos valores de *RMS* antes e depois da passagem do filtro Butterworth indicou uma atenuação de aproximadamente -20 dB, magnitude esta já prevista por Thompson (2013). Ao atenuar o sinal, ocorre o aumento da qualidade do mesmo, o que permite dizer que o uso do filtro foi benéfico.

Em relação ao *RDT* aplicado, o método foi capaz de indicar uma resposta com queda logarítmica onde os picos de aceleração eram facilmente identificados para o conhecimento do amortecimento. Além deste, a frequência natural também foi identificada após aplicar a *FFT*.

O amortecimento apresentou variação, comportamento já esperado devido ao que é exposto por autores citados neste trabalho. Para comparação, ao adotar o padrão de Bachmann et al (1995) - onde o amortecimento de pontes não deve ser maior que 2% -, 100% das amostras apresentaram valores de amortecimento maiores que este valor.

Ao adotar o valor de amortecimento indicado por Battista (2021) - onde o limite para o amortecimento é 2,5% -, 97% das amostras apresentaram valores maiores que este limite.

Outro fator utilizado como padrão para a taxa de amortecimento limite é apresentado por Li et al (2014) - onde o limite para o amortecimento é 3,5% -, 70,27% das amostras apresentaram valores acima deste limite. Embora se modifique o valor de comparação e o autor, é possível dizer que o viaduto V1 possivelmente apresenta problemas ou apresente danos em estágio inicial.

A frequência natural obtida nas amostras extraídas no ponto localizado à metade do vão apresentou valores em uma faixa entre 12,11 Hz a 12,61 Hz. Isto representa uma variação de 3,96%.

Nas amostras também foi possível observar a ocorrência de modos com menor energia próximos a 11 Hz e a 17 Hz. No ponto de extração igual a L/3, as frequências dominantes apresentaram-se próximas a 12 Hz, 16 Hz, 18 Hz e 25 Hz.

Das amostras processadas, apenas 12,16% apresentaram $D_{I_{freq}}$ positivo quando comparadas à frequência numérica igual a 11,83 Hz para o modo de flexão vertical. O maior valor de $D_{I_{freq}}$ foi igual a 0,09. O restante das amostras indicou um $D_{I_{freq}}$ negativo, o que representaria que a estrutura é redundante, que não possui dano ou apresenta dano em estágio inicial. Este resultado pode ser respaldado pela inspeção visual realizada no local e que apresenta poucas manifestações de danos em estágio inicial.

O índice de vibração V apresentou apenas valores negativos, o que sugere ser incapaz de definir a presença de danos. Porém, segundo Ozer, Feng e Feng (2017), é indicado o uso de um filtro passa-banda após cada integração, o que não foi aplicado neste método.

O valor SNR aplicado às amostras após o filtro RDT indicou uma atenuação de aproximadamente -15 dB, indicando a melhoria do sinal.

A partir da aplicação dos métodos $SSI-COV$ e $SSI-DATA$ foi possível observar a ocorrência de picos de frequência próximos a 12, 18 e 25 Hz. Estes valores se aproximam do que já havia sido identificado e servem apenas para verificação da metodologia.

Para o método $EFDD$, as frequências naturais apresentam valores já esperados, com a exceção das frequências naturais do primeiro modo de 10 Hz, 15 Hz e 19 Hz para o primeiro modo. A taxa de amortecimento se apresentou alta e poderia representar a existência de danos.

Deste modo, é possível observar que com exceção dos indicadores de amortecimento, o viaduto V1 não possui danos ou, de forma conservadora, pode apresentar danos em estágio inicial.

5.4 Viaduto V2

Modelo numérico

No modelo numérico de V2, as frequências resultantes que correspondem aos modos de flexão vertical de primeiro e segundo modos são iguais a 6,91 Hz e 15,19 Hz, respectivamente.

A diferença de resultado devido à adoção das diferentes malhas foi de aproximadamente 2%.

Embora as dimensões adotadas sejam conhecidas a partir do acesso ao projeto, o desconhecimento da espessura da camada de asfalto e pode justificar diferenças obtidas nos resultados.

Considera-se que este modelo numérico ainda necessita de calibração, já que os métodos *SSI* aplicados na verificação demonstram que uma frequência de 5 Hz predomina nas amostras.

Teste de vibração no viaduto V2

A análise dos dados comportamentais do viaduto V2 indicou uma aceleração de pico-a-pico menor que 0,15g, o que representa um valor *DI* de aceleração negativo, ou seja, sem danos. A observação destes valores antes e depois do filtro Butterworth indica a diminuição ainda mais acentuada das acelerações e um *DI* também mais negativo.

O *SNR* que considera o sinal antes e depois do filtro Butterworth indicou uma atenuação de aproximadamente -20 dB. Assim, pode-se dizer que o uso do filtro é benéfico e foi responsável por um aumento na qualidade nas amostras extraídas de V2.

O *RDT* resultante possuía característica de queda logarítmica, porém não apresentou picos de aceleração de fácil identificação. Assim, a definição do amortecimento foi dificultada.

Assim como em V1, o amortecimento de V2 foi comparado com três faixas de valores: 2%, fornecido por Bachmann et al (1995); 2,5% fornecido por Battista (2021) e; 3,5% fornecido por Li et al (2014).

Das 71 amostras, 95,77% apresentaram valores de amortecimento maiores que 2%; 76,06% maiores que 2,5% e; 11,27% maiores que 3,5%. Assim, é possível indicar que o viaduto V2 apresenta danos ou danos em estágio inicial.

Dos dados extraídos à metade do vão, onde é possível avaliar o primeiro modo de vibração, 89,23% indicaram frequências próximas a 6,5 Hz e 10,76% indicaram uma frequência de aproximadamente 16 Hz.

Nos dados extraídos a 1/3 do vão, onde segundo Morghental et al (2019) é possível identificar vários modos de vibração, obtiveram-se frequências próximas a 5 Hz, 6 Hz, 14 Hz e 24 Hz.

O indicador de dano $D_{I_{freq}}$ apresentou valor positivo, ou seja, com a presença de dano em 87,32% das amostras. A comparação foi realizada para o primeiro e segundo modos - onde a frequência numérica adotada como referência foi de 6,80 Hz e 15,19 Hz, respectivamente. Assim, é possível dizer que o viaduto V2 pode apresentar danos. Este resultado pode ser respaldado a partir da inspeção visual realizada no mesmo viaduto, onde existem armaduras expostas, manifestações que podem ser associadas à eflorescência e pontos de corrosão na parte inferior do tabuleiro.

O índice V apresentou valores negativos de alta magnitude e não foi capaz de indicar danos. Como indicado em V1, não foi aplicado o filtro Butterworth após cada fase de integração de dados, o que pode justificar estes valores.

Em relação ao parâmetro de redução de frequência maior que 5%, 32,39% das amostras apresentaram valores de frequência com variações maiores que este índice de comparação. Isto sugere que o viaduto V2 pode apresentar danos.

O SNR definido após a aplicação do RDT indicou que os sinais foram atenuados em aproximadamente -15 dB.

A aplicação dos métodos $SSI-COV$ e $SSI-DATA$ indicaram modos estabilizados diferentes dos já estabelecidos pela metodologia aplicada para a avaliação. Na avaliação, a maioria dos picos de frequência natural indicaram um valor próximo de 6 Hz, enquanto que os métodos $SSI-COV$ e $SSI-DATA$ indicaram, em sua grande maioria, valores de frequência natural próximas de 5 Hz.

Ainda, é possível visualizar a ocorrência de frequências naturais próximas de 6 Hz, porém, estes valores se apresentaram em um número menor de amostras. Na maioria das amostras é possível visualizar valores próximos a 16 Hz referentes ao segundo modo e 24 Hz referentes ao terceiro modo.

Assim como os métodos SSI , o método $EFDD$ identificou frequências naturais já conhecidas. As taxas de amortecimento se apresentaram altos mas não atingiram valores maiores que aqueles obtidos pelos métodos SSI . Mesmo assim, como estes métodos foram adicionados apenas para a verificação, não alteraram a classificação.

Assim, de acordo com os resultados obtidos através do $SSI-COV$, $SSI-DATA$ e $EFDD$ pode-se questionar a efetividade do método de avaliação aplicado ao viaduto

V2. Isto pode indicar a necessidade de utilizar métodos mais eficientes de identificação modal, mais sensores e a correção do modelo numérico.

5.5 Viga T

Modelo analítico

Os primeiros e segundo modos com frequências de 30,64 Hz e 120,57 Hz foram utilizados para auxiliar a identificação da frequência experimental. Para o terceiro modo com frequência natural de 275 Hz, os equipamentos utilizados e as respectivas configurações não obedecem ao Teorema de Nyquist. Assim, impedem a correta identificação deste mesmo modo.

Modelo numérico

A malha de 10 cm foi utilizada pois apresentou um deslocamento máximo próximo aquele obtido pela viga unifilar criada com o elemento BEAM189 tanto para o modelo sólido como para o modelo em casca.

O modelo numérico de casca criado a partir do elemento SHELL181 foi utilizado para a comparação com as respostas experimentais. A frequência natural numérica obtida para o modo de flexão foi de 33,95 Hz e representa uma diferença com a resposta experimental de 4,18% quando comparado à frequência natural média identificada com o aplicativo *Vibration Alarm* – 32,53 Hz - e; 4,45% quando comparado à resposta média obtida pelo acelerômetro *WitMotion* – 32,44 Hz.

O modelo sólido criado a partir do SOLID185 apresentou uma frequência natural de flexão igual a 37,94 Hz e apresenta diferenças na ordem de 14,26% e 14,49% quando comparado com às frequências naturais obtidas pelo *Vibration Alarm* – 32,53 Hz – e *WitMotion* – 32,44 Hz. Vale destacar que as armaduras não foram simuladas.

Teste de vibração – Viga T com danos de construção

Os resultados obtidos através dos aplicativos *iDynamics*, *BLE Sensor*, *Vibration Alarm* e *Witmotion* antes da aplicação dos danos são apresentados na Tabela 64. Na mesma tabela se apresentam os resultados obtidos através dos métodos *SSI-DATA*, *SSI-COV* e *EFDD* para as amostras 147 e 148, as quais apresentam apenas danos de fabricação.

O aplicativo *iDynamics* foi utilizado com o objetivo de conhecer o comportamento experimental da viga T de forma rápida. Embora tenha indicado um valor próximo a 34 Hz como resultado experimental, o ideal é que um número maior de ensaios fosse realizado com o uso deste aplicativo.

O uso do *ST Microelectronics* definiu uma frequência média de 31,78 Hz. Este valor foi utilizado como parâmetro de comparação para os valores definidos a partir de dados de outros sensores.

O aplicativo *Vibration Alarm* apresentou frequências máxima e mínima de 32,82 Hz e 31,97 Hz, respectivamente, o que representa uma variação de 2,59%. A frequência média definida foi de 32,53 Hz. O amortecimento apresentou valores entre 0,014% e 0,037%, o que representa uma variação de 62,16%. O valor médio assumido pelo amortecimento foi de 0,025%.

O indicador de dano que considera a frequência – D_{freq} – apresentou variação de 32,52% com valores entre 0,271 e 0,183. A comparação é considerada entre a frequência experimental e a numérica, a qual é igual a 33,95 Hz.

O valor *SNR* indicou uma atenuação de aproximadamente -20 dB. Este é um indicativo que houve melhora na qualidade do sinal após aplicar o filtro Butterworth.

O acelerômetro *Witmotion* apresentou frequências máxima e mínima de 33,51 Hz e 31,91 Hz, respectivamente, o que representa uma variação de 4,77%. A média resultante foi de 32,44 Hz. O amortecimento apresentou valores que variam entre 0,086% e 0,027%, o que representa uma variação e 68,60%. O valor médio assumido por esta propriedade é de 0,04%.

As acelerações pico-a-pico foram maiores que 0,15g e apresentaram um *DI* positivo. Após a aplicação do filtro Butterworth as acelerações e os indicadores de dano *DI* diminuíram, mas permaneceram maiores que 0,15g.

O amortecimento apresentou valores que variam entre 0,086% e 0,027%, o que representa uma variação e 68,60%. O valor médio assumido por esta propriedade é de 0,04%.

O indicador de dano D_{freq} apresentou danos com valores na ordem de 0,275 a 0,189, uma variação que representa 31,15%.

O valor *SNR* apresentou valores próximos a -15 dB e representam a melhoria do sinal após a aplicação do filtro Butterworth.

Para as amostras 147 e 148, o método *SSI-DATA* obteve uma frequência natural média de 32,15 Hz e amortecimento de 0,053%. Para o método *SSI-COV*, o

valor da frequência natural foi de 32,07 Hz e amortecimento de 0,052%. Para o método *EFDD*, o valor da frequência natural foi de 32,07 Hz e amortecimento de 0,44%.

Ao observar a Tabela 64, é possível verificar que em relação à frequência natural, a diferença obtida entre os valores foi de 7,26%.

Para o amortecimento, o valor obtido pelo *EFDD* foi significativamente maior que aqueles obtidos por outros métodos de processamento. A diferença entre os valores máximo e mínimo atinge 94,31%.

É importante ressaltar que a metodologia criada para esta pesquisa foi utilizada no processamento dos dados obtidos com o aplicativo *Vibration Alarm* e *WitMotion*.

Tabela 64: Médias da frequência natural e do amortecimento para a viga T antes do dano

| Acelerômetro/ Aplicação | Método de identificação | ω (Hz) | ξ (%) |
|----------------------------|-------------------------|---------------|-----------|
| <i>iDynamics</i> | - | 34,27 | - |
| <i>ST Microelectronics</i> | - | 31,78 | - |
| <i>Vibration Alarm</i> | Metodologia | 32,53 | 0,025 |
| <i>WitMotion</i> | Metodologia | 32,44 | 0,04 |
| Amostras 147 + 148* | <i>SSI-DATA</i> | 32,15 | 0,053 |
| Amostras 147 + 148* | <i>SSI-COV</i> | 32,07 | 0,052 |
| Amostras 147 + 148* | <i>EFDD</i> | 32,07 | 0,44 |

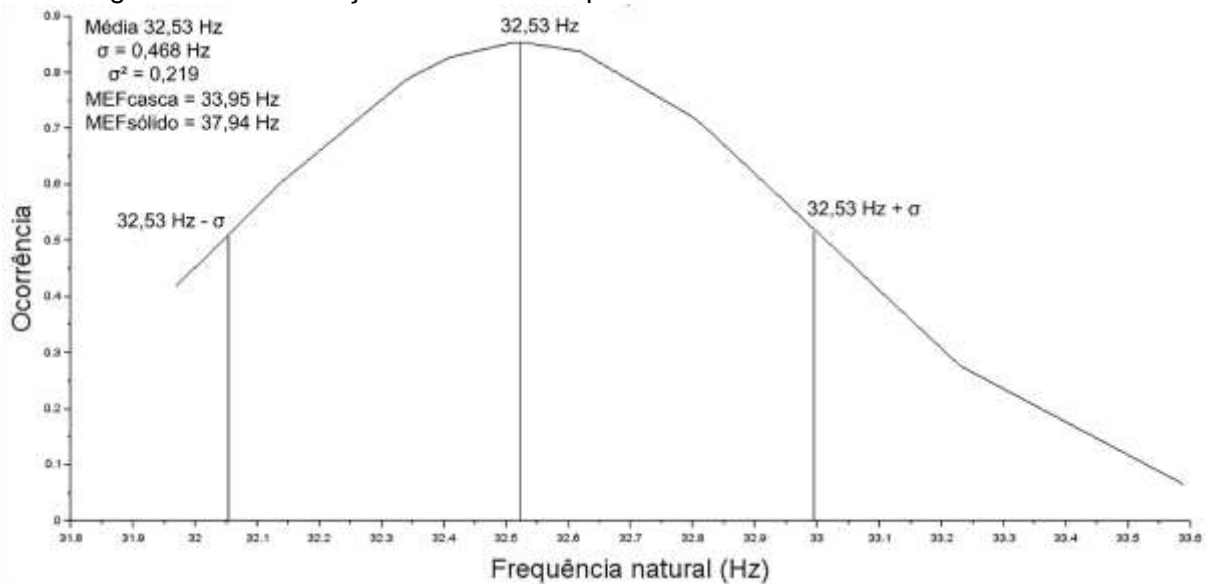
*Extraídas com o aplicativo *Vibration Alarm*

Fonte: Autor.

Para melhor compreensão dos resultados, uma representação da distribuição normal antes e depois dos danos, com o aplicativo *Vibration Alarm* e o acelerômetro *WitMotion* é realizada.

A Figura 107 apresenta os valores obtidos e a ocorrência das frequências naturais antes dos danos a partir do uso do *Vibration Alarm*. A média foi igual a $\bar{x}=32,53$ Hz; o desvio padrão igual a $\sigma=0,468$ Hz e; a variância igual a $\sigma^2=0,219$. Foram consideradas 14 amostras, onde 64% se apresentaram entre o intervalo $\bar{x}\pm\sigma$, ou seja, é menor que 68%, o qual é o valor mínimo esperado para a distribuição normal.

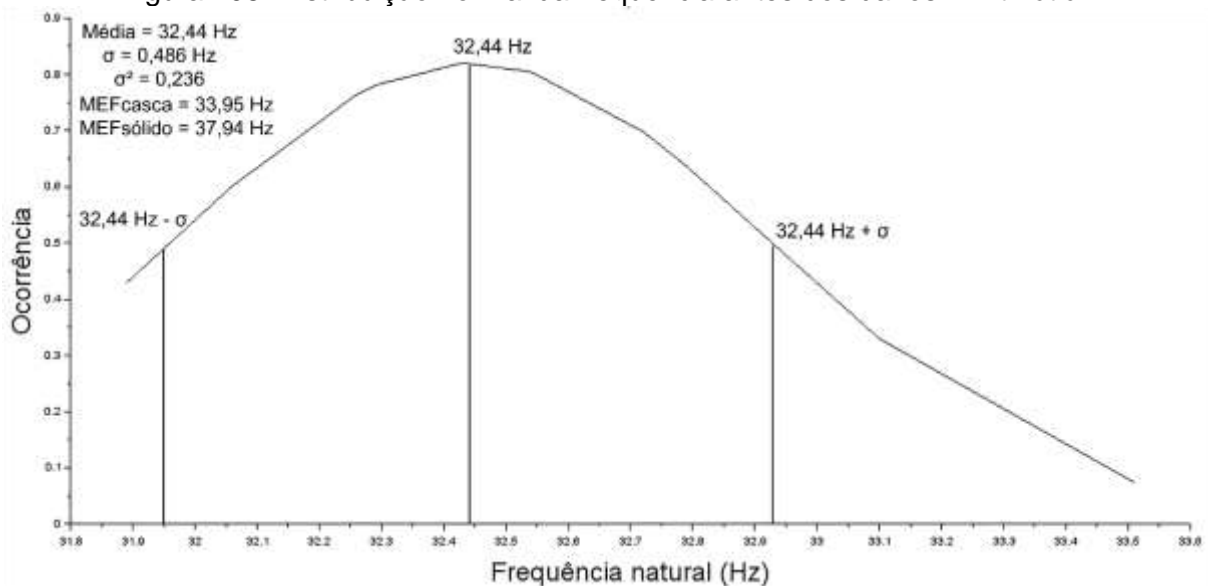
Figura 107: Distribuição normal da frequência antes dos danos - *Vibration Alarm*



Fonte: Autor.

A distribuição normal obtida através da utilização do acelerômetro *WitMotion* na situação antes dos danos é apresentada na Figura 108. A média foi igual a $\bar{x}=32,44$ Hz; o desvio padrão $\sigma=0,486$ Hz e; a variância $\sigma^2=0,236$. Foram consideradas 14 amostras, onde 57% se apresentaram entre o intervalo $\bar{x}\pm\sigma$, ou seja, é menor que 68%, o qual é o valor mínimo esperado para a distribuição normal.

Figura 108: Distribuição normal da frequência antes dos danos - *WitMotion*



Fonte: Autor.

Através da análise da Figura 107 e da Figura 108 é possível constatar que o desvio padrão das amostras obtidas com o smartphone é menor que aquele obtido com o acelerômetro *Witmotion*, o que indica uma maior precisão do smartphone.

O índice de vibração pico-a-pico foi descartado para o caso da viga T, já que este método foi criado para ser utilizado em estruturas com características das OAEs brasileiras.

Teste de vibração – Viga T com danos

Após a aplicação dos danos à viga houve uma esperada redução das frequências naturais. Esta redução não apresentou relação linear com o agravamento do dano.

O esperado aumento do amortecimento foi obtido para os métodos aplicados através do módulo CESSIPy. A metodologia criada para esta pesquisa não foi capaz de indicar o aumento do amortecimento.

Além disso, foi observado que entre os métodos utilizados, o *EFDD* apresentou maior taxa de amortecimento que quando comparado aos demais. A Tabela 65 apresenta as frequências naturais e taxas de amortecimento de amostras escolhidas aleatoriamente, as quais foram processadas pela metodologia desta pesquisa e pelo módulo CESSIPy através dos métodos *SSI-DATA*, *SSI-COV* e *EFDD*.

A diferença existente entre as médias das frequências naturais obtidas é de 0,49%. Já entre o amortecimento a diferença atinge 95,38%.

Tabela 65: Médias da frequência natural e do amortecimento para a viga T após os danos

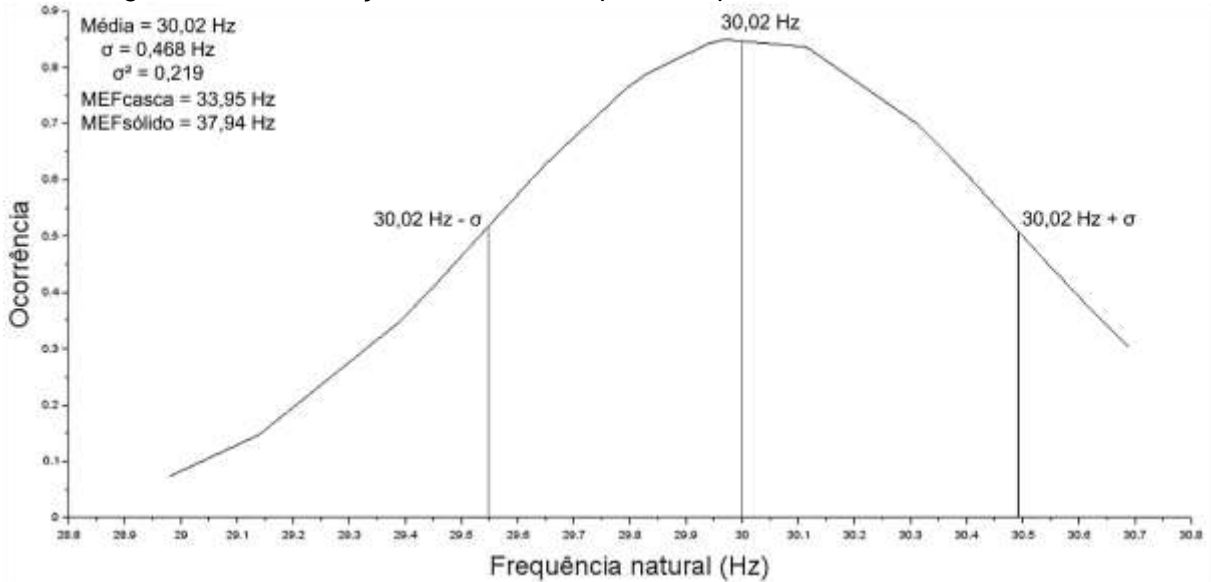
| Acelerômetro/ Aplicação | Método de identificação | ω (Hz) | ξ (%) |
|-------------------------|-------------------------|---------------|-----------|
| <i>Vibration Alarm</i> | Metodologia | 30,19 | 0,021 |
| <i>WitMotion</i> | Metodologia | 30,11 | 0,031 |
| Amostras com dano* | <i>SSI-DATA</i> | 30,19 | 0,134 |
| Amostras com dano* | <i>SSI-COV</i> | 30,19 | 0,122 |
| Amostras com dano* | <i>EFDD</i> | 30,04 | 0,455 |

*Extraídas com o aplicativo *Vibration Alarm*

Fonte: Autor.

A Figura 109 apresenta a distribuição normal das frequências naturais obtidas com o uso do aplicativo *Vibration Alarm* após inserir os danos à viga. A média foi igual a $\bar{x}=30,02$ Hz; o desvio padrão igual a $\sigma=0,468$ Hz e; a variância $\sigma^2=0,219$. Foram consideradas 25 amostras, onde 68% se apresentaram entre o intervalo $\bar{x}\pm\sigma$. Esta porcentagem é característica de uma distribuição normal.

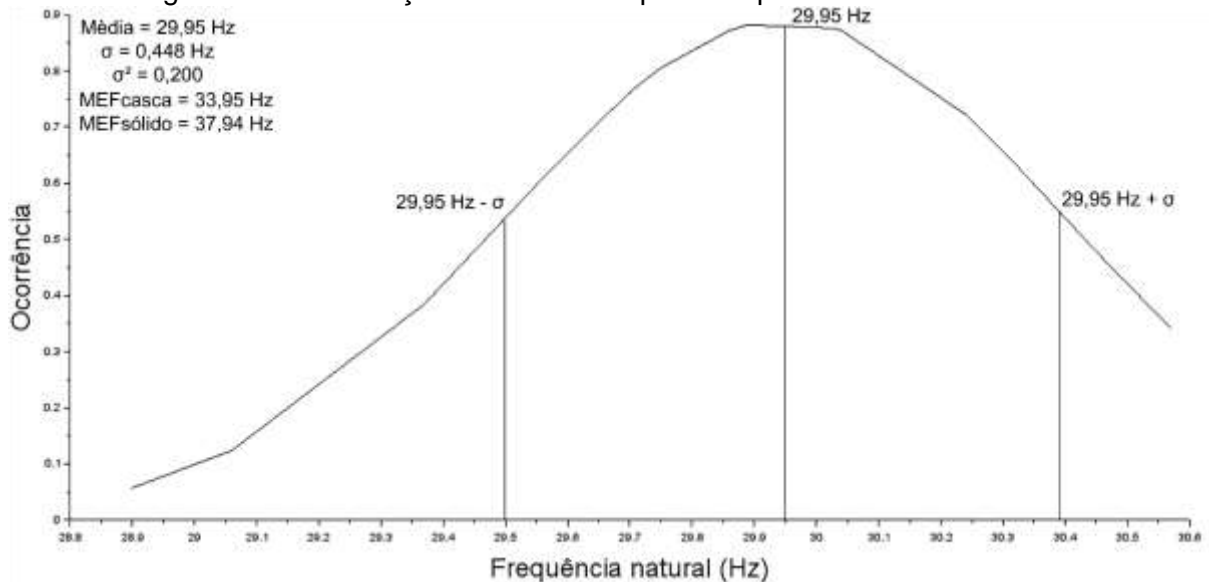
Figura 109: Distribuição normal da frequência após os danos - *Vibration Alarm*



Fonte: Autor.

A distribuição normal das amostras extraídas com o acelerômetro *WitMotion* é apresentada na Figura 110. A média foi igual a $\bar{x}=29,95$ Hz; o desvio padrão igual a $\sigma=0,448$ Hz e; a variância $\sigma^2=0,20$. Foram consideradas 25 amostras, onde 72% se apresentaram entre o intervalo $\bar{x}\pm\sigma$. Esta porcentagem é maior que à esperada para o intervalo na distribuição normal.

Figura 110: Distribuição normal da frequência após os danos - *WitMotion*

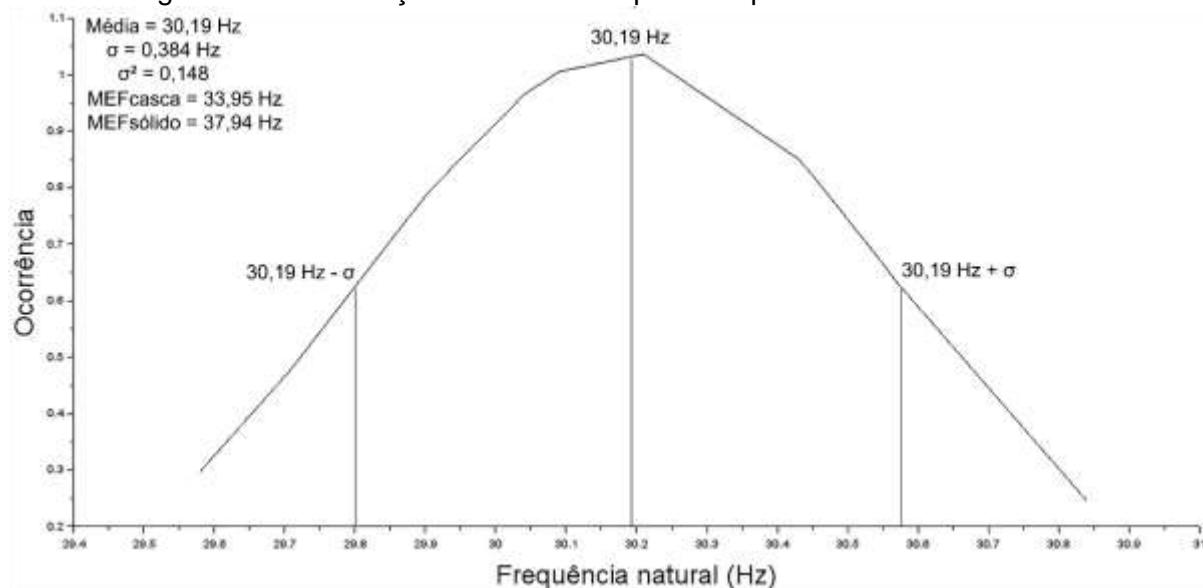


Fonte: Autor.

A distribuição normal das amostras processadas com o método *SSI-DATA* é apresentada na Figura 111. A média foi igual a $\bar{x}=30,19$ Hz; o desvio padrão igual a $\sigma=0,384$ Hz e; a variância $\sigma^2=0,148$. Foram consideradas 12 amostras, onde 75% se

apresentaram entre o intervalo $\bar{x} \pm \sigma$. Esta porcentagem é maior que à esperada para o intervalo na distribuição normal.

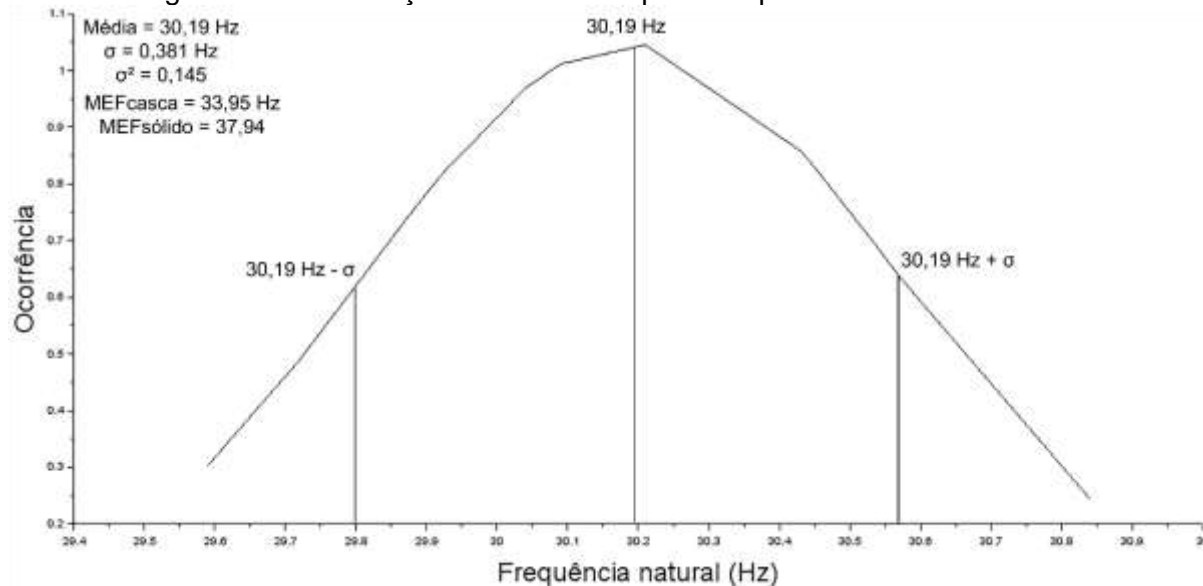
Figura 111: Distribuição normal da frequência após os danos – SSI-DATA



Fonte: Autor.

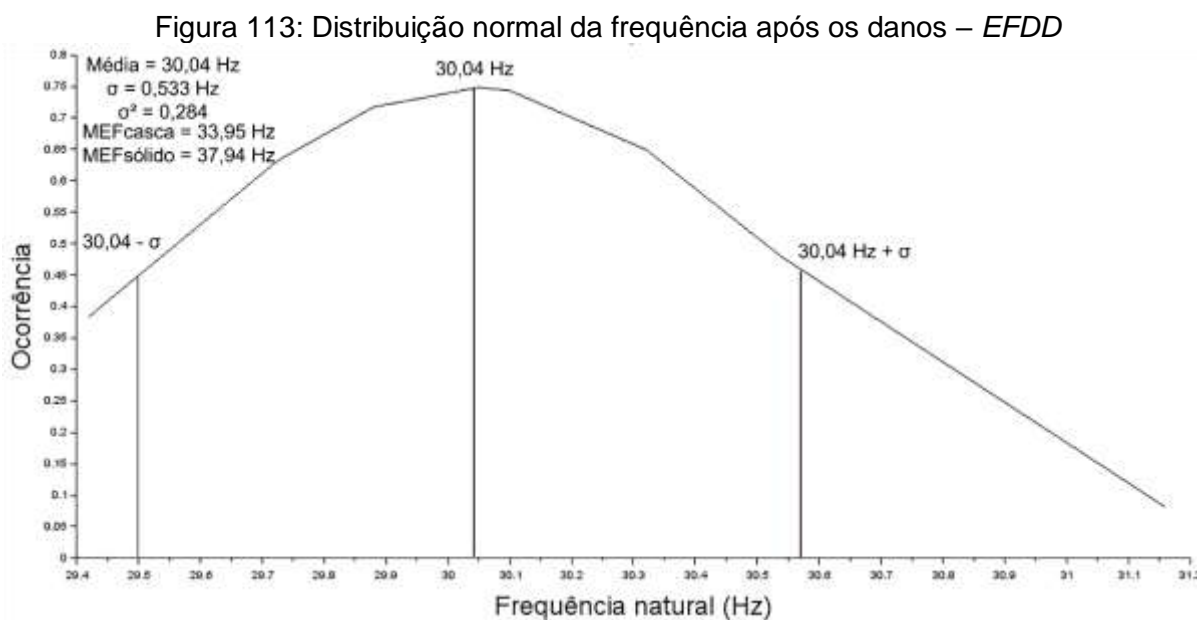
A distribuição normal das amostras processadas com o método SSI-COV é apresentada na Figura 112. A média foi igual a $\bar{x}=30,19$ Hz; o desvio padrão igual a $\sigma=0,381$ Hz e; a variância $\sigma^2=0,145$. Foram consideradas 12 amostras, onde 75% se apresentaram entre o intervalo $\bar{x} \pm \sigma$. Esta porcentagem é maior que à esperada para o intervalo na distribuição normal.

Figura 112: Distribuição normal da frequência após os danos – SSI-COV



Fonte: Autor.

A distribuição normal das amostras processadas com o método *EFDD* é apresentada na Figura 113. A média foi igual a $\bar{x}=30,04$ Hz; o desvio padrão igual a $\sigma=0,533$ Hz e; a variância $\sigma^2=0,284$. Foram consideradas 10 amostras, onde 70% se apresentaram entre o intervalo $\bar{x}\pm\sigma$. Esta porcentagem é maior que à esperada para o intervalo na distribuição normal.



Fonte: Autor.

A partir da análise dos desvios padrão é possível constatar que os métodos *SSI-DATA* e *SSI-COV* apresentam maior precisão, seguido pelo *EFDD*. A metodologia aplicada no processamento de dados se mostrou mais precisa para os dados extraídos com o smartphone.

Na sequência são apresentadas as variações de frequência natural, taxa de amortecimento e DI_{freq} para a condição com danos.

Aplicativo *Vibration Alarm*

Corte com 2 mm de profundidade em L/2

Ao inserir o primeiro dano à viga, executado a partir de um corte de 2 mm de profundidade, o valor da aceleração pico-a-pico foi menor que 0,15g para as diferentes variações de potência do motor. Assim, obteve-se um dano DI negativo.

A aplicação do filtro Butterworth diminuiu ainda mais a aceleração pico-a-pico e, por consequência, também apresentou valores DI ainda mais negativos.

A frequência natural obtida apresentou variação de 1,09% entre os valores máximo e mínimo de 30,12 Hz e 29,79 Hz, respectivamente. O valor médio de 30,01 Hz representa uma redução na frequência natural de 5,56% em relação ao que foi obtido pelo acelerômetro *ST Microelectronics* e 7,75% quando comparado ao que foi obtido pela aplicação *Vibration Alarm*. Esta observação é realizada a partir dos valores médios.

O amortecimento apresentou valores máximo de 0,024% e mínimo de 0,008%, o que representa uma variação de 66,67%. O valor médio assumido foi de 0,019% e representou uma redução de 24% em relação ao amortecimento médio também obtido a partir do *Vibration Alarm* – 0,025%.

O dano DI_{freq} apresentou valores máximo e mínimo de 0,230 e 0,213, o que representa uma variação de 7,39%. Em relação ao valor médio de DI_{freq} com a viga íntegra - igual a 0,081 – e o aquele obtido após o dano de 2 mm - 0,219 - houve um aumento de 63,01%.

O *SNR* indicou uma atenuação próxima a -20 dB e representa uma melhoria do sinal.

Corte com 4 mm de profundidade em L/2

Ao aumentar a profundidade do corte para 4 mm, os valores de aceleração permaneceram menores que 0,15g e indicaram um *DI* negativo. Após a passagem do filtro Butterworth, a magnitude da aceleração diminuiu ainda mais e acentuou o valor negativo do índice *DI*.

As frequências naturais obtidas apresentaram valores máximo e mínimo de 30,69 Hz e 29,39 Hz e representam uma variação de 4,23%. O valor médio assumido por esta propriedade foi de 30,04 Hz e representa uma redução de 5,47% em relação ao obtido pelo acelerômetro *ST Microelectronics* e 7,65% em relação àquela obtida a partir da aplicação *Vibration Alarm*.

O amortecimento obteve valores máximo e mínimo de 0,035% e 0,015% e representa uma variação de 57,14%. O valor médio assumido por esta propriedade foi de 0,025% e representa uma redução de 37,5% em relação ao valor médio obtido a partir do *Vibration Alarm*.

O índice de dano DI_{freq} apresentou valores máximo e mínimo de 0,251 e 0,183, o que representa uma variação de 27,09%. Em relação ao DI_{freq} obtido com a viga íntegra - 0,081 – e aquele o valor médio obtido – 0,217 – houve um aumento de

62,67%. Em relação ao DI_{freq} obtido com o corte de 2 mm de profundidade – 0,217, houve uma redução de 0,91%.

O SNR obtido indicou uma atenuação aproximada de -20 dB, e significa um aumento na qualidade do sinal.

A etapa de ensaio com o funcionamento do motor de vibração em 30% de potência não ocorreu devido à falha de operação do mesmo.

Corte com 5 mm de profundidade em L/2

O agravamento do corte para 5 mm de profundidade, indicou valores de aceleração pico-a-pico menores que 0,15g e conseqüentemente um DI também negativo. O uso do filtro Butterworth diminui estes valores de aceleração e intensificou o valor negativo de DI .

Os valores de frequência natural, máximos e mínimos, obtidos foram de 30,65 Hz e 29,14 Hz e representam uma variação de 4,92%. A frequência natural média foi de 29,89 Hz e representa reduções de 5,95% ao obtido pelo *ST Microelectronics* e 8,11% em relação ao uso do *Vibration Alarm*.

Os amortecimentos máximo e mínimo foram de 0,023% e 0,014% e representam uma variação de 39,13%. O valor médio assumido por esta propriedade é de 0,018% e representa uma redução de 28% em relação ao valor médio obtido pelo mesmo aplicativo – 0,025%.

O índice DI_{freq} apresentou valores máximo e mínimo de 0,263 e 0,185, respectivamente, e representam uma variação de 29,66%. O valor médio obtido foi de 0,224 e representa um aumento de 3,12% em relação ao obtido no corte de 4 mm de profundidade. Em relação ao valor médio de viga T com danos de construção – 0,081 – o aumento foi de 63,84%.

O SNR indicou uma atenuação de -20 dB, o que indica uma melhoria na qualidade do sinal.

A etapa de ensaio que corresponde ao funcionamento do motor de vibração com potência igual a 30% não ocorreu devido à falha de operação do mesmo.

A Tabela 66 apresenta os valores médios obtidos para a frequência natural, amortecimento e DI_{freq} para os danos inseridos em L/2 da viga T a partir do *Vibration Alarm*. É possível observar que a redução da frequência não ocorre de maneira linear com o aumento do dano.

O índice DI que considera a aceleração pico-a-pico apresentou valores negativos e, por este motivo, foi omitido. A diferença (%) é definida em relação à condição intacta da viga T.

Tabela 66: Valores médios obtidos para os danos inseridos em L/2 – *Vibration Alarm*

| Condição | ω (Hz) | Diferença (%) | ω (Hz) | Diferença (%) | ξ (%) | Diferença (%) | DI_{freq} | Diferença (%) |
|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------------|------------------|-------------|------------------|
| Intacta | 32,53 | - | 31,78 | | 0,025 | - | 0,081 | - |
| Corte 2mm | 30,01 | -7,75 | | -5,57 | 0,019 | -24,00 | 0,219 | +63,01 |
| Corte 4mm | 30,04 | -7,65 | | -5,47 | 0,025 | - | 0,217 | +62,67 |
| Corte 5mm | 29,89 | -8,11 | | -5,95 | 0,018 | -28,00 | 0,224 | +63,84 |

Onde: ω =frequência natural; ξ =amortecimento; (+) = aumento; (-) = redução

Fonte: Autor.

Corte de 2 mm de profundidade em L/3

O corte com 2 mm de profundidade em L/3 apresentou valores de magnitude de pico-a-pico menores que 0,15g e por consequência um DI negativo. Após a passagem do filtro Butterworth, a característica das respostas não foram alteradas e manteve o indicador de dano DI negativo.

A frequência natural indicou valores máximo e mínimo de 30,54 Hz e 28,98 Hz, o que representa uma variação de 5,11%. O valor médio assumido por esta propriedade foi de 29,82 Hz e representa uma variação de 8,33% em relação à condição intacta definida pelo *Vibration Alarm* e; 6,17% para a condição sem danos, este obtido pelo *ST Microelectronics*.

Os amortecimentos máximo e mínimo foram de 0,029% e 0,011%, e representa uma variação de 62,07%. O valor médio obtido por esta propriedade foi de 0,018% e representa uma redução de 28% em relação ao obtido com o mesmo aplicativo para a condição intacta.

O índice DI_{freq} obteve valores máximo e mínimo de 0,271 e 0,191, respectivamente. Isto representa uma variação de 29,52%. O valor médio foi de 0,228 e representa um aumento de 64,47% em relação condição intacta – 0,081.

O SNR indicou uma atenuação aproximada de -20 dB, o que representa a melhora do sinal após o uso do filtro.

Corte de 4 mm de profundidade em L/3

Ao aumentar a profundidade do corte para 4 mm em L/3, os valores de aceleração pico-a-pico foram menores que 0,15g e apresentaram DI negativo. O

comportamento não é alterado ao passar pelo filtro Butterworth e a característica da resposta não altera.

Os valores de frequência máximo e mínimo é de 30,34 Hz e 29,97 Hz e representam uma variação de 1,22%. O valor médio foi de 30,22 Hz e indica uma variação de 7,10% em relação à condição intacta definida a partir do *Vibration Alarm* e; 4,91% em relação à condição intacta definida pelo *ST Microelectronics*.

Os valores de amortecimento máximo e mínimo foram de 0,44 e 0,10 respectivamente e representam uma variação de 77,27%. O valor médio foi de 0,024% e representa uma redução de 4% em relação ao valor médio obtido através do *Vibration Alarm* – 0,025%.

O indicador DI_{freq} apresentou valores máximo e mínimo de 0,221 e 0,201 e indica uma variação de 9,05%. O valor médio obtido por esta propriedade foi de 0,208 e representa um aumento de 61,06% em relação à condição intacta obtida pelo *Vibration Alarm*.

O *SNR* indicou uma atenuação aproximada de -20 dB, o que representa a melhora do sinal após o uso do filtro.

Corte de 5 mm de profundidade em L/3

Ao intensificar o dano a partir do corte de 5 mm em L/3, a aceleração pico-a-pico forneceu valores menores que 0,15g e um *DI* negativo. O mesmo comportamento é verificado após a aplicação do filtro Butterworth.

Os valores máximos e mínimo de frequência foram 30,63 Hz e 29,63 Hz, o que representa uma variação de 3,26%. A frequência média adotou um valor de 30,07 Hz e representa uma redução de 7,56% em relação àquela definida a partir do uso do *Vibration Alarm* e; 5,38% em relação à obtida pelo *ST Microelectronics*.

Os valores máximo e mínimo de amortecimento foram 0,214% e 0,013%, respectivamente, e representam uma variação de 93,92%. O valor de amortecimento médio foi de 0,083% e representa um aumento de 69,87% em relação ao valor médio obtido pelo *Vibration Alarm* – 0,025%;

O índice DI_{freq} apresentou valores máximo e mínimo de 0,203 e 0,186, o que representa uma variação de 8,37%. O valor DI_{freq} médio foi de 0,215 e representa um aumento de 62,32% em relação ao obtido pelo *Vibration Alarm* para a condição intacta – 0,081.

O *SNR* indicou uma atenuação aproximada de -20 dB, o que representa a melhora do sinal após o uso do filtro.

A Tabela 67 apresenta os valores médios obtidos a frequência natural, o amortecimento e DI_{freq} em L/3. Apresentam-se também as diferenças ao comparar com os valores da condição intacta.

Tabela 67: Valores médios obtidos para os danos inseridos em L/3 – *Vibration Alarm*

| Condição | ω (Hz) | Diferença (%) | ω (Hz) | Diferença (%) | ξ (%) | Diferença (%) | DI_{freq} | Diferença (%) |
|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------------|------------------|-------------|------------------|
| Intacta | 32,53 | - | 31,78 | | 0,025 | - | 0,081 | - |
| Corte 2mm | 29,82 | -8,33 | | -6,17 | 0,018 | -28,00 | 0,238 | +65,97 |
| Corte 4mm | 30,22 | -7,10 | | -4,91 | 0,024 | -4,00 | 0,222 | +63,51 |
| Corte 5mm | 30,07 | -7,56 | | -5,38 | 0,083 | +69,87 | 0,186 | +56,45 |

Onde: ω = frequência natural; ξ = amortecimento; (+) = aumento; (-) = redução
 Fonte: Autor.

Corte de 2 mm de profundidade em 3L/4

Após inserir o dano de 2 mm de profundidade em 3L/4, a magnitude da aceleração pico-a-pico apresentaram valores menores que 0,15g e DI negativo. O mesmo comportamento é observado após a aplicação do filtro Butterworth.

A frequência natural obteve valores máximo e mínimo de 30,41 Hz e 29,45 Hz, respectivamente, e representa uma variação de 3,16%. O valor de frequência médio foi de 29,89 Hz e representa uma diminuição de 8,11% em relação à condição intacta definida pelo *Vibration Alarm* e; 5,95% em relação à obtida pelo *ST Microelectronics*.

Os valores de amortecimento máximo e mínimo foram de 0,028% e 0,014%, o que representa uma variação de 50%. O valor de amortecimento médio foi de 0,021% e representam uma redução de 16% em relação à condição intacta obtida pelo *Vibration Alarm*.

O índice DI_{freq} obteve valores máximo e mínimo de 0,247 e 0,198, o que representa uma variação de 19,84%. O valor médio obtido por este parâmetro foi de 0,224 e representa um aumento de 68,84% em relação à condição intacta obtida pelo *Vibration Alarm*.

O índice SNR indicou uma atenuação aproximada de -20 dB e significa o aumento da qualidade do sinal após o uso do filtro.

Corte de 4 mm de profundidade em 3L/4

Após inserir o dano de 4 mm de profundidade em 3L/4, a magnitude da aceleração pico-a-pico continuou a apresentar valores menores que 0,15g e DI negativo. O mesmo comportamento é observado após a aplicação do filtro Butterworth.

A frequência natural obteve valores máximo e mínimo de 30,31 Hz e 29,65 Hz, respectivamente, e representa uma variação de 2,18%. O valor de frequência média foi de 29,97 Hz e representa uma diminuição de 7,87% em relação à condição intacta definida pelo *Vibration Alarm* e; 5,69% em relação à obtida pelo *ST Microelectronics*.

Os valores de amortecimento máximo e mínimo foram de 0,025% e 0,009%, o que representa uma variação de 64%. O valor de amortecimento médio foi de 0,018% e representam uma redução de 28% em relação à condição intacta obtida pelo *Vibration Alarm*.

O índice DI_{freq} obteve valores máximo e mínimo de 0,237 e 0,203, o que representa uma variação de 14,34%. O valor médio obtido por este parâmetro foi de 0,221 e representa um aumento de 63,34% em relação à condição intacta obtida pelo *Vibration Alarm*.

O índice *SNR* indicou uma atenuação aproximada de -20 dB e significa o aumento da qualidade do sinal após o uso do filtro.

Corte de 5 mm de profundidade em 3L/4

O dano de 5 mm de profundidade em 3L/4 apresentou acelerações de pico-a-pico menores que 0,15g e indicou um *DI* negativo. O mesmo comportamento é verificado após aplicar o filtro Butterworth.

A frequência natural adotou valores máximo e mínimo de 30,39 Hz e 29,80 Hz, respectivamente, e representa uma diferença de 1,91%. O valor de frequência média foi de 30,19 Hz e representa uma diferença de 7,19% em relação à condição intacta obtida através do *Vibration Alarm* e; 5,00% em relação ao obtido pelo *ST Microelectronics* na mesma condição.

Os valores do amortecimento máximo e mínimo foram de 0,028% e 0,013%, e representam uma diferença de 53,57%. O valor médio foi de 0,021 e representa uma redução de 16%.

O índice DI_{freq} apresentou valores máximo e mínimo de 0,229 e 0,199, respectivamente, e representam uma diferença de 13,10%. O valor médio foi de 0,209 e representa um aumento de 61,24% em relação à condição intacta definida pelo *Vibration Alarm*.

O *SNR* indicou uma atenuação aproximada de -20 dB e representa a melhoria da qualidade do sinal após o uso do filtro. A Tabela 68 apresenta os valores médios obtidos para os danos inseridos em 3L/4.

Tabela 68: Valores médios obtidos para os danos inseridos em 3L/4 – *Vibration Alarm*

| Condição | ω (Hz) | Diferença (%) | ω (Hz) | Diferença (%) | ξ (%) | Diferença (%) | Dl_{freq} | Diferença (%) |
|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------------|------------------|-------------|------------------|
| Intacta | 32,53 | - | 31,78 | | 0,025 | - | 0,081 | - |
| Corte 2mm | 29,89 | -8,11 | | -5,95 | 0,021 | -16,00 | 0,224 | +63,84 |
| Corte 4mm | 29,97 | -7,87 | | -5,69 | 0,018 | -28,00 | 0,221 | +63,34 |
| Corte 5mm | 30,19 | -7,19 | | -5,00 | 0,021 | -16,00 | 0,209 | +61,24 |

Onde: ω =frequência natural; ξ =amortecimento; (+) = aumento; (-) = redução

Fonte: Autor.

Acelerômetro *WitMotion*

Corte de 2 mm de profundidade em L/2

Ao aplicar o corte de 2 mm de profundidade em L/2, a magnitude de aceleração pico-a-pico dos dados naturais indicou um valor maior que 0,15g e, por consequência, Dl positivo, o que indica a existência de danos. Ao aplicar o filtro Butterworth o comportamento é alterado: a aceleração pico-a-pico apresenta valores menores que 0,15g e Dl negativo.

Os valores de frequência natural máximo e mínimo foram de 30,04 Hz e 29,71 Hz respectivamente e representam uma variação de 1,10%. O valor médio de frequência foi de 29,93 Hz e indicou uma redução de 7,74% em relação à condição intacta obtida pelo acelerômetro *WitMotion* e; 5,82% em relação ao valor obtido pelo *ST Microelectronics*.

O amortecimento obteve valores máximo e mínimo de 0,036% e 0,026%, respectivamente, o que representa uma variação de 27,78%. O amortecimento médio adotou um valor de 0,031% e representa uma diminuição de 22,5% em relação à condição sem danos obtido com o mesmo sensor – 0,04%.

O índice Dl_{freq} apresentou valores máximo e mínimo de 0,234 e 0,217, respectivamente, e representa uma variação de 7,26%. O valor médio adotado por esta propriedade é de 0,223 e representa um aumento de 60,99% em relação à condição intacta obtida pelo *WitMotion* – 0,087.

O *SNR* indicou uma atenuação próxima a -20 dB, a qual representa uma melhoria na qualidade do sinal.

Corte de 4 mm de profundidade em L/2

Ao aumentar a profundidade do corte para 4 mm em L/2, as acelerações de pico-a-pico naturais apresentaram valores maiores que 0,15g e Dl positivo. Ao aplicar

o filtro Butterworth, ocorre uma mudança de comportamento, a aceleração se apresentou abaixo de $0,15g$ e com DI negativo.

Os valores máximo e mínimo obtidos pela frequência natural foram de 30,57 Hz e 29,69 Hz, o que representa uma variação de 2,88%. A frequência média foi de 30,13 Hz e representa uma redução de 7,12% em relação à condição intacta obtida através do uso *WitMotion* e; 5,19% em relação ao valor obtido pelo *ST Microelectronics*.

O amortecimento obteve valores máximo e mínimo de 0,053% e 0,023%, respectivamente, o que representa uma variação de 56,60%. O valor médio admitido para esta propriedade foi de 0,038% e representa uma redução de 5%.

Os valores máximo e mínimo de DI_{freq} foram de 0,235 e 0,189, e representam uma variação de 19,57%. O valor médio DI_{freq} foi igual a 0,212 e representa um aumento de 58,96% em relação à condição intacta.

O valor de SNR indicou um valor de atenuação de -15 dB, o que representa a melhora da qualidade do sinal.

Corte de 5 mm de profundidade em L/2

Ao aumentar a magnitude do dano para 5 mm de profundidade é possível visualizar que as acelerações de pico-a-pico naturais apresentam valores maiores que $0,15g$ e indicam um DI positivo. Após o uso do filtro Butterworth o comportamento é alterado e demonstra valores de acelerações pico-a-pico menores que $0,15g$ e um DI negativo.

Os valores máximo e mínimo de frequência natural foram de 30,56 Hz e 29,06 Hz, respectivamente, e representam uma variação de 4,91%. A frequência natural média foi de 29,81 Hz e indica uma diminuição de 8,36% em relação à condição intacta avaliada pelo mesmo sensor e; 6,20% em relação ao valor obtido pelo *ST Microelectronics* para a mesma condição.

Os valores de amortecimento máximo e mínimo foram de 0,033% e 0,026%, respectivamente, e representam uma variação de 21,21%. O valor médio do amortecimento foi de 0,029% uma diminuição de 27,5%.

O índice DI_{freq} apresentou valores máximo e mínimo de 0,267 e 0,190 respectivamente, o que representa uma variação de 28,83%. O valor DI_{freq} médio foi de 0,228 e representa um aumento de 61,84% em relação à condição intacta obtida pelo mesmo sensor.

O *SNR* indicou uma atenuação próxima a -15 dB que representa a melhoria na qualidade do sinal. A Tabela 69 apresenta os valores identificados para o dano inserido em L/2 e dados extraídos a partir do *WitMotion*.

Tabela 69: Valores médios obtidos para os danos inseridos em L/2 - *WitMotion*

| Condição | ω (Hz) | Diferença (%) | ω (Hz) | Diferença (%) | ξ (%) | Diferença (%) | D_{ifreq} | Diferença (%) |
|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------------|------------------|-------------|------------------|
| Intacta | 32,44 | - | 31,78 | | 0,04 | - | 0,087 | - |
| Corte 2mm | 29,93 | -7,74 | | -5,82 | 0,031 | -22,50 | 0,223 | +60,99 |
| Corte 4mm | 30,13 | -7,12 | | -5,19 | 0,038 | -5,00 | 0,212 | +58,96 |
| Corte 5mm | 29,81 | -8,36 | | -6,20 | 0,029 | -27,50 | 0,228 | +61,84 |

Onde: ω = frequência natural; ξ = amortecimento; (+) = aumento; (-) = redução

Fonte: Autor.

Corte de 2 mm de profundidade em L/3

Ao inserir o primeiro dano em L/3 é possível observar que as acelerações de pico-a-pico são maiores que 0,15g e indicam um *DI* positivo. Após o uso do filtro Butterworth, as acelerações apresentam valores menores que 0,15g e indicam um *DI* negativo.

Para a frequência natural, os valores máximo e mínimo foram 30,46 Hz e 28,90 Hz, respectivamente, e representam uma variação de 5,12%. O valor médio de frequência natural foi de 29,74 Hz e representa uma redução de 8,32% em relação à condição intacta obtida pelo mesmo sensor e; 6,42% em relação ao obtido pelo *ST Microelectronics* para a mesma condição.

O amortecimento assumiu valores máximo e mínimo de 0,04% e 0,018%, respectivamente e representa uma variação de 55%. O valor de amortecimento médio foi de 0,025% e representa uma redução de 37,5% em relação à condição intacta.

O índice D_{ifreq} adotou valores máximo e mínimo de 0,275 e 0,195, respectivamente, e representam uma variação de 29,09%. O valor D_{ifreq} médio foi de 0,232 e representa um aumento de 62,50% em relação à condição intacta.

O *SNR* indicou uma atenuação próxima a -15 dB e indica a melhora da qualidade do sinal.

Corte de 4 mm de profundidade em L/3

O aumento da profundidade do corte para 4 mm em L/3 indicou o mesmo comportamento obtido anteriormente: as acelerações pico-a-pico inicialmente possuem valores maiores que 0,15g e *DI* positivo e posterior à aplicação do filtro Butterworth, apresentam valores menores que 0,15g e *DI* negativo.

Os valores máximo e mínimo de frequência natural foram de 30,27 Hz e 29,89 Hz, respectivamente, e representam uma variação de 1,21%. A frequência natural média foi de 30,14 Hz e indica uma diminuição de 7,09% em relação à condição intacta obtida pelo mesmo sensor e; 5,16% em relação ao obtido pelo *ST Microelectronics*.

Os valores de amortecimento máximo e mínimo foram de 0,064% e 0,018% e indicam uma variação de 71,87%. O amortecimento médio foi de 0,038% e indica uma diminuição de 5% em relação à condição intacta.

Os valores DI_{freq} máximo e mínimo foram de 0,225 e 0,206, respectivamente, e representam uma variação de 8,44%. O valor DI_{freq} médio foi de 0,205 e representa um aumento de 57,56%.

O *SNR* indicou a ocorrência de uma atenuação próxima de -15 dB e significa a melhoria da qualidade do sinal.

Corte de 5 mm de profundidade em L/3

Ao atingir 5 mm de profundidade, os valores de aceleração de pico-a-pico também apresentaram o comportamento identificado na fase de dano anterior.

Os valores máximo e mínimo de frequência natural foram de 30,55 Hz e 29,56 Hz, respectivamente, e representam uma variação de 3,24%. O valor de frequência médio foi de 29,99 Hz e representa uma redução de 7,55% em relação à condição intacta e; 5,63% em relação ao valor obtido pelo *ST Microelectronics*.

Os valores máximo e mínimo do amortecimento foram de 0,231% e 0,018% e indicam uma variação de 92,21%. O valor do amortecimento médio foi de 0,092% e representa um aumento de 56,52% em relação à condição intacta para o mesmo sensor.

Os valores máximos de DI_{freq} foram de 0,242 e 0,190, respectivamente, e representam uma variação de 21,49%. O valor DI_{freq} médio foi de 0,219 e representa um aumento de 60,27%.

O valor *SNR* indicou uma atenuação próxima de -15 dB e representa a melhoria da qualidade do sinal. A Tabela 70 apresenta os valores médios obtidos para os danos inseridos em L/3 e a comparação com a condição intacta.

Tabela 70: Valores médios obtidos para os danos inseridos em L/3 – *WitMotion*

| Condição | ω (Hz) | Diferença (%) | ω (Hz) | Diferença (%) | ξ (%) | Diferença (%) | Dl_{freq} | Diferença (%) |
|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------------|------------------|-------------|------------------|
| Intacta | 32,44 | - | 31,78 | | 0,04 | - | 0,087 | - |
| Corte 2mm | 29,74 | -8,32 | | -6,42 | 0,025 | -37,50 | 0,232 | +62,50 |
| Corte 4mm | 30,14 | -7,09 | | -5,16 | 0,038 | -5,00 | 0,205 | +57,56 |
| Corte 5mm | 29,99 | -7,55 | | -5,63 | 0,092 | +56,52 | 0,219 | +60,27 |

Onde: ω = frequência natural; ξ = amortecimento; (+) = aumento; (-) = redução

Fonte: Autor.

Corte de 2 mm de profundidade em 3L/4

O corte de 2 mm de profundidade em 3L/4 também apresentou características já mencionadas no texto: acelerações de pico-a-pico naturais maiores que 0,15g e Dl positivo e, posterior à aplicação do filtro Butterworth, valores menores que 0,15g e Dl negativo.

Os valores máximo e mínimo de frequência natural foram de 30,33 Hz e 29,37 Hz, respectivamente, e representam uma variação de 3,16%. O valor de frequência natural média foi de 29,82 Hz e representa uma redução de 8,08% em relação à condição intacta obtida pelo mesmo sensor e; 6,17% em relação ao obtido pelo *ST Microelectronics*.

Os valores máximo e mínimo de amortecimento foram 0,037% e 0,026%, respectivamente, e representam uma variação de 29,73%. O valor do amortecimento médio foi de 0,030% e representa uma redução de 25% em relação à condição intacta obtida pelo mesmo sensor.

O índice Dl_{freq} apresentou valores máximo e mínimo de 0,251 e 0,202, respectivamente, e representam uma variação de 19,52%. O valor médio de Dl_{freq} foi de 0,229 e indica um aumento de 62,01% em relação à condição intacta.

O valor SNR indicou uma atenuação próxima de -15 dB e significa a melhora do sinal após a passagem do filtro.

Corte de 4 mm de profundidade em 3L/4

Os valores máximo e mínimo de frequência natural foram de 30,24 Hz e 29,57 Hz e representam uma variação de 2,21%. A frequência natural média foi de 29,90 Hz e representa uma redução de 7,83% em relação à condição intacta obtida através da análise dos dados extraídos com o mesmo sensor e; 5,91% para os dados da mesma condição de saúde obtidos por meio do *ST Microelectronics*.

Para o amortecimento, os valores máximo e mínimo, foram de 0,038% e 0,016%, respectivamente, e representa uma variação de 57,89%. O valor do

amortecimento médio foi de 0,030% e indicou uma redução de 25% em relação à condição intacta obtida pelo mesmo sensor.

O índice Dl_{freq} obteve valores máximo e mínimo de 0,241 e 0,206, respectivamente, o que representa uma variação de 14,52%. O valor Dl_{freq} médio foi de 0,224 e representa um aumento de 61,16% em relação à condição intacta obtida pelo mesmo sensor.

O valor SNR indicou um valor aproximado de -15 dB, o que significa que o sinal melhorou de qualidade após o uso do filtro Butterworth.

Corte de 5 mm de profundidade em 3L/4

As frequências naturais máxima e mínima assumiram valores iguais a 30,30 Hz e 29,74 Hz, respectivamente, e representam uma variação de 1,85%. O valor médio assumido por esta propriedade foi de 30,11 Hz e representa uma diminuição de 7,18% em relação à condição intacta obtida pelo mesmo sensor e; 5,25% em relação ao obtido pelo *ST Microelectronics* para a mesma condição.

Para o amortecimento, os valores máximo e mínimo, foram de 0,038% e 0,019% e representam uma variação de 50%. O valor do amortecimento médio foi de 0,031% e representa uma redução de 22,5% em relação à condição intacta.

Os valores máximo e mínimo para o índice Dl_{freq} foram de 0,233 e 0,203, respectivamente, e representam uma variação de 12,87%. O valor médio assumido por Dl_{freq} foi de 0,213 e representa um aumento igual a 59,15% em relação ao obtido pelo mesmo sensor para a condição intacta.

O valor SNR indicou um valor negativo próximo a -15 dB, o que representa a melhoria da qualidade do sinal.

A Tabela 71 apresenta os valores médios obtidos e as diferenças definidas em relação à condição intacta para os dados extraídos com o sensor *WitMotion*.

Tabela 71: Valores médios obtidos para os danos inseridos em 3L/4 - *WitMotion*

| Condição | ω (Hz) | Diferença (%) | ω (Hz) | Diferença (%) | ξ (%) | Diferença (%) | Dl_{freq} | Diferença (%) |
|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------------|------------------|-------------|------------------|
| Intacta | 32,44 | - | 31,78 | | 0,040 | - | 0,087 | - |
| Corte 2mm | 29,82 | -8,08 | | -6,17 | 0,030 | -25,00 | 0,229 | +62,01 |
| Corte 4mm | 29,90 | -7,83 | | -5,91 | 0,030 | -25,00 | 0,224 | +61,16 |
| Corte 5mm | 30,11 | -7,18 | | -5,25 | 0,031 | -22,50 | 0,213 | +59,15 |

Onde: ω = frequência natural; ξ = amortecimento; (+) = aumento; (-) = redução

Fonte: Autor.

6 CONCLUSÕES

Os aspectos comuns aplicados aos viadutos e à viga T foram o uso do smartphone, a correção da taxa de amostragem e a calibração do acelerômetro. O aparelho se mostrou apto, pois fez a leitura, o registro e o armazenamento das amostras de aceleração.

As etapas de correção de taxa de amostragem e calibração foram fundamentais, pois estes dispositivos não são criados para a finalidade do monitoramento.

6.1 Metodologia executada nos viadutos

Ao observar a metodologia executada nos viadutos, pode-se classificar as atividades como um sistema de monitoramento estrutural tal qual é apresentado por Kromanis (2020). Este sistema é composto por: sistema estrutural; fonte de excitação; coleta de dados; análise de dados; engenharia; tomada de decisões e; intervenções. Esta afirmação considera a metodologia desenvolvida e não a qualidade dos métodos aplicados.

Por sistema estrutural têm-se os viadutos V1 e V2; a fonte de excitação é operacional e tem origem no tráfego de veículos pesados; a coleta de dados é realizada por um celular; a análise de dados abrange a preparação a partir da correção da taxa de amostragem, calibração do aparelho, definição das propriedades dinâmicas, criação do modelo numérico e definição dos indicadores de danos; a parte da engenharia define a avaliação da condição e julgamento do engenheiro. Entretanto, nenhuma atividade referente a tomada de decisão e a possível intervenção foi realizada a partir dos resultados obtidos.

É importante ressaltar que o uso de mais de um método de indicação de dano permitiu comparar os resultados. Além disso, embora apresentem um grau de imprecisão desconhecido entre as respostas finais, convergiram para um mesmo indicativo: sem danos ou com danos em estágio inicial para o viaduto V1. Esta conclusão também pode ser amparada pela inspeção visual.

Através da análise dos resultados, características das respostas obtidas podem ser verificadas. O viaduto V1 apresenta valores de aceleração pico-a-pico maior que

V2 e; a resposta em queda logarítmica apresentou picos com melhor definição para V1, o que auxiliou na definição do amortecimento.

Observações como estas devem ser realizadas ao utilizar um smartphone como equipamento básico, pois, segundo Feldbusch, Sadegh-Azar e Agne (2017), resultados mais precisos são obtidos para acelerações de maior amplitude. Acredita-se, assim, que os valores obtidos para V1 apresentam-se mais corretos que quando comparados a V2.

A etapa de verificação dos resultados a partir do uso dos métodos *SSI-COV* e *SSI-DATA* indicaram que a metodologia aplicada na avaliação apresenta resultados aproximados para o viaduto V1. Esta mesma constatação é realizada para os resultados obtidos com o método *EFDD*.

Entretanto, ao analisar as respostas obtidas em V2, o método aplicado na avaliação indicou a maior ocorrência de uma frequência natural mais próxima a 6 Hz e foi incapaz de indicar frequências próximas a 5 Hz, tal qual os métodos *SSI* e *EFDD*. Estes resultados demonstram que o método aplicado para a avaliação não é totalmente efetivo. A menor aceleração atuante sobre V2 e a fragilidade do método de identificação de picos ou *Peak Picking* podem ser consideradas como hipóteses para às falhas de identificação.

Ainda assim, no processamento de verificação a partir dos métodos de identificação estocástica e do *EFDD* é possível visualizar a ocorrência de picos de frequências de 6 Hz e 16 Hz, valores que o método de avaliação já havia identificado.

Quanto ao amortecimento obtido através dos métodos *SSI*, valores mais próximos àqueles indicados na literatura para pontes foram definidos em modelos estabilizados em relação à frequência natural, amortecimento e formas modais para os dois viadutos. Para o método *EFDD*, os valores de amortecimento se apresentaram, em geral, próximos aqueles verificados na literatura. Como estes métodos foram utilizados apenas para a verificação, o comparativo de respostas não alterou o resultado da avaliação aplicada aos viadutos.

Diferente de Casas e Moughty (2017), os quais utilizaram 12 obras de arte especial para testar os métodos de avaliação que utilizam os índices de dano com base na aceleração pico-a-pico e na frequência natural, apenas dois viadutos foram utilizados e estes apresentaram a classificação da condição bastante similar. Em um cenário ideal, um número maior de estudos de caso deveria ser utilizado.

O uso da aceleração pico-a-pico apresentado neste trabalho deve ser aplicado apenas aos viadutos com padrão brasileiro já identificado por outros autores. Para

outros estudos de caso é indicado o uso do método que considera a variação da frequência. Mesmo assim, uma análise cuidadosa do método de avaliação a ser utilizado deve ser realizada.

Um aspecto negativo pode ser identificado a partir dos valores do índice de vibração V . Este parâmetro não foi capaz de indicar nenhum nível de dano e assumiu em todas as amostras realizadas valores negativos.

Além disso, vale ressaltar que existem aspectos que podem ser melhorados no trabalho, por exemplo, a quantidade de sensores utilizados. Como apenas um celular foi utilizado, é impossível o conhecimento das formas modais a partir dos dados extraídos. Portanto, a comparação entre as fases numéricas e experimentais considerou apenas os valores obtidos por frequências naturais e taxas de amortecimento.

Por fim, em um país como o Brasil, que possui um número desconhecido de OAEs com características de projeto heterogêneas, o uso do smartphone poderia se justificar. Foram apresentadas neste texto as características do smartphone, métodos de correção de taxa de amostragem, calibração, definição das frequências naturais e taxas de amortecimento, além da criação de modelos numéricos e métodos de classificação do dano que podem ser vistos como um exemplo da aplicação do smartphone para auxiliar o monitoramento e gestão da infraestrutura civil.

6.2 Metodologia executada na viga T

A metodologia aplicada à viga T é similar àquela empregada aos viadutos. Porém, devido à fonte de excitação ser experimental e ocorrer através do funcionamento do motor de vibração, não permitiu a realização do *RDT*.

Para os modelos numéricos, a etapa de teste realizada a partir da viga com o elemento BEAM189 se apresentou como fundamental, pois permitiu o conhecimento do deslocamento máximo a partir de um carregamento definido de forma deliberada e auxiliou a definir o tamanho da malha.

Em relação aos resultados numéricos, o modelo em casca apresentou valores mais aproximados aos obtidos na etapa experimental. Destacam-se aspectos a serem considerados para trabalhos futuros como a simulação das armaduras no modelo sólido e dos defeitos inseridos de forma proposital à viga T.

Os dados processados apresentaram a diminuição da frequência natural ao incidir danos sobre a estrutura e a variação do amortecimento. Ainda não foi possível identificar qualquer relação entre as características geométricas ou propriedades do material da viga T e o valor final assumido pelo amortecimento.

Dos indicadores de dano utilizados, aquele que considera a variação da frequência aparenta ser mais adequado já que pode ser facilmente associado tanto a uma estrutura real quanto a um modelo em escala. Esta observação é útil para DI_{freq} , que utiliza as frequências numéricas e experimentais.

Na etapa de verificação de resultados a partir do uso dos métodos estocásticos, a viga T intacta apresentou frequências mais altas que quando comparada à condição com a existência do dano. Na maioria das amostras processadas pelo *SSI-COV* e *SSI-DATA* pode-se observar a existência de quatro modos próximos a 30 Hz, 60 Hz, 90 Hz e 120 Hz.

Na etapa de verificação a partir do método *EFDD* foram obtidos valores de frequências naturais próximos aqueles já definidos pelos métodos *SSI*. Porém, os valores obtidos para o amortecimento são maiores que em comparação com os mesmos métodos. Acredita-se que esta variação decorra de etapas manuais que exigem a seleção de pontos de interesse nos gráficos fornecidos pelo método *EFDD* enquanto que os métodos *SSI* são automáticos e não sofrem influência do operador.

A partir da definição das frequências naturais através da formulação analítica, a viga T possui frequências naturais próximas a 30 Hz, no primeiro modo, e 120 Hz no segundo. A análise dos gráficos sugere que os picos de 60 Hz e 90 Hz se referem a dois modos de funcionamento do motor. Porém, não é possível afirmar estas constatações sem maiores investigações.

A comparação entre as frequências experimentais na condição intacta e após a inserção de danos obtidas pelo *Vibration Alarm* indicou uma diminuição mínima de 7% e; em relação ao *ST Microelectronics*, a redução foi da ordem de 5%. Esta faixa de variação também foi apresentada pelo acelerômetro *WitMotion*. Valores desta magnitude já poderiam, portanto, ser associados à presença de danos em estruturas.

Devido à variação do amortecimento, nenhuma constatação pode ser realizada.

REFERÊNCIAS

ABDELGAWAD, A; MAHMUD, A; YELAMARTHI, K. Butterworth Filter Application for Structural Health Monitoring, **International Journal of Handheld Computing Research**, p.15-29, 2016. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.4018/IJHCR.2016100102> >

AGDAS, D; RICE, A, J; MARTINEZ, R, J; LASA, R, I. Comparison of visual inspection and structural-health monitoring as bridge condition assessment methods, **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 30, p. 1-10, 2016. Disponível em: < [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000802](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000802) >

AKBARI, R; MAADANI, S; MAALEK, S. On the fundamental natural frequency of bridge decks: review and applications, **Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings**, p. 1-15, 2018. Disponível em: < <https://doi.org/10.1680/jstbu.17.00102> >

ALAMPALLI, S; FRANGOPOLO, M, D; GRIMSON, J; HALLING, W, M; KOSNIK, E, D; LANTSOGH, O, E; YANG, D; ZHOU, E, Y. Bridge Load Testing: State-of-the-Practice, **Journal of Bridge Engineering**, v. 26, p. 1-17, 2021. Disponível em: < [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001678](http://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001678) >

AN, Y; CHATZI, E; SIM, S; LAFLAMME, S; BLACHOWSKI, B; OU, J. Recent progress and future trends on damage identification methods for bridge structures, **Struct Control Health Monit.**, p. 1-30, 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1002/stc.2416> >

ANDROID DEVELOPERS. Sensors Overview, [201-] sem data. Disponível em: < https://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors_overview >. Acesso em: 08/07/2018

ANSYS, Inc. ANSYS Mechanical APDL Element Reference, Southpointe, SAS IP, Inc, 2013.

ANSYS, Inc. Ansys: theory reference, SouthPointe, USA, 1999.

APPtodate. Manual – myFrequency, 2017. Disponível em: <
<https://myfrequency.jimdofree.com/app/download/8345286175/Manual.pdf> >

ARAUJO, V, R, J, C. Principais aspectos abordados na ABNT NBR 9452:2016, a importância das atividades de manutenção em pontes e viadutos e as dificuldades das condições de acesso às inspeções, **Revista IPT | Tecnologia e Inovação**, v.1, p. 17-40, 2017.

ARCHER, A. **Investigation of Three-Axis Accelerometer Calibration Techniques**, University of Iowa (Trabalho de conclusão), 2017.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS – ASCE. 2021 Report card for America's infrastructure: a comprehensive assessment of america's infrastructure, 2021.

ASMUSSEN, J, C. **Modal analysis based on the Random Decrement Technique – Application to Civil Engineering Structures**, Aalborg Univeristy, Dinamarca (Tese de doutorado), 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118/2014 - Projeto de estruturas de concreto – procedimento**, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9452/2019 – Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto – Procedimento**, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15307/2005 - Ensaio não destrutivo – Provas de cargas dinâmicas em grandes estruturas - Procedimento**, 2006.

ATMACA, B. **Comparison of Dynamic Characteristics of Prestressed and Reinforced Concrete Beams**, Düzce University Journal of Science & Technology, v. 7, 9. 37-44, 2019.

BACHMANN, H; J. AMMANN, J, W; DEISCHI, F; EISENMANN, J; FLOEGL, I; HIRSCH, H, G; KLEIN, K, G; LANDE, J, G; MAHREHOLTZ, O; NATKE, G, H; NUSSBAUMER, H; PRETLOVE, J, A; RAINER, H, J; SAEMANN, E; STEINBEISSER, L. **Vibration Problems in Structures: Practical Guidelines**. Basel: Birkhäuser Verlag 1995. ISBN-13- 978-3-0348-9955-0. Disponível em: < <http://doi.org/10.1007/978-3-0348-9231-5> >

BARR, B; LAWAL, A, S. Failure of Concrete Structures, **Reference Module in Materials Science and Materials Engineering**, p. 1-24, 2018. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11525-5> >

BATHE, K. **Finite Element Procedures**, ed. 2nd, Watertown, Pearson Education, Inc., 2014. ISBN 978-0-9790049-5-7

BATTISTA, C, R. **Revisão da norma da ABNT NBR-6123/1988: Capítulo 11 - Ação do Vento em Pontes – Fundamentos, comentários e referências**, Revisão 04: 5, 2021

BERGSTRÖM, M. **Assessment of existing concrete bridges: bending stiffness as a performance indicator**. Luleå University of Technology, Sweden (Tese de doutorado), 2009.

BREWICK, T, P. **Improving the Quantification and Estimation of Damping for Bridges under Traffic Loading**, Columbia University, New York, 2014. 197 p. Tese de doutorado. Bibliografia: p. 156-164.

BRINCKER, R; VENTURA, C. E.; ANDERSEN, P. Damping estimation by frequency domain decomposition, In Proceedings of IMAC 19: A Conference on Structural Dynamics, Florida, 2001.

BURDET, L, O; CORTHAY, S. Dynamic Load Testing of Swiss Bridges, **IABSE reports**, 1995.

BUKSH, A, Z; STIPANOVIC, I; KLANKER, G; O' CONNOR, A; DOREE, G, A. Network level bridges maintenance planning using Multi-Attribute Utility Theory, **Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance**, v. 15, p. 1-14, 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1080/15732479.2017.1414858> >

CANTIENI, R. Dynamic Load Testing of Highway Bridges, **IABSE PERIODICA**, v. 3, p. 75-84, 1984. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.5169/seals-38337> >

CAO, L; CHEN, J. Online investigation of vibration serviceability limitations using smartphones, **Measurement**, v. 162, p. 1-10, 2020. Disponível em: <<http://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107850>>

CAO, S, M; SHA, G, G; GAO, F, Y; OSTACHOWICZ, W. Structural damage identification using damping: a compendium of uses and features, **Smart Materials and Structures**, v. 26, n. 4, p. 1-14, 2017. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1088/1361-665X/aa550a> >

CARINI, R, M. **Identificação das Propriedades Dinâmicas de Estruturas submetidas a Ações Ambientais**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, (Tese de doutorado), Porto Alegre, Brasil, 2021

CASAS, R, J; MOUGHTY, J, J. Bridge Damage Detection Based on Vibration Data: Past and New Developments, **Frontiers in Built Environment**, v. 3, p. 1-12, 2017. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.3389/fbuil.2017.00004> >

CASAS, R, J; RODRIGUES, F. Bridge Condition and Safety Based on Measured Vibration Level. In: **IABSE Workshop: Safety, Robustness and Condition Assessments of Structures**, Helsinki, Finland, 2015.

CASTELLANOS-TORO, S; MARMOLEJO, M; MARULANDA, J; CRUZ, A; THOMSON, P. Frequencies and damping ratios of bridges through Operational Modal Analysis using smartphones, **Construction and Building Materials**, p. 490-504, 2018. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.089> >

CAVALCANTI, B, M; TORRES, M, S; FILHO, L, F, R, M; dos SANTOS, V, J, A. Evaluation of rheological models for concrete submitted to alkali-aggregate reaction based on numerical analysis of damping - free expansion, **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, v. 14, p. 1-18, 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.1590/S1983-41952021000200005> >

CHEN, W, G; BESKHYROUN, S; OMENZETTER, P. Experimental and analytical modal analysis of a multiple-span motorway bridge. In: **Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials - ACMSSM**, 23th, Byron Bay, Australian, 2014.

CHOPRA, K, A. **Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering**, ed. 4, Prentice Hall, 2012. ISBN 13: 978-0-13-285803-8

CLOUGH, W, R; PENZIEN, J. **Dynamics of structures**, 3 ed., Berkeley: Computers & Structures, Inc., 2003.

COLE, A, H. On-line failure detection and damping measurement of aerospace structures random decrement signatures, **NASA CR-2205**, 1973.

CONSUEGRA, A, F; SANTOS, C. Vibration analyses for the local and global evaluation of bridges as a tool for structural retrofit, **Journal of Construction**, v. 14, p. 16-22, 2015.

COOK, D, R; MALKUS, S, D; PLESHA, E, M; WITT, J, R. **Concepts and applications of finite element analysis**, 4th ed., Madison: John Wiley & Sons, INC, 2001. ISBN 978-0-471-35605-9.

CURADELLI, O, R; RIERA, D, J; AMBROSINI, D; AMANI, G, M. Damage detection by means of structural damping identification, **Engineering Structures**, v.30, p. 3497-3504, 2008. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.05.024> >

DAMMIKA, J, A; KAWARI, K; YAMAGUCHI, H; MATSUMOTO, Y. Analytical damping evaluation complementary to experimental structural health monitoring of bridges,

Journal of Bridge Engineering, v. 20, p. 1-12, 2015. Disponível em: < [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000691](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000691) >

de SOUZA, G, M; CICOGNA, R, T; CHIQUITO, J, A. Excitação dos modos normais de um sistema usando um motor desbalanceado, **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 1, p. 5-10, 2007.

DEITEL, P; DEITEL, H. **Java™: How to program**, Ed. 9, United States of America, Prentice Hall, 2011. ISBN 978-0-13-257566-9

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Norma DNIT 010/2004 PRO: Inspeção de pontes e viadutos de concreto armado e protendido – Procendimento**, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES – DNIT. Manual de inspeção de pontes rodoviárias. Rio de Janeiro: IPR, Publicações, p. 253, 2004.

DING, Y; HAN, R; LIU, H; LI, S; ZHAO, X; YU, Y. Bridge inspection and management system based on smart phone. **In: Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems - SMASIS**, 2016. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1115/SMASIS2016-9067> >

EMPRESA GAÚCHA DE RODOVIAS - EGR. Manual de inspeção de obras de arte – EGR. Porto Alegre, 2018, 53 p.

ERCOLESSI, S; FABBROCINO, G; RAINIERI, C. Indirect Measurements of Bridge Vibrations as an Experimental Tool Supporting Periodic Inspections, **Infrastructures**, v. 6, p. 1-16, 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.3390/infrastructures6030039> >

ERHUNMWUN, I; IKPONMWOSA, U. **Review on Finite Element Method**, Journal of Applied Sciences and Environmental Management, p. 999-1002, 2017. Disponível em: < <https://dx.doi.org/10.4314/jasem.v21i5.30> >

EWINS, J, D. **Modal testing: theory, practice and application**, Research Studies Press Ltd, England, 2 ed, p.1-562, 2000. ISBN 978-0471904724

FARRAR, R, C; WORDEN, K. An introduction to structural health monitoring, **Phil. Trans. R. Soc. A**, v. 365, p. 303-315, 2007. Disponível em: < <http://doi.org/10.1098/rsta.2006.1928> >

FEDERAL HIGHWAY ASSOCIATION – FHWA. **Bridge Inspector's Reference Manual**. Printing Office, Washington, 2004 p, 2012.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION – FHWA. **State of the Practice and Art for Structural Health Monitoring of Bridge Substructures**. Virginia: Research, Development, and Technology, Maio de 2014.

FELDBUSCH, A; SADEGH-AZAR, H; AGNE, P. Vibration analysis using mobile devices (smartphones or tablets), **Procedia Engineering**, v. 199, p. 2790-2795, 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.543> >

FENG, D; SHI, X; RUAN, X. Actual Stiffness Identification of Constructed Bridges. **In: International Symposium on Bridge and Structural Engineering**, 34th, Venice, Itália, 2010.

FENG, M; FUKUDA, Y; MIZUTA, M; OZER, E. Citizen sensors for SHM: use of accelerometer data from smartphones, **Sensors**, p. 2980-2998, 2015. Disponível em: < <http://doi.org/10.3390/s150202980> >

FRANGOPOL, M, D; DONG, Y; SABATINO, D. Bridge life-cycle performance and cost: analysis, prediction, optimisation and decision-making, **Structure and Infrastructure Engineering**. p. 1-19, 2017. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1080/15732479.2016.1267772> >

FRANS, R; ARFIADI, Y; PARUNG, H. Comparative study of mode shapes curvature and damage locating vector methods for damage detection of structures, **Procedia Engineering**, p. 1263-1271, 2017. Disponível em: < <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.420> >

FRIZZARIN, M; FENG, Q, M; FRANCHETTI, P; SOYOZ, S; MODENA, C. Damage detection based on damping analysis of ambient vibration data, **Structural Control and Health Monitoring**, v. 17, p. 368-385, 2010. Disponível em: < <https://dx.doi.org/10.1002/stc.296> >

GALETTO, M; SCHIAVI, A; B, GENTA, G; PRATO, A; MAZZOLENI, F. Uncertainty evaluation in calibration of low-cost digital MEMS accelerometers for advanced manufacturing applications, **CIRP Annals**, v. 68, p. 535-538, 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.097> >

GALLWEY, T, J; DRURY, G, C. Task Complexity in Visual Inspection, **Human Factors**, p. 595-606, 1986. Disponível em: < <https://doi.org/10.1177/001872088602800509> >

GATTI, M. Structural health monitoring of an operational bridge: A case study, **Engineering Structures**, v. 195, p. 200-209, 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.05.102> >

GIBBS, M, M; KWON, K, D; KAREEM, A. Data-Enabled Prediction Framework of Dynamic Characteristics of Rural Footbridges Using Novel Citizen Sensing Approach, **Front. Built Environ.**, vol. 5, p. 1-18, 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.3389/fbuil.2019.00038> >

GKOUMAS, K; MARQUES DOS SANTOS, F,L; VAN BALEN, M; TSAKALIDIS, A; ORTEGA HORTELANO, A; GROSSO, M; HAQ, G; PEKÁR, F. **Research and innovation in bridge maintenance, inspection and monitoring - A European perspective based on the Transport Research and Innovation Monitoring and Information System (TRIMIS)**, EUR 29650 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.2760/719505> >

HAFIZ, A; SCHUMACHER, T. Effects of elastic supports and flexural cracking on low and high order modal properties of a reinforced concrete girder, **Engineering Structures**, v. 178, p. 573-585, 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.10.041> >

HANLY, S. Accelerometers: Taking the Guesswork out of Accelerometer Selection, **Midé Engineering Solutions**. Março. 2016. Disponível em: < <https://blog.mide.com/accelerometer-selection> >. Acesso em: 02/09/2018

HE, J; FU, Z. **Modal Analysis**. 1. ed. Oxford: University of Oxford, Reino Unido: ButterWorth-Heinemann, 2001. ISBN 0 7506 5079 6

HURT, M; SCHROCK, D, S. **Highway bridge maintenance planning and scheduling**. 1 Ed. Reino Unido: Elsevier, p. 337, 2016. ISBN: 978-0-12-802069-2.

KAMIŃSKI, T. **Defects and failures influencing the mechanical performance of bridge structures**, *Procedia Engineering*, 9. 1260-1267, 2016. Disponível em: < <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.565> >

KHAN, Z, W; XIANG, Y; AALSALEM, Y, M; ARSHAD, Q. Mobile Phone Sensing Systems: A Survey, **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 15, p. 1-26, 2012. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1109/SURV.2012.031412.00077> >

KIESER, R; REYNISSON, P; MULLIGAN, J, T. Definition of signal-to-noise ratio and its critical role in split-beam measurements, **ICES Journal of Marine Science**, v. 62, p. 123- 130, 2005. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2004.09.006> >

KIM, S; KIM, H. Damping identification of bridges under nonstationary ambient vibration, **Engineering**, p. 839-844, 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.11.002> >

KROMANIS, R. **Health monitoring of bridges**, in PACHECO-TORGAL, F; RASMUSSEN, E; GRANQVIST, C; IVANOV, V; KAKLAUSKAS, A; MAKONIN, S. *Start-Up Creation: the Smart Eco-Efficient Built Environment*, 2 ed., Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, p. 369-389, 2020. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819946-6.00014-X> >

KUHLMANN, T; GARAIZAR, P; REIPS, U. Smartphone sensor accuracy varies from device to device in mobile research: The case of spatial orientation, *Behavior Research Methods*, 2020. Disponível em: < [http://doi.org/ 10.3758/s13428-020-01404-5](http://doi.org/10.3758/s13428-020-01404-5) >

KUYUK, S, H; AKTAS, M; YILMAZ, C; AGCAKOCA, E; CELEBI, E. Reliability of using smart phones sensors as an experimental instrument on steel bridge. **In: European Conference on Earthquake Engineering and Seismology**, 2 ed., Istanbul, 2014.

LATHI, P, B; GREEN, R. **Essentials of digital signal processing**, 1 ed., Cambridge University Press: New York, 2014. ISBN 978-1-107-05932-0.

LI, P; WANG, Y; LIU, B; SU, L. Damping Properties of Highway Bridges in China, **Journal of Bridge Engineering**, v. 19, 2014. Disponível em: < [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000578](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000578) >

LIN, F; SCHERER, J, R. **Concrete bridge damage detection using parallel simulation**, *Automation in Construction*, v. 119, p. 1-14, 2020. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103283> >

LIN, W; YODA, T. **Bridge engineering: classifications, design loading, and analysis methods**. 1 Ed., Reino Unido: Elsevier, 2017. ISBN 978-0-12-804432-2

LIU, P; CHEN, Y; YU, Z; LU, Z; SHI, W. Evolution of the dynamic properties of concrete in a sulfate environment, **Construction and Building Materials**, v. 245, p. 1-13, 2020. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118468> >

ŁUCZAK, S. Novel algorithm for tilt measurements using MEMS accelerometers, **MATEC Web of Conferences**, v. 157, 2018. Disponível em: < <http://doi.org/10.1051/mateconf/201815708005> >

MACDONALD, S. **Concrete: building pathology**, 1 ed., Blackwell Science Ltd, 309 p. 2003. ISBN 0-632-05251-1

MADENCI, E; GUVEN, I. **The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS®**, ed. 2, Springer, USA, 2015. Disponível em: < <http://doi.org/10.1007/978-1-4899-7550-8>>

MAHMUD, A; ABDELGAWAD, A; YELAMARTHI, K; ISMAIL, A, Y. Signal Processing Techniques for IoT-based Structural Health Monitoring, **In: International Conference on Microelectronics (ICM)**, 29th, Beirut, 2017. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1109/ICM.2017.8268825> >

MAKARIOS, K, T. **Identification of Eigen-Frequencies and Mode-Shapes of Beams with Continuous Distribution of Mass and Elasticity and for Various Conditions at Supports**, In: RYOO, S, C. Number Theory and Its Applications, IntechOpen, ed. 1, 2020. Disponível em: < <http://doi.org/10.5772/intechopen.92185> >

MANIKANDAN, G, K; PANNIRSELVAM, K; KENNED, J, J; KUMAR, S, C. Investigations on suitability of MEMS based accelerometer for vibration measurements, **Materials Today: Proceedings**, Materials today: Proceedings, 2020. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.506> >

MATARAZZO, T; VAZIFEH, V; PAKZAD, S; SANTI, P; RATTI, C. Smartphone data streams for bridge health monitoring. **In: International Conference on Structural Dynamics - EURODYN**, 10th, 2017, Itália.

MATARAZZO, J, T; KONDOR, D; SANTI, P; MILARDO, S; ESHKEVARI, S, S; PAKZAD, N, S; RATTI, C. **Crowdsourcing Bridge Vital Signs with Smartphone Vehicle Trips**, Computers and Society; Applied Physics, 2020.

McROBBIE, G, S; WRIGHT, A, M; CHAN, A. Can technology improve routine visual bridge inspections? **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, p. 197-207, 2015. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1680/jbren.12.00022> >

MEGAW, D, E. Factors affecting visual inspection accuracy, **Applied Ergonomics**, v.10, p.27-32, 1979. Disponível em: < [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(79\)90006-1](https://doi.org/10.1016/0003-6870(79)90006-1) >

MEI, Q; GÜL, M. A crowdsourcing-based methodology using smartphones for bridge health monitoring, **Structural Health Monitoring**, v. 18, p. 1602-1619, 2019. Disponível em: < <http://doi.org/10.1177/1475921718815457> >

MENDES, C, T, P. **Contribuições para um modelo de gestão de pontes de concreto aplicado à rede de rodovias brasileiras**. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo (Tese de doutorado), 2009.

MILLER, A; SBURLATI, D; DUSCHLBAUER, D. Accelerometer mounting – comparison of stud and magnetic mounting methods, In: **Hear to Listen: acoustics**, Adelaide, Australia, 2018.

MOORE, M; PHARES, B; GRAYBEAL, B; ROLANDER, D; WASHER, G. **Reliability of Visual Inspection for Highway Bridges**, Volume I: Final Report, Federal Highway Administration, p.1 -118, 2001. Report No. FHWA-RD-01-020

MORGENTHAL, G; EICK, F, J; RAU, S; TARABEN, J. Wireless Sensor Networks Composed of Standard Microcomputers and Smartphones for Applications in Structural Health Monitoring, **Sensors**, v. 19, p. 1-22, 2019. Disponível em: < <http://doi.org/10.3390/s19092070> >

MORIYOSHI, A, SHIBATA, E; NATSUHARA, M; SAKAI, K; KONDO, K; KASAHARA, A. Deterioration of modern concrete structures and asphalt pavements by respiratory action and trace quantities of organic matter, **PLoS ONE**, v. 16, p. 1-29, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249761>

MULITERNO, K, B; MULITERNO JR, F; PRAVIA, C, M, Z. Avaliação da irregularidade longitudinal do pavimento sobre pontes usando acelerações medidas por smartphones, **Transportes**, v.27, p. 182-193, 2019. Disponível em: < <http://doi.org/10.14295/transportes.v27i2.1686> >

NAKAJIMA, A; ALSEHNAWI, R; TAKESHIMA, R; AL SADEQ, H. Vibration amplitude - dependent natural frequency and damping ratio of repaired pier model. In: **European workshop on structural health monitoring**, 7th, 2014, NANTES, p. 1639.

NAWROCKI, W. **Measurement Systems and Sensors**, 2 ed., Norwood: Artech House, 2016. ISBN 13: 978-1-60807-932-2

NEWMARK, M, N; HALL, J, W. Earthquake Spectra and Design, 1 ed., Earthquake Engineering Research Institute, 1982. ISBN 0-943198-22-4

NOEL, B, A; ABDAOUI, A; ELFOULY, T; AHME, H, M; BADAWY, A; SHEHATA, S, M. Structural Health Monitoring using Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Survey, **IEEE Communications Society**, v. 19, p. 1403 – 1423, 2017. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1109/COMST.2017.2691551> >

OLIVEIRA, L, B, C; GRECO, M; BITTENCOURT, B, T. Analysis of the brazilian federal bridge inventory, **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 13, p. 1-13, 2019. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952019000100002> >

OMAR, T; NEHDI, L, M. Condition Assessment of Reinforced Concrete Bridges: Current Practice and Research Challenges, **Infrastructures**, v. 3, p. 1-23, 2018. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.3390/infrastructures3030036> >

OZER, E; FENG, D; Q FENG, Q, M. Hybrid motion sensing and experimental modal analysis using collocated smartphone camera and accelerometers, **Measurement Science and Technology**, v. 28, p. 1-15, 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa82ac> >

PANDEY, K, A; BISWAS, M; SAMMAN, M, M. Damage detection from changes in curvature mode shapes, **Journal of Sound and Vibration**, p. 321-332, 1991. Disponível em: < [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(91\)90595-B](https://doi.org/10.1016/0022-460X(91)90595-B) >

PASTO, M; BINDA, M; HARČARIK, T. Modal Assurance Criterion, **Procedia Engineering**, v. 48, p. 543 – 548, 2012. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.551> >

PCB GROUP, Inc. PCB Model 356A01: Installation and Operating Manual, Manual 21354 Rev E, ECN 50523, 2002. Disponível em: < https://www.pcb.com/contentStore/docs/pcb_corporate/vibration/products/manuals/356a01.pdf >

PCB PIEZOTRONICS. Model Number 356A01: Triaxial ICP® accelerometer, Revisão G. Spec. Number: 21822, 2013. Disponível em: < https://www.pcbpiezotronics.fr/wp-content/uploads/356A01_G.pdf >

PEETERS, B; DE ROECK, G. Reference-based stochastic subspace identification for output-only modal analysis, **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 13, p. 855-878, 1999. Disponível em: < <https://doi.org/10.1006/mssp.1999.1249> >

^aPEETERS, B; DE ROECK, G. Stochastic system identification for operational modal analysis: a review, **Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control**, v. 123, p. 659-667, 2001. Disponível em: < <https://doi.org/10.1115/1.1410370> >

^bPEETERS, B; DE ROECK, G. One-year monitoring of the Z24-Bridge: environmental effects versus damage events, *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, v. 30, p. 149-171, 2001. Disponível em: < [https://doi.org/10.1002/1096-9845\(200102\)30:2<149::AID-EQE1>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/1096-9845(200102)30:2<149::AID-EQE1>3.0.CO;2-Z) >

PORTELA, L, E; TEIXEIRA, M, R; BITTENCOURT, N, T; NASSIR, H. Estatísticas de caminhões isolados e em múltiplas presenças para carga móvel em pontes baseadas em dados de pesagem em movimento, **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 10, p. 1163-1173, 2017. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952017000600002> >

PRAVIA, C, M, Z; BRAIDO, D, J. Measurements of bridges' vibration characteristics using a mobile phone, **IBRACON Structures and materials journal**, v. 8, n. 5, p. 721-743, 2015. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952015000500009> >

RAHMATALLA, S; HUDSON, K; LIU, Y; EUN, C. Finite element modal analysis and vibration-wave forms in health inspection of old bridges, **Finite Elements in Analysis and Design**, p. 40-46, 2014. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.finel.2013.09.006> >

RAO, S, S. **The Finite Element Method in Engineering**, ed. 4, Butterworth-Heinemann, 2004. ISBN 0750678283

RAO, S, S. **Mechanical Vibrations**, Pearson Education, Inc., ed. 5, Lake Street, Upper Saddle River, 2010. ISBN 978-0-13-212819-3

RAWLINS, J. C. **Basic AC Circuits**, Elsevier Inc., ed. 2, 2000. ISBN 978-0-7506-7173-6 Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7173-6> >

RAZAK, A, H; CHOI, C, F. The effect of corrosion on the natural frequency and modal damping of reinforced concrete beams, **Engineering Structures**, v. 23, p.1126–1133, 2001. Disponível em: < [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(01\)00005-0](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(01)00005-0) >

RIBEIRO, R, R; LAMEIRAS, M, R. Evaluation of low-cost MEMS accelerometers for SHM: frequency and damping identification of civil structures, **Latin American Journal os Solids and Structures**, v. 16, p 1-24, 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1590/1679-78255308> >

RIERA, J, D; CURADELLI, R, O; AMBROSINI, R, D; AMANI, M, G. Damping: a sensitive structural property for damage detection, **Mecánica Computacional**, v. 26, p. 2395-2413, 2007.

RODRIGUES, J, R; BRINCKER. Application of the Random Decrement Technique in Operational Modal Analysis, In: **Proceedings of the International Operational Modal Analysis Conference**, 1st, Copenhagen, pp. 191-200, 2005

RODRIGUES, S, F, J; CASAS, R, J; ALMEIDA, O, A, P. **Fatigue-safety assessment of reinforced concrete (RC) bridges: application to the Brazilian highway network**, **Structure and Infrastructure Engineering**, p.601-616, 2013. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1080/15732479.2011.598939> >

SAEED, E, T; NIKOLAKOPOULOS, G; GRIP, N; JAN-ERIK JONASSON, J. Investigation of changes in modal characteristics before and after damage of a railway bridge: a case study, **The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering**, v. 8, p.1-14, 2015. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1080/19373260.2015.1020889> >

SALAWU, S, O. Detection of structural damage through changes in frequency: a review, **Engineering Structures**, p. 718-723, 1997. Disponível em: < [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(96\)00149-6](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(96)00149-6) >

SALGADO, R; CRUZ, S, J, P; AYALA, G; ZAMORA, A, S. Performance of damage detection methods used in bridge structures through dynamic tests in steel beams, *American Journal of Civil Engineering*, p. 18-26, 2014. Disponível em: < <http://doi.org/10.11648/j.ajce.20140202.12> >

SHABAN, N; AVSAR, O; CANER, A. **Integration of practical supplemental measurements into bridge condition visual inspection grading**, *Bridge Structures*, v. 16, p. 139-153, 2020. Disponível em: < <http://doi.org/10.3233/BRS-200179> >

SHIFERAW, M, H. Measuring traffic induced ground vibration using smartphone sensors for a first hand structural health monitoring, **Scientific African**, v. 11, p. 1-10, 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00703> >

SHOKROLLAHIA, S; ADELA, F; AHMADIANB, H. An investigation into the accelerometer mounting effects on signal transmissibility in modal measurements, **Scientia Iranica B**, v. 24, p. 2436-2444, 2017. Disponível em: < <http://doi.org/10.24200/sci.2017.4244> >

SIMÕES, F, L; RODRIGUES, F, P; PINHEIRO, C, C, D. Análise crítica dos métodos de inspeção da ABNT NBR 9452:2019, **In: Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas – CBPE**, XII, Congresso Virtual, Brasil, 2021.

SMITH, W, S. **The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal processing**, 2. Ed, California Technical Publishing, 1999. ISBN: 0-9660176-7-6

SONY, S; LAVENTURE, S; SADHU, A. **A literature review of next-generation smart sensing technology in structural health monitoring**, *Structural Control Health Monitoring*, vol. 26, 2019.

SRINIVAS, V; JEYASEHAR, A, C; RAMANJANEYULU, K; SASMAL, S. Experimental investigations on effect of damage on vibration characteristics of a reinforced concrete

beam, **Journal of The Institution of Engineers (India): Series D**, p. 45-54, 2012.
Disponível em: < <http://doi.org/10.1007/s40030-012-0006-7> >

ST life.augmented. iNEMO inertial module with Machine Learning Core, Finite State Machine and advanced Digital Functions. Ultra-low power for battery operated IoT, Gaming, Wearable and Personal Electronics. Disponível em: < <https://www.st.com/en/mems-and-sensors/lsm6dsox.html> >. Acesso em 10/11/2021

ST lif.augmented. **Tilt measurement using a low-g 3-axis accelerometer**, Application note, AN4509, 2014.

ST life.Augmented. UM2580: User manual, 2019.

ST Microelectronics NV. LSM6DSM - iNEMO inertial module:always-on 3D accelerometer and 3D gyroscope, p. 1-126, 2017. Disponível em: < <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lsm6dsm.pdf> >

STANČIN, S; TOMAŽIČ, S. Time- and Computation-Efficient Calibration of MEMS 3D Accelerometers and Gyroscopes, **Sensors**, p. 14884-14915, v. 14, 2014. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.3390/s140814885> >

TANAKA, T; REHMAT, S; MATSUMOTO, Y; DAMMIKA, J, A. Damping properties of existing single-span prestressed concrete girder bridges with different service periods, In: **International Conference on Structural Engineering and Construction Management** , 6th, Sri Lanka, 2015.

TAROZZI, M; PIGNAGNOLI, G; BENEDETTI, A. Identification of damage-induced frequency decay on a large-scale model bridge, **Engineering Structures**, v. 221, p. 1-12, 2020. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111039> >

TENŽERA, D; PUŽ, G; RADIĆ, J. Visual inspection in evaluation of bridge condition, **Građevinar**, p. 717-726, 2012.

THOMPSON, M. Intuitive Analog Circuit Design, 2. ed, Newnes, 722 pag., 2013.
ISBN 0124058663

TOMCZYK, K; LAYER, E. Accelerometer errors in the measurement of dynamic signals, **Measurement**, p. 292-298, 2015. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.058> >

TOZETTO, S, R. **Desenvolvimento de um sistema de monitoramento de vibrações em estruturas de baixa frequência natural**. Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, Brasil (Dissertação de mestrado), 2016.

TWETEN, J, D; N, BALLARD, Z; MANN, P, B. Minimizing error in the logarithmic decrement method through uncertainty propagation, **Journal of Sound and Vibration**, p. 2804-28011, 2014. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2014.02.024> >

VASEGHI, V, S. **Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction**. 2 Ed. England: John Wiley & Sons Ltd, 2000, 473 p. ISBN: 0-471-62692-9

VISUALIZADOR DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS – VGEO. Disponível em: < <http://servicos.dnit.gov.br/vgeo/> >. Acesso em 11 de agosto de 2021.

WAHAB, A, M, M; DE ROECK, G. Damage detection in bridges using modal curvatures: application to a real damage scenario, **Journal of Sound and Vibration**, p. 217-235, 1999. Disponível em: < <https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2295> >

WELVAERT, M; ROSSEEL, Y. On the Definition of Signal-To-Noise Ratio and Contrast-To-Noise Ratio for fMRI Data, **PLoS ONE**, v. 8, p. 1-10, 2013. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0077089> >

WENZEL, H. **Health monitoring of bridges**. Ed. 1, United Kingdom, John Wiley & Sons, Ltd, 2009. ISBN: 9780470031735

WENZEL, H; PICHLER, D. **Ambient vibration monitoring**, ed. 1, John Wiley & Sons Ltd: England, 2005. ISBN ISBN-10 0-470-02430-5

WILLIAMS, C; SALAWU, S. Damping as a damage indication parameter. **In: International Modal Analysis Conference**, 15th, 1997, Orlando. Anais... p.1532-1536

WINDER, S. Analog and digital filter design, 2 ed., Newnes, Elsevier Science: EUA, 2002. ISBN 0-7506-7547-0.

WITMOTION. Accelerometer HWT901B TTL specification. Disponível em: < <https://www.wit-motion.com/10-axis/witmotion-hwt901b-ttl-10.html> >. Acesso em 10/11/2021

WU, B. A correction of the half-power bandwidth method for estimating damping, *Archive of Applied Mechanics*, v. 85, 315-320, 2015. Disponível em: < <http://doi.org/10.1007/s00419-014-0908-0> >

XING, S; HALLING, W, M; BARR, J, P. Delamination detection of reinforced concrete decks using modal identification, **Journal of Sensors**, v. 2012, p. 1-17, 2012. Disponível em: < <http://doi.org/10.1155/2012/156583> >

YOON, J; QU, Y; HE, D; VAN HECKE, B; BECHHOEFER, E; ZHU, J. Vibration Measurements of Steel Foot-bridges using Mobile-phone. **Applied Mechanics and Materials**, p. 471-493, 2014. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.470.777> >

YU, Y; ZHAO, X; OU, J. A New Idea: Mobile Structural Health Monitoring Using Smart Phones. **In: International Conference on Intelligent Control and Information Processing**, 3rd, Dalian, China, 2012.

ZAINAL, B, S, S, M. **Simulation and experimental study for vibration analysis on rotating machinery**, Blekinge Institute of Technology, Suécia (Dissertação de mestrado), 2020

ZANINI, A, M; FALESCHINI, F; CASAS, R, J. **State-Of-Research on Performance Indicators for Bridge Quality Control and Management**, *Frontiers in built*

environment, p. 1-20, 2019. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.3389/fbuil.2019.00022> >

ZHANG, L; SUN, L. Effect of concrete carbonation on natural frequency of reinforced concrete beams, *Advances in Structural Engineering*, v. 20, p. 316-330, 2017. Disponível em: < <http://doi.org/10.1177/1369433216649728> >

ZHANG, Y; CHENG, Y; TAN, G; LYU, X; SUN, X; BAI, Y; YANG, S. Natural frequency response evaluation for RC beams affected by steel corrosion using acceleration sensors, *Sensors*, v. 20, p. 1-17, 2020. Disponível em: < <http://doi.org/10.3390/s20185335> >

ZHAO, X; RI, K; HAN, R; YU, Y; LI, M; OU, J. Experimental Research on Quick Structural Health Monitoring Technique for Bridges Using Smartphone, **Advances in Materials Science and Engineering**, p. 1-14, 2016. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1155/2016/1871230> >

ZHU, Z; CAO, M; OSTACHOWICZ, W; XU, W. Damage identification in bridges by processing dynamic responses to moving loads: features and evaluation, **Sensors**, v. 19, p. 2-26, 2019. Disponível em: < <http://doi.org/10.3390/s19030463> >

ZHU, J; WANG, W; HUANG, S; DING, W. An Improved Calibration Technique for MEMS Accelerometer-Based Inclometers, **Sensors**, v. 20, p. 1-23, 2020. Disponível em: < <http://doi.org/10.3390/s20020452> >

ANEXO A - PUBLICAÇÕES

Artigos publicados

BRAIDO, D, J. PRAVIA, C, M, Z. Application of MEMS accelerometer of smartphones to define natural frequencies and damping ratios obtained from concrete viaducts and footbridge, **Rev. IBRACON Estrut. Mater**, v. 15, 2022. Disponível em: < <https://doi.org/10.1590/S1983-41952022000200006> >

Participação em congressos e seminários

BRAIDO, D, J. PRAVIA, C, M, Z. Using RDT and Low Pass Butterworth filters in acceleration data to obtain vibration index from two reinforced concrete viaducts, In: Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, XII, Congresso Virtual, 2021.

BRAIDO, D, J. PRAVIA, C, M, Z. Avaliação da superestrutura de dois viadutos em concreto armado através da aplicação da NBR 15307, In: Seminário Regional de Engenharia Estrutural, VI, Passo Fundo, 2019.

BRAIDO, D, J. PRAVIA. Inspeção de obras de arte especiais: avaliação das normas brasileiras, In: Seminário Regional de Engenharia Estrutural, IV, Passo Fundo, 2017.

ANEXO B – VIGA T: DOSAGEM DE MATERIAIS

A dosagem dos materiais para a concretagem da viga T foi executada através do método ABCP e foi realizado na UPF. O fck inicial adotado foi de 25 MPa e um desvio padrão igual a 5,5, referente ao controle razoável na produção do concreto. Com isso, o f_{c28} foi igual a 34,07 MPa.

Através da NBR 12655/2015: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento, a classe de agressividade foi igual a II e estabelece uma relação água/cimento $\leq 0,60$.

A determinação do consumo de água ocorreu através da relação entre a dimensão do agregado graúdo – escolhido como 19mm – e o abatimento do cone – definido como o intervalo de 80 a 100mm. Com isso, o consumo de água estimado foi de 205 l/m³. Desta forma, o consumo de cimento – Cc - foi igual a 341,67 kg/m³.

O consumo de agregado – Cb - graúdo foi definido a partir do módulo de finura MF igual a 2 relacionado à dimensão máxima do mesmo agregado. O coeficiente Vb definido foi de 0,75. A massa unitária da brita compacta tem valor igual a 1500 kg/m³. Isto conferiu um consumo de agregado graúdo – Cb - igual a 1125 kg/m³.

O volume de agregado miúdo – Cm – foi igual a 0,268m³ e considerou os pesos específicos do cimento – Cc=3100 kg/m³ -, do agregado graúdo – Cb=2700 kg/m³ - e o consumo de água – Ca=205 kg/m³. A quantidade de agregado miúdo foi determinada para uma condição compactada a partir do peso específico igual a 2650 kg/m³. Assim, o consumo de agregado miúdo foi igual a 710 kg/m³. A Tabela 72 apresenta o traço de cimento utilizado

Tabela 72: Traço de cimento utilizado

| | Cimento | Areia | Brita | Água |
|---------------------------------|---------|--------|---------|-------------------------|
| Quantidade (kg/m ³) | 341,67 | 710,51 | 1125,00 | 205,00 l/m ³ |
| Traço | 1 | 2,08 | 3,29 | 0,60 |

Fonte: Autor.

Para a definição da quantidade necessária para criar 1 m³ de concreto adotou-se a taxa de umidade da areia igual a 6% e o fator de inchamento também da areia igual a 30%. Assim, a quantidade necessária para 1 m³ de concreto é apresentado na Tabela 73.

Tabela 73: Traço utilizado para a viga T

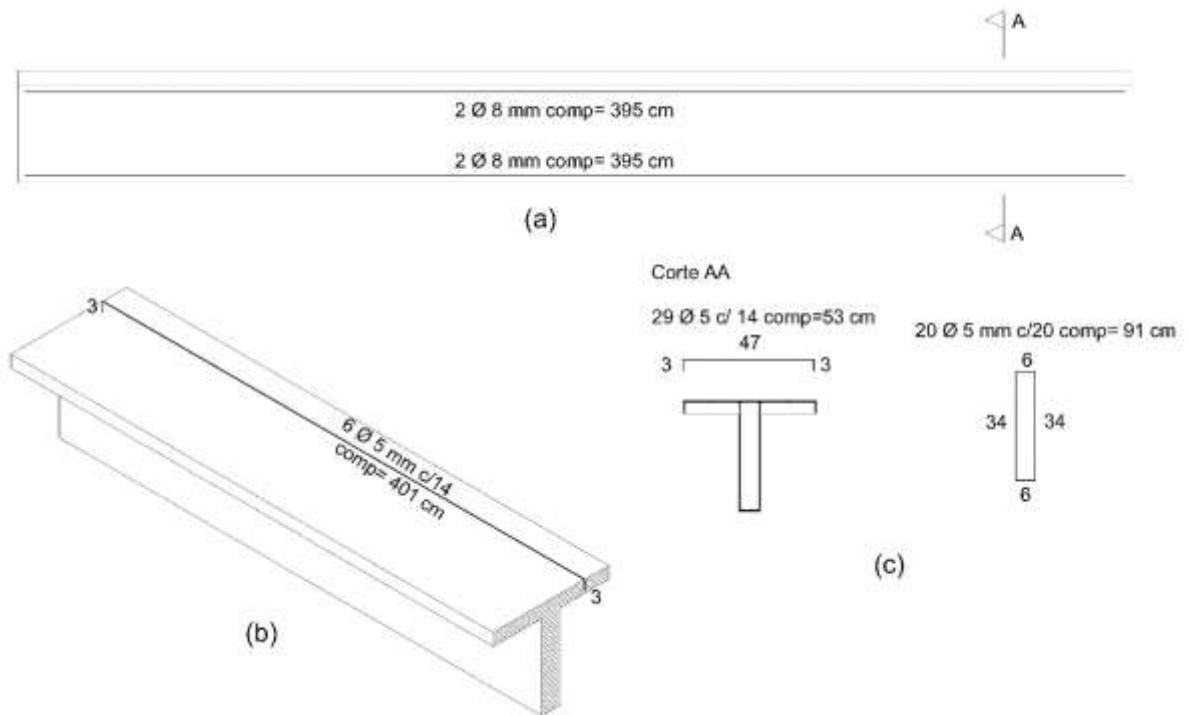
| Materiais | 1m ³ | Unitário (kg) | 1 Saco (kg) | Volume (l) | Areia – Umidade e inchamento (kg) |
|-----------|-----------------|---------------|-------------|------------|-----------------------------------|
| Cimento | 341,67 | 1 | 50 | 1 | 50 |
| Areia | 710,51 | 2,08 | 103,98 | 70,73 | 91,95 |
| Brita | 1125,00 | 3,29 | 164,63 | 115,13 | 115,13 |
| Água | 205,00* | 0,60 | 30 | 23,76 | 23,76 |

Fonte: Autor.

Ferragem

A armadura adotada na viga T é apresentada na Figura 114. Em (a) os ferros aplicados à alma da viga em (b) utilizados na direção longitudinal da mesa e em (c) utilizados na direção transversal e os estribos. O cobrimento considerado em projeto foi de 0,5 cm.

Figura 114: Armadura utilizada na Viga T



Fonte: Autor

ANEXO C - PROPRIEDADES DO ACELERÔMETRO PCB PIEZOTRONICS

As características do acelerômetro PCB Piezotronics 356A01 são apresentadas na Tabela 74 (PCB PIEZOTRONICS, 2013):

Tabela 74: Propriedades do acelerômetro PCB Piezotronics

| Desempenho | SI |
|--|--|
| Sensibilidade ($\pm 20\%$) | 0,51 mV/(m/s ²) |
| Faixa de medição | ± 9810 m/s ² pk |
| Frequência de medição ($\pm 5\%$) (eixos z ou y) | 2 a 8000 Hz |
| Frequência de medição ($\pm 5\%$) (eixo x) | 2 a 5000 Hz |
| Frequência de medição (+ 1dB) (eixo x) | ≥ 8 kHz |
| Frequência ressonante | ≥ 50 kHz |
| Frequência de banda larga (1 a 10000 Hz) | 0,03 m/s ² rms |
| Não-linearidade | $\leq 1\%$ |
| Sensibilidade transversal | $\leq 5\%$ |
| Ambiental | |
| Limite de sobrecarga (impacto) | ± 98100 m/s ² pk |
| Faixa de temperatura (operação) | -54 a +121°C |
| Resposta da temperatura | Visualizar o gráfico |
| Elétrica | |
| Voltagem de excitação | 18 a 30 VDC |
| Excitação de corrente constante | 2 a 20 mA |
| Impedância de saída | ≤ 200 mA |
| Voltagem de saída Bias | 7 a 12 VDC |
| Constante de tempo de descarga | 0,24 a 1 segundo |
| Tempo de estabelecimento (dentro de 10% de bias) | < 3 segundos |
| Ruído espectral (1 Hz) | 11772 ($\mu\text{m}/\text{seg}^2$)/ $\sqrt{\text{Hz}}$ |
| Ruído espectral (10 Hz) | 2943 ($\mu\text{m}/\text{seg}^2$)/ $\sqrt{\text{Hz}}$ |
| Ruído espectral (100 Hz) | 981 ($\mu\text{m}/\text{seg}^2$)/ $\sqrt{\text{Hz}}$ |
| Ruído espectral (1 kHz) | 294 ($\mu\text{m}/\text{seg}^2$)/ $\sqrt{\text{Hz}}$ |
| Física | |
| Elemento sensível | Cerâmica |
| Geometria de sensibilidade | Cisalhamento |
| Material do revestimento | Titânio |
| Vedação | Hermética |
| Tamanho (altura x comprimento x espessura) | 6,35 mm x 6,35 mm x 6,35 mm |
| Peso (sem cabeamento) | 1,0 gm |
| Conector elétrico | Cabo integrado |
| Posição da conexão elétrica | Lateral |
| Comprimento do cabo | 1,5 m |
| Tipo de cabo | 034 4-cond Shielded |
| Montagem | Adesiva |



UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA – CETEC SERVIÇOS
Campus I – BR 285 – Km 292 – Bairro São José
CEP 99052-900- Passo Fundo – RS – Fone: (54) 3316-8208



CERTIFICADO DE ENSAIO

| | | | |
|--------------|----------|---------------------------|-------------------|
| LABORATÓRIO: | LABOMACC | CERTIFICADO DE ENSAIO N°: | 5380 a 5381 /2020 |
|--------------|----------|---------------------------|-------------------|

1. CLIENTE: JORGE BRAIDO

2. LOCAL DA OBRA: ENSAIO CETEC

3. OBJETIVO E DESCRIÇÃO DOS SERVIÇOS: Ensaio de esclerometria em estrutura de concreto armado. O presente trabalho teve como objetivo a determinação do índice esclerométrico para a determinação da dureza superficial do concreto em dez pontos determinados pelo cliente na estrutura. Para tanto, conforme solicitação expressa do cliente foi realizado o ensaio conforme ABNT NBR 7584.

4. IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS: Os pontos ensaiados foram determinados pelo cliente e previamente preparado de tal forma a retirar elementos que pudessem interferir no resultado dos ensaios. Os pontos foram identificados como: **P1 e P2.**

5. MÉTODOS UTILIZADOS:

Para a obtenção da dureza superficial do concreto, foi realizado ensaio não destrutivo do concreto. Este ensaio é denominado ensaio de esclerometria e foi realizado conforme orientações e procedimentos, bem como utilizada a terminologia, especificados na seguinte norma técnica: ABNT NBR-7584. Concreto endurecido - Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão.

Para a correta interpretação deste laudo, entende-se por índice esclerométrico, segundo a NBR 7584, o que segue: “Valor obtido através de um impacto do esclerômetro de reflexão sobre uma área de ensaio, fornecido diretamente pelo aparelho correspondente ao número de recuo do martelo”.

Como o método recomendado refere-se a uma série de 16 impactos, o índice esclerométrico de cada ponto é obtido através da média destes impactos e posteriormente ponderada conforme o método.

6. MATERIAIS UTILIZADOS:

Para a realização do ensaio foi utilizado Esclerômetro de reflexão tipo N, marca PROCEQ, Código 310 01 001, com energia de percussão de 2.21 N.m, sem fita registradora automática. Conforme a Norma NBR 7584, este tipo de esclerômetro é recomendado para utilização em casos normais de construção de edifícios e postes.

Também foi utilizado disco de carborundum, para polimento manual da área do ensaio.

7. RESULTADOS:

Os resultados dos pontos obtidos através do ensaio de determinação do índice esclerométrico foram:

| Pontos | | Índice esclerométrico efetivo | Resistência estimada (Mpa) |
|--------|----|-------------------------------|----------------------------|
| P 1 | P1 | 34 | 28 |
| P 2 | P2 | 30 | 24 |

Tabela 1 – Resultados

Observações:

- Os índices esclerométricos efetivos apresentados na Tabela 1 referem-se à média dos valores obtidos em 16 determinações (impactos) desprezados os valores individuais superiores a 10% ou inferiores a 10%.
- A carbonatação do concreto pode provocar alteração no resultado do ensaio.

Laboratorista: Nilton Pionkoski Rodrigues
Estagiário(a): Alisson Moraes de Oliveira

Passo Fundo, 18 de Novembro de 2020.

Eng. Eduardo Basso
Engenheiro Civil – CREA-RS 194.041
Responsável Técnico – CETEC Serviços.
Fone: (54) 3316-8208 E-mail: cetec@upf.br

Este documento tem significação restrita e diz respeito somente à(s) amostra(s) ensaiada(s).
Sua reprodução só poderá ser total e dependente de aprovação formal deste Laboratório.

ANEXO E – V1: RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados experimentais obtidos para as amostras 23 a 28, no viaduto V1, são apresentados na Tabela 75. O amortecimento médio assumiu um valor igual a 4,43%, com desvio padrão de 0,23% e variância de 0,05. Isto fornece amortecimento no intervalo entre 4,66% e 4,20%, onde três amostras não pertencem a esta faixa de valores – 4,71%, 4,17% e 4,16%.

A frequência natural assumiu um valor médio de 12,43 Hz, com desvio padrão de 0,29 Hz e variância de 0,08. Isto indica um intervalo de frequência natural entre 12,72 Hz e 12,14 Hz, onde três amostras não pertencem a esta faixa de valores – 12,75 Hz, 12,81 Hz e 12,13 Hz.

O índice de dano DI_{freq} indicou uma ponte saudável. Não foi constatado uma diminuição da frequência natural.

O valor SNR após o RDT indicou uma atenuação máxima de -13,27 dB e mínima de -9,91 dB, o que representa uma melhoria na qualidade do sinal.

Tabela 75: Resultados experimentais obtidos para V1 - Amostras 23 a 28

| Data | 16/05/19 | | Local | | L/2 | | F. Butterworth/ RDT | | | | |
|------------|------------|-------------------------|----------|-------------------------|-------|-------------------------|---------------------|----------|-------------|-------|-------|
| | Am | Am. Nat/ F. Butterworth | Am | Am. Nat/ F. Butterworth | Am | Am. Nat/ F. Butterworth | ξ | ω | DI_{freq} | V | SNR |
| | Ap-a-p (g) | DI | SNR (dB) | Ap-a-p (g) | DI | SNR (dB) | (%) | (Hz) | | | (dB) |
| 23 | 0,029 | -3,43 | -20,27 | 0,027 | -3,49 | -20,27 | 4,61 | 12,75 | -0,16 | - | - |
| | | | | | | | | | | 19,01 | 11,32 |
| 24 | 0,025 | -3,54 | -20,35 | 0,023 | -3,59 | -20,35 | 4,71 | 12,81 | -0,17 | - | - |
| | | | | | | | | | | 19,69 | 10,92 |
| 25 | 0,025 | -3,55 | -20,24 | 0,023 | -3,59 | -20,24 | 4,17 | 12,13 | -0,05 | - | - |
| | | | | | | | | | | 20,89 | 13,27 |
| 26 | 0,022 | -3,63 | -20,30 | 0,020 | -3,70 | -20,30 | 4,43 | 12,43 | -0,10 | - | - |
| | | | | | | | | | | 23,72 | 11,80 |
| 27 | 0,023 | -3,62 | -20,25 | 0,021 | -3,66 | -20,25 | 4,16 | 12,24 | -0,07 | - | -9,91 |
| | | | | | | | | | | 23,68 | |
| 28 | 0,027 | -3,48 | -20,27 | 0,026 | -3,52 | -20,27 | 4,47 | 12,21 | -0,07 | - | - |
| | | | | | | | | | | 20,87 | 11,78 |
| \bar{x} | | | | | | | 4,43 | 12,43 | | | |
| σ | | | | | | | 0,23 | 0,29 | | | |
| σ^2 | | | | | | | 0,05 | 0,08 | | | |

Onde: Am.= amostra; Am. Nat.= amostra natural; F. Butterworth = Filtro Butterworth; Ap-a-p=Aceleração de pico-a-pico; DI=índice de dano de aceleração pico-a-pico; SNR= coeficiente sinal-ruído; ξ =amortecimento; ω =frequência natural; DI_{freq} =índice de dano que considera a variação da frequência natural; V=índice de vibração; \bar{x} = média; σ = desvio padrão; σ^2 = variância

Fonte: Autor.

A Tabela 76 apresenta os resultados obtidos para as amostras 29 a 34 do viaduto V1. O amortecimento assumiu um valor médio de 4,22%, com desvio padrão igual a 0,74% e variância de 0,54. Isto fornece um intervalo de amortecimento entre 4,96% e 3,48%, onde não pertencem a esta faixa de valores os amortecimentos iguais a 5,00% e 3,00%.

A frequência natural média foi de 12,46 Hz, com desvio padrão de 0,45 Hz e variância de 0,20. Isto indica um intervalo de frequência de 12,91 Hz e 12,01 Hz, onde os valores de 11,82 Hz e 13,06 Hz não pertencem a esta faixa de valores.

O índice de dano DI_{freq} apresentou valores negativos em cinco amostras, o que indica uma ponte saudável. A frequência natural não apresentou redução maior que 5%, o que representa uma ponte sem danos.

O SNR após aplicar o filtro RDT apresentou atenuação máxima de -14,59 dB e mínima de -12,68 dB. Isto indica a melhoria do sinal.

Tabela 76: Resultados experimentais obtidos para V1 - Amostras 29 a 34

| Data | 06/06/19 | | Local | | L/2 | | | | | |
|------------|-------------------------|-------|---------------------|--------|-------|-------|----------|-------------|-------|-------|
| Fase | Am. Nat/ F. Butterworth | | F. Butterworth/ RDT | | | | | | | |
| Am | Ap-a-p | DI | SNR | Ap-a-p | DI | ξ | ω | DI_{freq} | V | SNR |
| | (g) | | (dB) | p (g) | | (%) | (Hz) | | | (dB) |
| 29 | 0,033 | -3,30 | -20,32 | 0,032 | -3,33 | 5,00 | 11,82 | 0,00 | - | - |
| | | | | | | | | | 17,22 | 14,59 |
| 30 | 0,022 | -3,63 | -20,36 | 0,021 | -3,68 | 3,00 | 13,06 | -0,22 | - | - |
| | | | | | | | | | 24,26 | 13,61 |
| 31 | 0,031 | -3,35 | -20,45 | 0,028 | -3,44 | 4,83 | 12,85 | -0,18 | - | - |
| | | | | | | | | | 20,45 | 15,23 |
| 32 | 0,028 | -3,45 | -20,46 | 0,025 | -3,54 | 3,99 | 12,21 | -0,07 | - | - |
| | | | | | | | | | 24,42 | 12,68 |
| 33 | 0,024 | -3,57 | -20,49 | 0,022 | -3,64 | 3,93 | 12,34 | -0,09 | - | - |
| | | | | | | | | | 23,88 | 12,88 |
| 34 | 0,029 | -3,41 | -20,40 | 0,027 | -3,48 | 4,54 | 12,48 | -0,11 | - | - |
| | | | | | | | | | 18,66 | 13,76 |
| \bar{x} | | | | | | 4,22 | 12,46 | | | |
| σ | | | | | | 0,74 | 0,45 | | | |
| σ^2 | | | | | | 0,54 | 0,20 | | | |

Onde: Am.= amostra; Am. Nat.= amostra natural; F. Butterworth = Filtro Butterworth; Ap-a-p=Aceleração de pico-a-pico; DI=índice de dano de aceleração pico-a-pico; SNR= coeficiente sinal-ruído; ξ =amortecimento; ω =frequência natural; DI_{freq} =índice de dano que considera a variação da frequência natural; V=índice de vibração; \bar{x} = média; σ = desvio padrão; σ^2 = variância

Fonte: Autor.

A Tabela 77 apresenta os resultados experimentais do viaduto V1 para as amostras 35 a 40. O amortecimento médio assumiu um valor igual a 3,71%, com desvio padrão de 0,79% e variância de 0,63. Isto indica um intervalo de valores entre 4,50% e 2,92%, onde os valores de 5,06% e 2,79% não pertencem a estes limites.

A frequência natural média foi de 12,61 Hz, com desvio padrão de 0,59 Hz e variância de 0,35. Isto indica um intervalo de frequências entre 13,20 Hz e 12,02 Hz, onde apenas o valor de 11,61 Hz ultrapassa este intervalo.

O índice de dano DI_{freq} apresentou apenas um valor positivo. A frequência natural não apresentou redução maior que 5% e representa uma ponte sem danos.

O SNR após aplicar o filtro RDT indicou uma atenuação máxima de -18,38 dB e -12,55 dB, o que representa a melhoria da qualidade do sinal.

Tabela 77: Resultados experimentais obtidos para V1 - Amostras 35 a 40

| Data | 27/06/19 | | Local | | L/2 | | | | | |
|------------|-------------------------|-------|----------------|------------|-------|-----------|---------------|-------------|-------|----------|
| Fase | Am. Nat/ F. Butterworth | | F. Butterworth | | RDT | | | | | |
| Am | Ap-a-p (g) | DI | SNR (dB) | Ap-a-p (g) | DI | ξ (%) | ω (Hz) | DI_{freq} | V | SNR (dB) |
| 35 | 0,039 | -3,11 | -20,32 | 0,037 | -3,17 | 4,09 | 11,61 | 0,04 | - | - |
| | | | | | | | | | 13,62 | 14,58 |
| 36 | 0,029 | -3,43 | -20,41 | 0,027 | -3,48 | 5,06 | 12,16 | -0,06 | - | - |
| | | | | | | | | | 40,42 | 18,38 |
| 37 | 0,051 | -2,75 | -20,34 | 0,047 | -2,87 | 2,79 | 12,98 | -0,20 | - | - |
| | | | | | | | | | 20,34 | 14,06 |
| 38 | 0,042 | -3,03 | -20,43 | 0,026 | -3,51 | 3,71 | 12,96 | -0,20 | - | - |
| | | | | | | | | | 20,58 | 12,55 |
| 39 | 0,050 | -2,77 | -20,46 | 0,045 | -2,92 | 3,38 | 13,05 | -0,22 | -9,79 | - |
| | | | | | | | | | | 13,42 |
| 40 | 0,027 | -3,50 | -20,43 | 0,024 | -3,58 | 3,24 | 12,90 | -0,19 | - | - |
| | | | | | | | | | 21,01 | 14,96 |
| \bar{x} | | | | | | 3,71 | 12,61 | | | |
| σ | | | | | | 0,79 | 0,59 | | | |
| σ^2 | | | | | | 0,63 | 0,35 | | | |

Onde: Am.= amostra; Am. Nat.= amostra natural; F. Butterworth = Filtro Butterworth; Ap-a-p=Aceleração de pico-a-pico; DI=índice de dano de aceleração pico-a-pico; SNR= coeficiente sinal-ruído; ξ =amortecimento; ω =frequência natural; DI_{freq} =índice de dano que considera a variação da frequência natural; V=índice de vibração; \bar{x} = média; σ = desvio padrão; σ^2 = variância

Fonte: Autor.

A Tabela 78 apresenta os resultados experimentais do viaduto V1 para as amostras 41 a 46. O amortecimento médio foi igual a 3,97%, com desvio padrão de 0,94% e variância de 0,89. Isto indica um intervalo entre 4,91% e 3,03%, onde apenas o valor de 5,33% não pertence a esta faixa de valores.

A frequência natural média foi de 12,45 Hz, com desvio padrão de 0,12 Hz e variância igual a 0,02. Isto indica um intervalo entre 12,57 Hz e 12,33 Hz, onde apenas o valor de 12,29 Hz não pertence a esta faixa de valores.

O índice DI_{freq} apresentou apenas valores negativos e indicou um aponte saudável. A frequência natural não apresentou redução.

O valor *SNR* após aplicar o filtro *RDT* apresentou valores de atenuação máximo e mínimo de -13,12 dB e -9,81 dB, respectivamente. Isto representa a melhoria da qualidade do sinal.

Tabela 78: Resultados experimentais obtidos para V1 – Amostras 41 a 46

| Data | 31/07/19 | | Local | | L/2 | | | | | |
|------------|----------|-------|----------------|--------|-----------------|-------|----------|-------------|-------|-------|
| | Am. Nat/ | | F. Butterworth | | F. Butterworth/ | | RDT | | | |
| Fase | Ap-a-p | DI | SNR | Ap-a-p | DI | ξ | ω | DI_{freq} | V | SNR |
| Am | (g) | | (dB) | p (g) | | (%) | (Hz) | | | (dB) |
| 41 | 0,028 | -3,46 | -20,32 | 0,026 | -3,52 | 4,12 | 12,54 | -0,12 | - | - |
| | | | | | | | | | 18,16 | 11,86 |
| 42 | 0,025 | -3,53 | -20,37 | 0,024 | -3,57 | 2,57 | 12,37 | -0,09 | - | - |
| | | | | | | | | | 19,62 | 10,35 |
| 43 | 0,035 | -3,22 | -20,33 | 0,033 | -3,29 | 4,51 | 12,29 | -0,08 | - | - |
| | | | | | | | | | 16,52 | 11,79 |
| 44 | 0,019 | -3,74 | -20,38 | 0,017 | -3,78 | 3,88 | 12,40 | -0,10 | - | -9,81 |
| | | | | | | | | | 29,28 | |
| 45 | 0,019 | -3,71 | -20,44 | 0,018 | -3,75 | 3,42 | 12,63 | -0,14 | - | - |
| | | | | | | | | | 25,41 | 13,12 |
| 46 | 0,019 | -3,72 | -20,44 | 0,018 | -3,76 | 5,33 | 12,48 | -0,11 | - | - |
| | | | | | | | | | 26,42 | 12,36 |
| \bar{x} | | | | | | 3,97 | 12,45 | | | |
| σ | | | | | | 0,94 | 0,12 | | | |
| σ^2 | | | | | | 0,89 | 0,02 | | | |

Onde: Am.= amostra; Am. Nat.= amostra natural; F. Butterworth = Filtro Butterworth; Ap-a-p=Aceleração de pico-a-pico; DI=índice de dano de aceleração pico-a-pico; SNR=coeficiente sinal-ruído; ξ =amortecimento; ω =frequência natural; DI_{freq} =índice de dano que considera a variação da frequência natural; V=índice de vibração; \bar{x} = média; σ = desvio padrão; σ^2 = variância

Fonte: Autor.

A Tabela 79 apresenta os resultados experimentais do viaduto V1 para as amostras 47 a 52. O amortecimento médio foi de 3,12%, com desvio padrão de 0,64% e variância de 0,41. Isto indica um intervalo entre 3,76% e 2,48%, onde os valores de 4,05% e 2,18% ultrapassam estes limites.

A frequência natural média foi de 12,40 Hz, com desvio padrão de 0,12 Hz e variância de 0,01. Isto indica uma faixa de frequência natural entre 12,52 Hz e 12,28 Hz, onde apenas o valor de 12,18 Hz não pertence a este intervalo.

O índice DI_{freq} apresentou valores negativos e indicou uma ponte saudável. A frequência natural não apresentou redução.

O valor *SNR* após aplicar o filtro *RDT* indicou uma atenuação máxima de -13,19 dB e mínima de -10,32 dB, o que representa a melhoria da qualidade do sinal.

Tabela 79: Resultados experimentais obtidos para V1 – Amostras 47 a 52

| Data | 29/08/19 | | Local | | L/2 | | | | | | |
|------------|---------------|-------|-------------|---------------|---------------------|--------------|------------------|-------------|-------|-------------|--|
| Fase | Am. Nat/ F. | | Butterworth | | F. Butterworth/ RDT | | | | | | |
| Am | Ap-a-p (g) | DI | SNR (dB) | Ap-a-p (g) | DI | ξ (%) | ω (Hz) | DI_{freq} | V | SNR (dB) | |
| 47 | 0,034 | -3,28 | -20,31 | 0,032 | -3,34 | 4,05 | 12,40 | -0,10 | - | - | |
| | | | | | | | | | 15,86 | 11,23 | |
| 48 | 0,017 | -3,80 | -20,51 | 0,016 | -3,83 | 2,70 | 12,18 | -0,06 | - | - | |
| | | | | | | | | | 28,92 | 11,94 | |
| 49 | 0,020 | -3,71 | -20,44 | 0,019 | -3,73 | 3,07 | 12,51 | -0,12 | - | - | |
| | | | | | | | | | 26,23 | 13,19 | |
| 50 | 0,035 | -3,23 | -20,40 | 0,032 | -3,33 | 3,28 | 12,43 | -0,10 | - | - | |
| | | | | | | | | | 17,07 | 11,14 | |
| 51 | 0,038 | -3,13 | -20,21 | 0,037 | -3,17 | 2,18 | 12,51 | -0,12 | - | - | |
| | | | | | | | | | 11,70 | 10,32 | |
| 52 | 0,027 | -3,49 | -20,43 | 0,025 | -3,55 | 3,45 | 12,38 | -0,10 | - | - | |
| | | | | | | | | | 22,64 | 12,41 | |
| \bar{x} | | | | | | 3,12 | 12,40 | | | | |
| σ | | | | | | 0,64 | 0,12 | | | | |
| σ^2 | | | | | | 0,41 | 0,01 | | | | |

Onde: Am.= amostra; Am. Nat.= amostra natural; F. Butterworth = Filtro Butterworth; Ap-a-p=Aceleração de pico-a-pico; DI=índice de dano de aceleração pico-a-pico; SNR= coeficiente sinal-ruído; ξ =amortecimento; ω =frequência natural; DI_{freq} =índice de dano que considera a variação da frequência natural; V=índice de vibração; \bar{x} = média; σ = desvio padrão; σ^2 = variância

Fonte: Autor

A Tabela 80 apresenta os resultados experimentais do viaduto V1 para as amostras 53 a 58. O amortecimento médio assumiu um valor de 3,46%, com desvio padrão de 0,42% e variância de 0,18. Isto indica um intervalo de 3,88% e 3,04%, onde os valores de 4,02% e 2,76% não pertencem a este intervalo.

A frequência natural média assumiu um valor igual a 12,25 Hz, com desvio padrão de 0,14 Hz e variância de 0,18. Isto indica um intervalo entre 12,39 Hz e 12,15 Hz, onde os valores de 12,42 Hz e 12,11 Hz não pertencem a este intervalo.

O índice DI_{freq} indicou uma ponte saudável já que assumiu apenas valores negativos. A frequência natural não apresentou redução.

O valor SNR após aplicar o filtro RDT apresentou atenuação máxima de -13,95 dB e mínima de -10,13 dB, o que representa a melhoria do sinal.

Tabela 80: Resultados experimentais obtidos para V1 – Amostras 53 a 58

| Data | 25/09/19 | | Local | L/2 | | | | | | |
|------------|-------------------------|-------|---------------------|---------------|-------|--------------|------------------|-------------|-------|-------------|
| Fase | Am. Nat/ F. Butterworth | | F. Butterworth/ RDT | | | | | | | |
| Am | Ap-a-p (g) | DI | SNR (dB) | Ap-a-p (g) | DI | ξ (%) | ω (Hz) | DI_{freq} | V | SNR (dB) |
| 53 | 0,021 | -3,66 | -20,58 | 0,019 | -3,73 | 4,02 | 12,42 | -0,10 | - | - |
| | | | | | | | | | 27,31 | 12,54 |
| 54 | 0,017 | -3,79 | -20,55 | 0,014 | -3,86 | 3,48 | 12,11 | -0,05 | - | - |
| | | | | | | | | | 31,86 | 12,75 |
| 55 | 0,032 | -3,33 | -20,48 | 0,029 | -3,41 | 3,55 | 12,33 | -0,09 | - | - |
| | | | | | | | | | 16,57 | 11,59 |
| 56 | 0,036 | -3,20 | -20,63 | 0,020 | -3,68 | 3,66 | 12,11 | -0,05 | - | - |
| | | | | | | | | | 28,77 | 13,95 |
| 57 | 0,021 | -3,67 | -20,58 | 0,018 | -3,76 | 3,31 | 12,16 | -0,06 | - | - |
| | | | | | | | | | 30,66 | 10,13 |
| 58 | 0,013 | -3,91 | -20,73 | 0,011 | -3,97 | 2,76 | 12,37 | -0,09 | - | - |
| | | | | | | | | | 37,32 | 10,38 |
| \bar{x} | | | | | | 3,46 | 12,25 | | | |
| σ | | | | | | 0,42 | 0,14 | | | |
| σ^2 | | | | | | 0,18 | 0,02 | | | |

Onde: Am.= amostra; Am. Nat.= amostra natural; F. Butterworth = Filtro Butterworth; Ap-a-p=Aceleração de pico-a-pico; DI=índice de dano de aceleração pico-a-pico; SNR= coeficiente sinal-ruído; ξ =amortecimento; ω =frequência natural; DI_{freq} =índice de dano que considera a variação da frequência natural; V=índice de vibração; \bar{x} = média; σ = desvio padrão; σ^2 = variância

Fonte: Autor.

A Tabela 81 apresenta os resultados experimentais do viaduto V1 para as amostras 59 a 63. Neste conjunto, a duração do tempo de cada amostra é igual a 10 minutos.

O amortecimento médio foi igual a 4,22%, com desvio padrão de 0,79% e variância de 0,62. Isto indica um amortecimento entre 5,01% e 3,43%, onde os valores 3,36% e 5,20% ultrapassam estes limites.

O índice DI_{freq} apresentou valores negativos em três amostras, o que representa a inexistência de danos. A frequência natural não apresentou redução maior que 5%, o que representa uma ponte sem danos.

O valor SNR após o uso do filtro RDT indicou uma atenuação máxima de -13,99 dB e mínima de -12,69 dB e indica a melhoria da qualidade do sinal.

Tabela 81: Resultados experimentais obtidos para V1 – Amostras 59 a 63

| Data | 22/10/19 | | Local | L/2 | | | | | | |
|------------|-------------------------|-------|---------------------|------------|-------|-----------|---------------|-------------|-------|----------|
| Fase | Am. Nat/ F. Butterworth | | F. Butterworth/ RDT | | | | | | | |
| Am | Ap-a-p (g) | DI | SNR (dB) | Ap-a-p (g) | DI | ξ (%) | ω (Hz) | DI_{freq} | V | SNR (dB) |
| 59 | 0,024 | -3,57 | -20,43 | 0,023 | -3,61 | 3,36 | 11,71 | 0,02 | - | - |
| | | | | | | | | | 23,82 | 12,61 |
| 60 | 0,037 | -3,19 | -20,36 | 0,085 | -1,70 | 3,69 | 12,18 | -0,06 | - | - |
| | | | | | | | | | 16,28 | 12,69 |
| 61 | 0,030 | -3,38 | -20,34 | 0,028 | -3,44 | 4,89 | 11,31 | 0,09 | - | - |
| | | | | | | | | | 23,05 | 13,07 |
| 62 | 0,037 | -3,17 | -20,32 | 0,035 | -3,24 | 5,20 | 12,30 | -0,08 | - | - |
| | | | | | | | | | 16,29 | 13,99 |
| 63 | 0,038 | -3,15 | -20,32 | 0,036 | -3,20 | 3,97 | 12,51 | -0,12 | - | - |
| | | | | | | | | | 13,71 | 12,57 |
| \bar{x} | | | | | | 4,22 | 12,00 | | | |
| σ | | | | | | 0,79 | 0,49 | | | |
| σ^2 | | | | | | 0,62 | 0,24 | | | |

Onde: Am.= amostra; Am. Nat.= amostra natural; F. Butterworth = Filtro Butterworth; Ap-a-p=Aceleração de pico-a-pico; DI=índice de dano de aceleração pico-a-pico; SNR= coeficiente sinal-ruído; ξ =amortecimento; ω =frequência natural; DI_{freq} =índice de dano que considera a variação da frequência natural; V=índice de vibração; \bar{x} = média; σ = desvio padrão; σ^2 = variância

Fonte: Autor.

A Tabela 82 apresenta os resultados experimentais do viaduto V1 para as amostras 64 a 68. Este conjunto também adotou duração da amostra igual a 10 minutos.

O amortecimento médio foi igual a 4,26%, com desvio padrão de 0,71% e variância de 0,51. Isto indica uma faixa de amortecimento entre 4,97% e 3,55%, onde o valor de 5,45% não pertence a este limite.

A frequência natural média foi de 12,18 Hz, com desvio padrão igual a 0,21 Hz e variância de 0,04. Isto indica um intervalo de frequências entre 12,39 Hz e 11,97 Hz, onde o valor de 12,55 Hz não pertence a esta faixa de valores.

O índice DI_{freq} apresentou valores negativos, situação que indica uma ponte saudável. A frequência natural não apresentou redução.

O valor SNR após o uso do filtro RDT apresenta uma atenuação máxima de -12,32 dB e mínima de -11,25 dB, o que significa a melhoria da qualidade do sinal.

Tabela 82: Resultados experimentais obtidos para V1 – Amostras 64 a 68

| Data | 03/12/19 | | Local | | L/2 | | | | | |
|------------|-------------------------|-------|---------------------|---------------|-------|--------------|------------------|-------------|-------|-------------|
| Fase | Am. Nat/ F. Butterworth | | F. Butterworth/ RDT | | | | | | | |
| Am | Ap-a-p (g) | DI | SNR (dB) | Ap-a-p (g) | DI | ξ (%) | ω (Hz) | DI_{freq} | V | SNR (dB) |
| 64 | 0,034 | -3,28 | -20,30 | 0,031 | -3,34 | 3,72 | 12,15 | -0,05 | - | - |
| | | | | | | | | | 16,50 | 11,50 |
| 65 | 0,034 | -3,26 | -20,33 | 0,032 | -3,33 | 4,38 | 12,07 | -0,04 | - | - |
| | | | | | | | | | 15,96 | 11,32 |
| 66 | 0,046 | -2,90 | -20,25 | 0,044 | -2,95 | 3,88 | 12,55 | -0,13 | -9,29 | - |
| | | | | | | | | | | 12,12 |
| 67 | 0,023 | -3,62 | -20,34 | 0,020 | -3,68 | 5,45 | 12,02 | -0,03 | - | - |
| | | | | | | | | | 27,31 | 12,32 |
| 68 | 0,039 | -3,11 | -20,26 | 0,038 | -3,16 | 3,86 | 12,12 | -0,05 | - | - |
| | | | | | | | | | 12,81 | 11,25 |
| \bar{x} | | | | | | 4,26 | 12,18 | | | |
| σ | | | | | | 0,71 | 0,21 | | | |
| σ^2 | | | | | | 0,51 | 0,04 | | | |

Onde: Am.= amostra; Am. Nat.= amostra natural; F. Butterworth = Filtro Butterworth; Ap-a-p=Aceleração de pico-a-pico; DI=índice de dano de aceleração pico-a-pico; SNR= coeficiente sinal-ruído; ξ =amortecimento; ω =frequência natural; DI_{freq} =índice de dano que considera a variação da frequência natural; V=índice de vibração; \bar{x} = média; σ = desvio padrão; σ^2 = variância

Fonte: Autor.

ANEXO F – V2: RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A Tabela 83 apresenta as respostas experimentais obtidas para as amostras 95 a 100. O amortecimento médio obtido foi de 3,11%, com desvio padrão de 0,32% e variância de 0,10. Isto indica um intervalo de amortecimento entre 3,43% e 2,79%, onde dois valores não pertencem a este intervalo – 3,64% e 2,76%.

A frequência natural média foi de 6,44 Hz, com desvio padrão igual a 0,54 Hz e variância de 0,29. Isto indica um intervalo de frequência entre 6,98 Hz e 5,90 Hz, onde apenas o valor de 5,34 Hz não pertence a este intervalo.

O índice DI_{freq} apresentou valores positivos, o que indica a presença de danos. A variação da frequência indicou uma redução maior que 5% apenas na amostra 96.

O SNR após aplicar o RDT indicou uma atenuação máxima de -19,19 dB e -13,90 dB.

Tabela 83: Resultados experimentais obtidos para V2 - Amostras 95 a 100

| Data | 16/05/19 | | Local | | L/2 | | | | | |
|------------|-------------|-------|-------------|--------|---------------------|-------|----------|-------------|-------|-------|
| Fase | Am. Nat/ F. | | Butterworth | | F. Butterworth/ RDT | | | | | |
| Am | Ap-a-p | DI | SNR | Ap-a-p | DI | ξ | ω | DI_{freq} | V | SNR |
| | (g) | | (dB) | p (g) | | (%) | (Hz) | | | (dB) |
| 95 | 0,007 | -4,10 | -21,47 | 0,006 | -4,13 | 2,84 | 6,61 | 0,055 | - | - |
| | | | | | | | | | 68,47 | 13,90 |
| 96 | 0,009 | -4,04 | -21,27 | 0,008 | -4,08 | 3,29 | 5,34 | 0,383 | - | - |
| | | | | | | | | | 69,81 | 15,47 |
| 97 | 0,006 | -4,13 | -22,50 | 0,005 | -4,15 | 3,64 | 6,68 | 0,035 | - | - |
| | | | | | | | | | 71,03 | 15,82 |
| 98 | 0,011 | -3,96 | -21,41 | 0,010 | -4,00 | 2,76 | 6,69 | 0,032 | - | - |
| | | | | | | | | | 57,46 | 14,49 |
| 99 | 0,007 | -4,08 | -21,69 | 0,007 | -4,10 | 3,03 | 6,67 | 0,038 | - | - |
| | | | | | | | | | 64,93 | 19,19 |
| 100 | 0,009 | -4,04 | -21,38 | 0,008 | -4,07 | 3,09 | 6,63 | 0,049 | - | - |
| | | | | | | | | | 63,41 | 14,87 |
| \bar{x} | | | | | | 3,11 | 6,44 | | | |
| σ | | | | | | 0,32 | 0,54 | | | |
| σ^2 | | | | | | 0,10 | 0,29 | | | |

Onde: Am.= amostra; Am. Nat.= amostra natural; F. Butterworth = Filtro Butterworth; Ap-a-p=Aceleração de pico-a-pico; DI=índice de dano de aceleração pico-a-pico; SNR= coeficiente sinal-ruído; ξ =amortecimento; ω =frequência natural; DI_{freq} =índice de dano que considera a variação da frequência natural; V=índice de vibração; \bar{x} = média; σ = desvio padrão; σ^2 = variância

Fonte: Autor.

A Tabela 84 apresenta as respostas experimentais obtidas para as amostras 101 a 106. O amortecimento assumiu um valor médio igual a 2,92%, com desvio padrão de 0,48% e variância de 0,23. Isto indica um intervalo de amortecimento entre

3,40% e 2,44%, onde dois valores não pertencem a esta faixa de valores – 3,51% e 2,28%.

A frequência natural média foi de 6,59 Hz, com desvio padrão de 0,45 Hz e variância de 0,21. Assim, o intervalo de frequência natural varia de 7,04 Hz a 6,14 Hz, onde o valor de 5,67 Hz não pertence a esta faixa de valores.

O índice DI_{freq} apresentou valores ora positivos, ora negativos. Por segurança, os valores negativos foram descartados. A redução da frequência maior que 5% ocorreu apenas na amostra 105, o que representa a presença de danos.

O SNR após o RDT apresentou uma atenuação máxima de -15,11 dB e mínima de -12,58 dB, o que representa a melhoria da qualidade do sinal.

Tabela 84: Resultados experimentais obtidos para V2 - Amostras 101 a 106

| Data | 06/06/19 | | Local | | L/2 | | | | | |
|------------|----------|-------|----------------|--------|-----------------|-------|----------|-------------|-------|-------|
| Fase | Am. Nat/ | | F. Butterworth | | F. Butterworth/ | | RDT | | | |
| Am | Ap-a-p | DI | SNR | Ap-a-p | DI | ξ | ω | DI_{freq} | V | SNR |
| | (g) | | (dB) | p (g) | | (%) | (Hz) | | | (dB) |
| 101 | 0,010 | -4,02 | -22,77 | 0,007 | -4,11 | 3,51 | 6,70 | 0,029 | - | - |
| | | | | | | | | | 65,62 | 15,11 |
| 102 | 0,009 | -4,04 | -21,77 | 0,007 | -4,10 | 3,31 | 6,73 | 0,020 | - | - |
| | | | | | | | | | 66,86 | 12,58 |
| 103 | 0,007 | -4,09 | -22,30 | 0,005 | -4,15 | 2,81 | 6,83 | - | - | - |
| | | | | | | | | 0,009 | 69,22 | 15,22 |
| 104 | 0,012 | -3,95 | -22,18 | 0,009 | -4,05 | 2,50 | 6,85 | - | - | - |
| | | | | | | | | 0,015 | 61,20 | 14,54 |
| 105 | 0,008 | -4,07 | -22,31 | 0,006 | -4,12 | 3,09 | 5,67 | 0,305 | - | - |
| | | | | | | | | | 72,76 | 14,83 |
| 106 | 0,009 | -4,03 | -22,40 | 0,006 | -4,11 | 2,28 | 6,74 | 0,018 | - | - |
| | | | | | | | | | 67,03 | 12,75 |
| \bar{x} | | | | | | 2,92 | 6,59 | | | |
| σ | | | | | | 0,48 | 0,45 | | | |
| σ^2 | | | | | | 0,23 | 0,21 | | | |

Onde: Am.= amostra; Am. Nat.= amostra natural; F. Butterworth = Filtro Butterworth; Ap-a-p=Aceleração de pico-a-pico; DI=índice de dano de aceleração pico-a-pico; SNR= coeficiente sinal-ruído; ξ =amortecimento; ω =frequência natural; DI_{freq} =índice de dano que considera a variação da frequência natural; V=índice de vibração; \bar{x} = média; σ = desvio padrão; σ^2 = variância

Fonte: Autor

A Tabela 85 apresenta as respostas experimentais obtidas para as amostras 107 a 112. O amortecimento assumiu um valor médio de 3,32%, com desvio padrão igual a 0,57 e variância de 0,33. Isto indica um intervalo de amortecimento de 3,89% a 2,75%, onde existem dois valores que não pertencem a esta faixa de valores – 4,38% e 2,71%.

A frequência natural indicou um valor médio de 6,38 Hz, com desvio padrão de 0,59 Hz e variância de 0,35. Isto indica um intervalo de frequências de 6,97 Hz e 5,79 Hz, onde apenas o valor de 5,77 Hz não pertence a esta faixa de valores.

O índice DI_{freq} apresentou valores positivos, o que indica a presença de danos. A variação da frequência foi maior que 5% nas amostras 107 e 109, o que representa à presença de danos.

O valor SNR após o filtro RDT indicou uma atenuação máxima de -18,38 dB e mínima de -12,24 dB. Isto indica a melhoria da qualidade do sinal.

Tabela 85: Resultados experimentais obtidos para V2 - Amostras 107 a 112

| Data | 27/06/19 | | Local | | L/2 | | F. Butterworth/ RDT | | DI_{freq} | V | SNR (dB) |
|------------|------------|----------------|-----------------|------------|-------|-----------|---------------------|---------------|---------------|-------|----------|
| Fase | Am. Nat/ | F. Butterworth | F. Butterworth/ | | RDT | | ξ (%) | ω (Hz) | | | |
| Am | Ap-a-p (g) | DI | SNR (dB) | Ap-a-p (g) | DI | ξ (%) | | | ω (Hz) | | |
| 107 | 0,008 | -4,07 | -22,54 | 0,006 | -4,14 | 4,38 | 5,77 | 0,280 | - | - | |
| 108 | 0,025 | -3,55 | -21,00 | 0,023 | -3,60 | 2,71 | 6,78 | 0,006 | 74,96 | 18,38 | |
| 109 | 0,012 | -3,93 | -21,71 | 0,009 | -4,03 | 3,39 | 5,48 | 0,351 | - | - | |
| 110 | 0,010 | -4,00 | -21,82 | 0,006 | -4,13 | 3,30 | 6,73 | 0,020 | 66,05 | 14,26 | |
| 111 | 0,009 | -4,05 | -21,68 | 0,008 | -4,08 | 3,07 | 6,80 | 0,000 | 67,55 | 14,75 | |
| 112 | 0,009 | -4,02 | -21,78 | 0,008 | -4,08 | 3,05 | 6,72 | 0,023 | 63,31 | 16,21 | |
| \bar{x} | | | | | | 3,32 | 6,38 | | 64,87 | 13,35 | |
| σ | | | | | | 0,57 | 0,59 | | | | |
| σ^2 | | | | | | 0,33 | 0,35 | | | | |

Onde: Am.= amostra; Am. Nat.= amostra natural; F. Butterworth = Filtro Butterworth; Ap-a-p=Aceleração de pico-a-pico; DI=índice de dano de aceleração pico-a-pico; SNR=coeficiente sinal-ruído; ξ =amortecimento; ω =frequência natural; DI_{freq} =índice de dano que considera a variação da frequência natural; V=índice de vibração; \bar{x} = média; σ = desvio padrão; σ^2 = variância

Fonte: Autor.

A Tabela 86 apresenta as respostas experimentais obtidas para as amostras 113 a 118. O amortecimento máximo foi de 5,10% e o mínimo de 2,14%.

As frequências naturais se referem a dois modos de vibração: um próximo a 6 Hz e outro próximo a 17 Hz.

O índice DI_{freq} apresentou um valor negativo e o restante positivo. Não ocorreram reduções de frequências naturais maiores que 5%.

O SNR após aplicar o RDT indicou uma atenuação máxima de -14,87 dB e mínima de -12,89 dB, o que indica a melhoria do sinal.

Tabela 86: Resultados experimentais obtidos para V2 - Amostras 113 a 118

| Data | 31/07/19 | | Local | L/2 | | | | | | | |
|------------|-------------------------|-------|---------------------|---------------|-------|--------------|------------------|-------------|-------|-------------|--|
| Fase | Am. Nat/ F. Butterworth | | F. Butterworth/ RDT | | | | | | | | |
| Am | Ap-a-p (g) | DI | SNR (dB) | Ap-a-p (g) | DI | ξ (%) | ω (Hz) | DI_{freq} | V | SNR (dB) | |
| 113 | 0,013 | -3,91 | -21,89 | 0,009 | -4,02 | 2,86 | 6,62 | 0,052 | - | - | |
| | | | | | | | | | 59,08 | 14,56 | |
| 114 | 0,007 | -4,10 | -22,28 | 0,005 | -4,17 | 2,14 | 6,70 | 0,029 | - | - | |
| | | | | | | | | | 72,86 | 14,43 | |
| 115 | 0,012 | -3,95 | -22,95 | 0,006 | -4,11 | 5,10 | 16,91 | - | - | - | |
| | | | | | | | | 0,251 | 40,60 | 12,89 | |
| 116 | 0,010 | -3,99 | -22,21 | 0,008 | -4,06 | 2,28 | 6,65 | 0,044 | - | - | |
| | | | | | | | | | 61,97 | 14,27 | |
| 117 | 0,007 | -4,10 | -22,69 | 0,005 | -4,15 | 2,63 | 6,52 | 0,081 | - | - | |
| | | | | | | | | | 70,17 | 14,15 | |
| 118 | 0,009 | -4,04 | -22,17 | 0,006 | -4,12 | 2,90 | 6,68 | 0,035 | - | - | |
| | | | | | | | | | 67,37 | 14,87 | |
| \bar{x} | | | | | | - | - | | | | |
| σ | | | | | | - | - | | | | |
| σ^2 | | | | | | - | - | | | | |

Onde: Am.= amostra; Am. Nat.= amostra natural; F. Butterworth = Filtro Butterworth; Ap-a-p=Aceleração de pico-a-pico; DI=índice de dano de aceleração pico-a-pico; SNR= coeficiente sinal-ruído; ξ =amortecimento; ω =frequência natural; DI_{freq} =índice de dano que considera a variação da frequência natural; V=índice de vibração; \bar{x} = média; σ = desvio padrão; σ^2 = variância

Fonte: Autor.

A Tabela 87 apresenta as respostas experimentais obtidas para as amostras 119 a 124.

O amortecimento médio assumiu um valor de 2,65%, com desvio padrão de 0,35% e variância de 0,12. Isto configura um amortecimento com intervalo entre 3,00% e 2,30%, onde dois valores não pertencem a esta faixa de valores – 3,05% e 2,13%.

A frequência natural média foi de 6,69 Hz, com desvio padrão de 0,12 e variância de 0,02. Isto indica um intervalo de frequência natural entre 6,81 Hz e 6,57 Hz, onde apenas a frequência de 6,91 Hz não pertence a esta faixa de valores.

O índice DI_{freq} apresentou valores positivos em cinco amostras, o que configura a existência de danos. Não ocorreram reduções de frequências naturais maiores que 5%.

O SNR aplicado após o filtro RDT indicou atenuações máxima e mínima de -16,43 dB e -12,53 dB, o que representa a melhoria do sinal.

Tabela 87: Resultados experimentais obtidos para V2 - Amostras 119 a 124

| Data | 29/08/19 | | Local | L/2 | | | | | | | |
|------------|-------------|-------|-------------|---------------------|-------|-------|----------|-------------|-------|-------|--|
| Fase | Am. Nat/ F. | | Butterworth | F. Butterworth/ RDT | | | | | | | |
| Am | Ap-a-p | DI | SNR | Ap-a-p | DI | ξ | ω | DI_{freq} | V | SNR | |
| | (g) | | (dB) | p (g) | | (%) | (Hz) | | | (dB) | |
| 119 | 0,009 | -4,03 | -22,48 | 0,008 | -4,06 | 2,13 | 6,76 | 0,012 | - | - | |
| | | | | | | | | | 61,35 | 15,03 | |
| 120 | 0,012 | -3,95 | -22,24 | 0,009 | -4,04 | 2,88 | 6,61 | 0,055 | - | - | |
| | | | | | | | | | 60,06 | 15,47 | |
| 121 | 0,012 | -3,94 | -22,25 | 0,007 | -4,11 | 2,88 | 6,61 | 0,055 | - | - | |
| | | | | | | | | | 65,90 | 16,43 | |
| 122 | 0,014 | -3,87 | -22,24 | 0,009 | -4,03 | 3,05 | 6,65 | 0,044 | - | - | |
| | | | | | | | | | 58,73 | 15,24 | |
| 123 | 0,011 | -3,97 | -22,22 | 0,009 | -4,03 | 2,55 | 6,59 | 0,061 | - | - | |
| | | | | | | | | | 22,22 | 12,53 | |
| 124 | 0,008 | -4,06 | -22,72 | 0,007 | -4,09 | 2,41 | 6,91 | - | - | - | |
| | | | | | | | | 0,033 | 63,63 | 13,21 | |
| \bar{x} | | | | | | 2,65 | 6,69 | | | | |
| σ | | | | | | 0,35 | 0,12 | | | | |
| σ^2 | | | | | | 0,12 | 0,02 | | | | |

Onde: Am.= amostra; Am. Nat.= amostra natural; F. Butterworth = Filtro Butterworth; Ap-a-p=Aceleração de pico-a-pico; DI=índice de dano de aceleração pico-a-pico; SNR= coeficiente sinal-ruído; ξ =amortecimento; ω =frequência natural; DI_{freq} =índice de dano que considera a variação da frequência natural; V=índice de vibração; \bar{x} = média; σ = desvio padrão; σ^2 = variância

Fonte: Autor.

A Tabela 88 apresenta as respostas experimentais obtidas para as amostras 125 a 130.

O amortecimento médio assumiu igual a 2,54%, com desvio padrão igual a 0,53 e variância de 0,28. Isto indica um amortecimento entre 3,07% e 2,01%, onde dois valores não pertencem a este intervalo de valores – 3,37% e 1,99%.

A frequência natural média foi igual a 6,58 Hz, com desvio padrão 0,13 Hz e variância de 0,02. Isto indica um intervalo de frequência entre 6,71 Hz e 6,45 Hz, onde apenas o valor de 6,77 Hz não pertence a esta faixa de valores.

O índice DI_{freq} apresentou valores positivos, o que representa a existência de danos. A redução da frequência natural é maior que 5% na amostra 128 e representa a presença de danos.

O SNR aplicado após o RDT indicou atenuações máxima e mínima de -15,03 dB e -12,91, respectivamente. Isto é, a partir do uso do filtro RDT, a qualidade do sinal passa por uma melhoria.

Tabela 88: Resultados experimentais obtidos para V2 - Amostras 125 a 130

| Data | 25/09/19 | | Local | L/2 | | | | | | | |
|------------|-------------------------|-------|---------------------|---------------|-------|--------------|------------------|-------------|-------|-------------|--|
| Fase | Am. Nat/ F. Butterworth | | F. Butterworth/ RDT | | | | | | | | |
| Am | Ap-a-p (g) | DI | SNR (dB) | Ap-a-p (g) | DI | ξ (%) | ω (Hz) | DI_{freq} | V | SNR (dB) | |
| 125 | 0,008 | -4,07 | -21,21 | 0,007 | -4,09 | 2,27 | 6,63 | 0,049 | - | - | |
| | | | | | | | | | 61,35 | 15,03 | |
| 126 | 0,008 | -4,05 | -21,33 | 0,007 | -4,08 | 3,37 | 6,51 | 0,083 | - | - | |
| | | | | | | | | | 62,84 | 12,35 | |
| 127 | 0,010 | -4,00 | -21,30 | 0,009 | -4,04 | 2,18 | 6,77 | 0,009 | - | - | |
| | | | | | | | | | 59,84 | 13,24 | |
| 128 | 0,009 | -4,04 | -21,41 | 0,007 | -4,09 | 1,99 | 6,40 | 0,114 | - | - | |
| | | | | | | | | | 65,41 | 12,91 | |
| 129 | 0,010 | -4,01 | -21,01 | 0,009 | -4,04 | 2,41 | 6,53 | 0,078 | - | - | |
| | | | | | | | | | 59,26 | 14,51 | |
| 130 | 0,016 | -3,82 | -20,78 | 0,015 | -3,85 | 2,99 | 6,66 | 0,041 | - | - | |
| | | | | | | | | | 49,28 | 14,32 | |
| \bar{x} | | | | | | 2,54 | 6,58 | | | | |
| σ | | | | | | 0,53 | 0,13 | | | | |
| σ^2 | | | | | | 0,28 | 0,02 | | | | |

Onde: Am.= amostra; Am. Nat.= amostra natural; F. Butterworth = Filtro Butterworth; Ap-a-p=Aceleração de pico-a-pico; DI=índice de dano de aceleração pico-a-pico; SNR= coeficiente sinal-ruído; ξ =amortecimento; ω =frequência natural; DI_{freq} =índice de dano que considera a variação da frequência natural; V=índice de vibração; \bar{x} = média; σ = desvio padrão; σ^2 = variância

Fonte: Autor.

A Tabela 89 apresenta as respostas experimentais obtidas para as amostras 131 a 135. A duração destas amostras foi de 10 minutos.

O valor do amortecimento médio foi de 3,27%, com desvio padrão igual a 0,35 e variância de 0,12. Isto indica um intervalo de amortecimento entre 3,62% e 2,92%, onde dois valores não pertencem a este intervalo – 3,68% e 2,73%.

A frequência natural média foi de 6,58 Hz, com desvio padrão igual a 0,05 e variância igual a 0,002. Isto indica uma faixa de frequências naturais entre 6,63 Hz e 6,53 Hz, onde todos os valores pertencem a este intervalo.

O índice DI_{freq} apresentou valores positivos e representa a existência de danos. A redução da frequência natural é menor que 5%.

O SNR aplicado após o uso do RDT indicou a ocorrência de atenuações máxima e mínima de -15,57 dB e -13,59 dB, respectivamente. Isto representa a melhoria na qualidade do sinal.

Tabela 89: Resultados experimentais obtidos para V2 - Amostras 131 a 135

| Data | 22/10/19 | | Local | L/2 | F. Butterworth/ RDT | | | Dl_{freq} | V | SNR (dB) |
|------------|------------|----------------|----------|------------|---------------------|-------|----------|-------------|-------|----------|
| Fase | Am. Nat/ | F. Butterworth | | | DI | ξ | ω | | | |
| Am | Ap-a-p (g) | DI | SNR (dB) | Ap-a-p (g) | | (%) | (Hz) | | | |
| 131 | 0,009 | -4,03 | -22,04 | 0,007 | -4,10 | 3,38 | 6,60 | 0,058 | - | - |
| | | | | | | | | | 64,95 | 13,59 |
| 132 | 0,011 | -3,98 | -21,74 | 0,008 | -4,05 | 3,68 | 6,63 | 0,049 | - | - |
| | | | | | | | | | 63,13 | 15,57 |
| 133 | 0,009 | -4,04 | -21,73 | 0,008 | -4,08 | 2,73 | 6,59 | 0,061 | - | - |
| | | | | | | | | | 61,11 | 14,47 |
| 134 | 0,012 | -3,95 | -21,65 | 0,010 | -4,01 | 3,39 | 6,50 | 0,086 | - | - |
| | | | | | | | | | 61,97 | 14,35 |
| 135 | 0,015 | -3,85 | -21,09 | 0,014 | -3,88 | 3,19 | 6,58 | 0,064 | - | - |
| | | | | | | | | | 50,82 | 13,51 |
| \bar{x} | | | | | | 3,27 | 6,58 | | | |
| σ | | | | | | 0,35 | 0,05 | | | |
| σ^2 | | | | | | 0,12 | 0,00 | | | |

Onde: Am.= amostra; Am. Nat.= amostra natural; F. Butterworth = Filtro Butterworth; Ap-a-p=Aceleração de pico-a-pico; DI=índice de dano de aceleração pico-a-pico; SNR= coeficiente sinal-ruído; ξ =amortecimento; ω =frequência natural; Dl_{freq} =índice de dano que considera a variação da frequência natural; V=índice de vibração; \bar{x} = média; σ = desvio padrão; σ^2 = variância

Fonte: Autor.

A Tabela 90 apresenta as respostas experimentais obtidas para as amostras 136 a 140. Estas amostras também apresentaram 10 minutos de duração.

O amortecimento médio foi igual a 2,95%, com desvio padrão de 0,49% e variância de 0,24. Isto indica uma faixa de amortecimento entre 3,44% e 2,46%, onde apenas o valor de 3,78% não pertence a esta faixa de valores.

A frequência média foi igual a 6,55 Hz, com desvio padrão de 0,05 e variância de 0,003. Assim, a frequência natural possui uma faixa de valores entre 6,60 Hz e 6,50 Hz, onde apenas o valor de 6,63 Hz não pertence a esta faixa de valores.

O índice Dl_{freq} apresenta valores positivos, o que representa a existência de danos. A redução da frequência natural foi menor que 5%.

O SNR após o RDT apresentou atenuações máximas e mínima de -15,02 dB e -12,74 dB, respectivamente. Isto é um indicativo da melhoria do sinal após o uso do filtro RDT.

Tabela 90: Resultados experimentais obtidos para V2 - Amostras 136 a 140

| Data | 22/10/19 | | Local | L/2 | F. Butterworth/ RDT | | | | | | |
|------------|-------------------------|-------|---------------------|----------------|---------------------|--------------|------------------|--------------------|-------|-------------|--|
| Fase | Am. Nat/ F. Butterworth | | F. Butterworth/ RDT | | | | | | | | |
| Am | Ap-a-p (g) | DI | SNR (dB) | Ap-a- p (g) | DI | ξ (%) | ω (Hz) | DI _{freq} | V | SNR (dB) | |
| 136 | 0,011 | -3,96 | -21,84 | 0,008 | -4,06 | 2,89 | 6,51 | 0,083 | - | - | |
| | | | | | | | | | 62,70 | 13,43 | |
| 137 | 0,013 | -3,91 | -22,02 | 0,008 | -4,05 | 2,72 | 6,49 | 0,089 | - | - | |
| | | | | | | | | | 63,42 | 13,42 | |
| 138 | 0,012 | -3,94 | -22,02 | 0,009 | -4,03 | 2,89 | 6,57 | 0,067 | - | - | |
| | | | | | | | | | 59,82 | 15,02 | |
| 139 | 0,008 | -4,05 | -21,83 | 0,007 | -4,09 | 2,48 | 6,54 | 0,075 | - | - | |
| | | | | | | | | | 67,18 | 13,76 | |
| 140 | 0,013 | -3,90 | -22,76 | 0,008 | -4,06 | 3,78 | 6,63 | 0,049 | - | - | |
| | | | | | | | | | 62,11 | 12,74 | |
| \bar{x} | | | | | | 2,95 | 6,55 | | | | |
| σ | | | | | | 0,49 | 0,05 | | | | |
| σ^2 | | | | | | 0,24 | 0,003 | | | | |

Onde: Am.= amostra; Am. Nat.= amostra natural; F. Butterworth = Filtro Butterworth; Ap-a-p=Aceleração de pico-a-pico; DI=índice de dano de aceleração pico-a-pico; SNR= coeficiente sinal-ruído; ξ =amortecimento; ω =frequência natural; DI_{freq}=índice de dano que considera a variação da frequência natural; V=índice de vibração; \bar{x} = média; σ = desvio padrão; σ^2 = variância

Fonte: Autor.

ANEXO G - INSPEÇÃO VISUAL SEGUNDO A NBR 9452/2019

Com validade em todo o território nacional, a NBR 9452, com versão atual de 2019, se destina à inspeção de OAEs em concreto. Versões anteriores desta normativa deram origem a outras duas metodologias de inspeção: DNIT 010:2004 e; ARTESP ET-C21:2007.

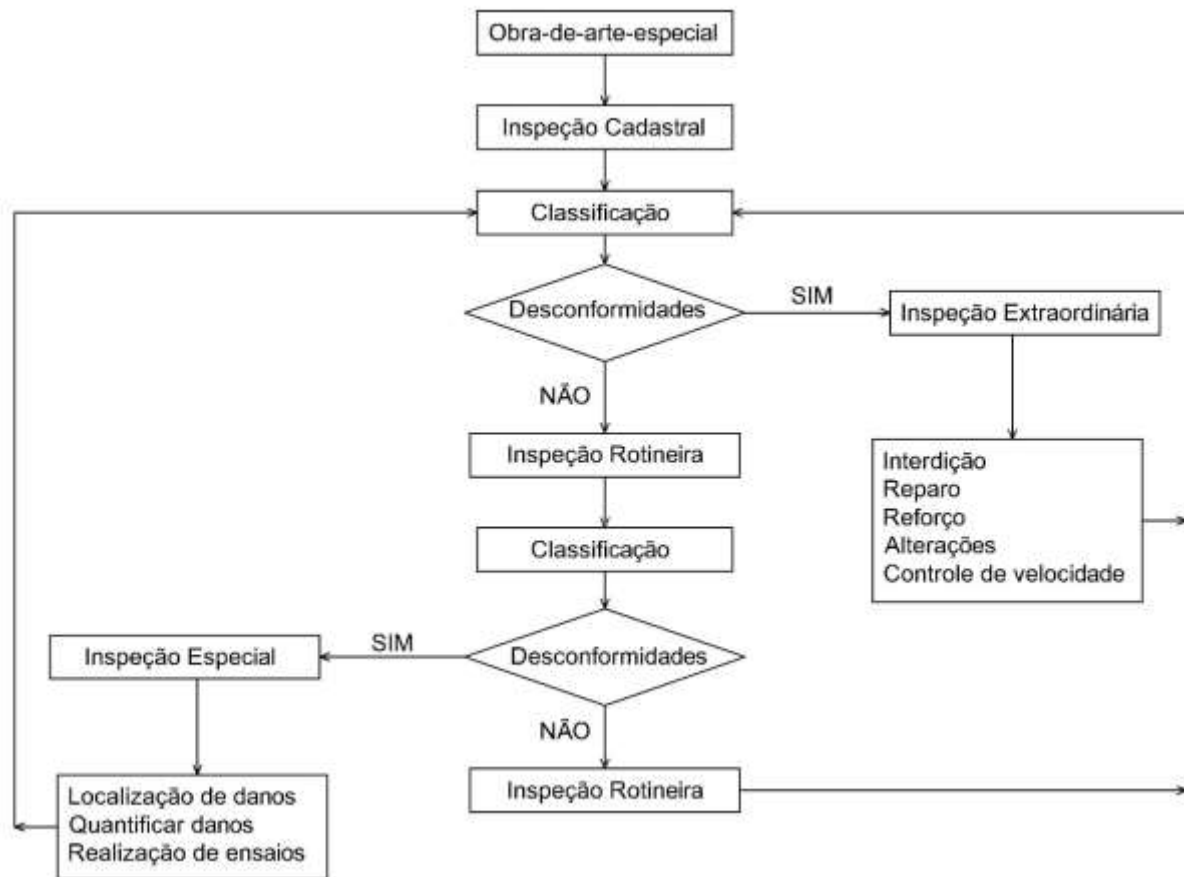
Faz uso de uma metodologia visual para identificar, apontar, reconhecer e classificar danos. Além disso, possui quatro categorias de inspeção: cadastral; rotineira; especial e; extraordinária. A inspeção avalia a estrutura através de três grandes agrupamentos: superestrutura, mesoestrutura e infraestrutura.

As inspeções cadastral e rotineira geram e atualizam os dados do inventário. Em caso de desconformidades podem exigir a execução de inspeções especiais e extraordinárias. Enquanto que as inspeções especiais e extraordinárias podem exigir a interdição da estrutura, reforço ou reparo de emergência, alteração de sobrecarga e limite de velocidade, observação permanente, demolição e controle de tráfego.

Ao ser utilizada, prevê o registro fotográfico de, no mínimo, uma foto da vista geral do tabuleiro, uma da lateral e uma do inferior do tabuleiro, dos elementos da mesoestrutura e da infraestrutura. Também devem ser registrados as anomalias identificadas que afetam a estrutura, a funcionalidade e a durabilidade da obra.

Segundo Simões, Rodrigues e Pinheiro (2021), os resultados obtidos através desta norma retratam apenas a condição mais crítica e não representam o estado de conservação da estrutura como um todo. Assim, elementos estruturais secundários ou complementares não influenciam sobre a nota final da classificação. De forma sucinta, o método facilita na intervenção mais urgente, porém, dificulta ao não detalhar de forma adequada o restante das informações sobre a ponte. O Fluxograma 3 apresenta a sequência do processo de inspeção para obras de arte especiais.

Fluxograma 3: Sequência da inspeção em OAEs segundo a ABNT NBR 9452/2019



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 9452/2019.

Inspeção cadastral

A inspeção cadastral é a primeira a ser aplicada e é realizada após a conclusão da OAE ou assim que forem realizadas alterações na configuração estrutural. Refere-se ao registro de identificação e localização da obra, das características estruturais e funcionais. Utiliza registros fotográficos, desenhos esquemáticos das seções transversal e longitudinal, além de informações importantes.

Inspeção rotineira

A inspeção rotineira ocorre de maneira programada e frequente, realizada entre intervalos de tempo de um a dois anos, dependente da condição da OAE. De maneira visual com o uso de registros fotográficos, podem-se utilizar equipamentos ou recursos especiais para o acesso na estrutura. Busca verificar a evolução de anomalias já identificadas em inspeções anteriores e o surgimento de novos danos. Avalia o estado dos reparos efetuados em manutenções anteriores. Deve atualizar as informações das inspeções rotineiras prévias ou cadastral.

Inspeção especial

A inspeção especial localiza e quantifica os danos de todos os elementos da OAE. É indicada a utilização de equipamentos que facilitem o acesso a todos os componentes da estrutura. Permite a realização de ensaios para definir a existência de danos conforme as normas nacionais ou quaisquer outras existentes que venham a se adequar à necessidade. Abrange a inspeção subaquática em elementos submersos.

O intervalo de execução não pode exceder dez anos para casos de condição boa e excelente. Para pontes com classificação da condição mais baixa, este intervalo reduz para cinco anos. Em casos onde inspeções anteriores classificam as OAEs como críticas ou ruins – notas 1 e 2, respectivamente -, devem ocorrer imediatamente as inspeções especiais. Outro caso que exige inspeção especial imediata é quando forem previstas mudanças significativas na configuração estrutural como: alargamentos, prolongamentos, reforços e elevação de classes de carregamentos.

Inspeção extraordinária

A inspeção extraordinária pode ser executada sem a necessidade de inspeções anteriores. É utilizada quando um elemento ou parte da OAE exige avaliação criteriosa, devido a um impacto na estrutura, desastres naturais e outros.

Exige a indicação dos reparos a serem aplicados sobre o elemento danificado.

Classificação segundo a ABNT NBR 9452/2019

A classificação obedece ao quesito estrutural, funcional, de durabilidade e a gravidade dos problemas detectados. O parâmetro estrutural se refere à segurança estrutural da OAE, a estabilidade e a capacidade portante. O funcional considera a geometria – visibilidade, gabaritos verticais e horizontais – e a segurança dos usuários: guarda-corpos íntegros, ausência de depressões ou buracos na pista de rolamento e sinalização adequada. A durabilidade considera a vida útil da estrutura, a resistência contra a ação de agentes ambientais agressivos – ausência de cobrimento de armadura, corrosão, fissuração, erosão de taludes de encontros, entre outros.

A classificação varia de 1 a 5 e reflete as respectivas condições: crítica – nota 1; ruim – nota 2; regular – nota 3, boa – nota 4; excelente – nota 5. A nota final deve ser a menor nota atribuída ao componente estrutural analisado.

A Tabela 91 apresenta a classificação da condição de uma OAE segundo o parâmetro estrutural, funcional e de durabilidade.

Tabela 91: Classificação da condição segundo a ABNT NBR 9452/2019

| Nota de classificação | Condição | Caracterização estrutural | Caracterização funcional | Caracterização de durabilidade |
|-----------------------|-----------|---|---|--|
| 5 | Excelente | A estrutura apresenta-se em condições satisfatórias, apresentando defeitos irrelevantes e isolados. | A OAE apresenta segurança e conforto aos usuários. | A OAE apresenta-se em perfeitas condições, devendo ser prevista manutenção de rotina. |
| 4 | Boa | A estrutura apresenta danos pequenos e em áreas, sem comprometer a segurança estrutural. | A OAE apresenta pequenos danos que não chegam a causar desconforto ou insegurança ao usuário. | A OAE apresenta pequenas e poucas anomalias, que comprometem sua vida útil, em região de baixa agressividade ambiental. |
| 3 | Regular | Há danos que podem vir a gerar alguma deficiência estrutural. Mas não há sinais de comprometimento da estabilidade da obra. Recomenda-se Acompanhamento dos problemas. Intervenções podem ser necessárias a médio prazo. | A OAE apresenta desconforto ao usuário, com defeitos que requerem ações de médio prazo. | A OAE apresenta pequenas e poucas anomalias, que comprometem sua vida útil, em região de moderada a alta agressividade ambiental. A OAE apresenta moderadas a muitas anomalias, que comprometem sua vida útil, em região de baixa agressividade ambiental. |
| 2 | Ruim | Há danos comprometendo a segurança estrutural da OAE, sem risco iminente. Sua evolução pode levar ao colapso estrutural. A OAE necessita de intervenções significativas a curto prazo. | A OAE com funcionalidade visivelmente comprometida, com riscos de segurança ao usuário, requerendo intervenções de curto prazo. | A OAE apresenta moderadas a muitas manifestações patológicas, que comprometem sua vida útil, em região de alta agressividade ambiental. |
| 1 | Crítica | Há danos gerando grave insuficiência estrutural na OAE. Há elementos estruturais em estado crítico, com risco tangível de colapso estrutural. A OAE necessita intervenção imediata, podendo ser necessária restrição de carga, interdição total ou parcial ao tráfego, escoramento provisório, instrumentação, associadas ou não. | A OAE não apresenta condições funcionais de utilização. | A OAE encontra-se em elevado grau de deterioração, apontando problema já de risco estrutural e/ou funcional. |

Fonte: ABNT NBR 9452/2019.

A nota final é a menor nota atribuída ao componente estrutural analisado. São avaliados a superestrutura, mesoestrutura, infraestrutura, elementos complementares – estrutura e entorno – e a pista. A medida que a nota diminui, aumenta a quantidade de danos que influenciam na durabilidade.

ANEXO H – INSPEÇÃO VISUAL SEGUNDO A DNIT 010/2004 PRO

A outra norma de inspeção vigente em território nacional é a DNIT 010/2004 – PRO: Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido – Procedimento, que utiliza como referência normativa a o texto original ABTN NBR 9452 - Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto — Procedimento.

As inspeções realizadas através desta norma visam fornecer informações para o SGO – Sistema de Gerenciamento de Obras de arte – do DNIT. As OAEs que passam por esta inspeção estão situadas em rodovias federais. Entretanto, na ficha referente à inspeção cadastral é previsto sua execução em rodovias estaduais – DER.

Determina que a inspeção apresente, no mínimo, seis fotos que contemplem as vistas superior, inferior, laterais, detalhes de apoios, articulações, juntas, entre outros. Além disso, os defeitos encontrados também devem ser registrados através de fotografia.

Apresenta distinções para o profissional que executa a inspeção, o qual deve possuir um registro no CREA. Existem duas categorias para o responsável pela inspeção: inspetor e; inspetor sênior. O inspetor atua nas inspeções Cadastral, Rotineira e Intermediária com pontes menores que duzentos metros, além de possuir experiência em projeto e inspeção de pontes. O inspetor sênior atua nas inspeções Extraordinária e Especial em estruturas maiores que duzentos metros, além de possuir experiência no projeto, execução, recuperação, reforço e reabilitação de pontes.

Para a inspeção dos elementos com função estrutural as OAEs são divididas em: laje, vigamento principal, mesoestrutura, infraestrutura e pistas de acesso. Apresenta cinco categorias de inspeção: cadastral; rotineira; extraordinária; especial e; intermediária.

Segundo o item 7.2 da norma, as inspeções Cadastral e Rotineira podem resultar em três providências:

- I. Observar defeitos toleráveis e iniciar os trabalhos de manutenção como: limpeza e drenagem; falhas locais de fácil correção; correção em aparelhos de apoio; reparos na pista de rolamento sem acréscimo de espessura da mesa; reparos em barreiras e guarda-corpos;

- II. Observar defeitos que podem afetar o desempenho, entre os quais os graves e ou críticos, e julgar a necessidade de realizar a inspeção especial;
- III. Observar defeitos toleráveis os quais não afetem de maneira significativa o desempenho, sem avaliar a velocidade da evolução dos danos, e determinar a necessidade de uma inspeção intermediária.

Inspeção cadastral

A primeira inspeção é a cadastral e é aplicada assim que finaliza a fase de construção ou quando é realizado uma modificação estrutural importante. Deve ser minuciosa, pois as informações coletadas referentes ao projeto, fiscalização e supervisão servirão como base para as inspeções realizadas posteriormente.

Fornecer as primeiras informações sobre os elementos de projeto, topográficos, geotécnicos, hidrológicos, detalhamentos, memoriais, planejamento de trabalho, referências topográficas utilizadas na estrutura, garantia, entre outros.

Inspeção rotineira

As inspeções rotineiras são executadas a cada dois anos. Busca identificar novos defeitos e a evolução das falhas já detectadas em inspeções anteriores. Verifica a condição dos reparos realizados em antigas manutenções.

Fornecer comentários gerais sobre as condições de estabilidade, conservação, vibração e indica os danos nos elementos estruturais.

Inspeção extraordinária

Inspeção executada quando se deseja avaliar um dano estrutural causado pelo homem ou pela natureza. Pode resultar no condicionamento do tráfego desde a limitação da carga atuante, paralisação total e indicar a necessidade de uma inspeção especial.

São exemplos de casos onde a inspeção extraordinária é executada: recalque da fundação, erosão inicial, entre outros.

Inspeções especiais

As inspeções especiais são realizadas em intervalo não superior a cinco anos, onde todos os elementos devem ser inspecionados com ajuda de instrumentos de acesso. Pode exigir o uso de instrumentos de medição de flechas ou deformações.

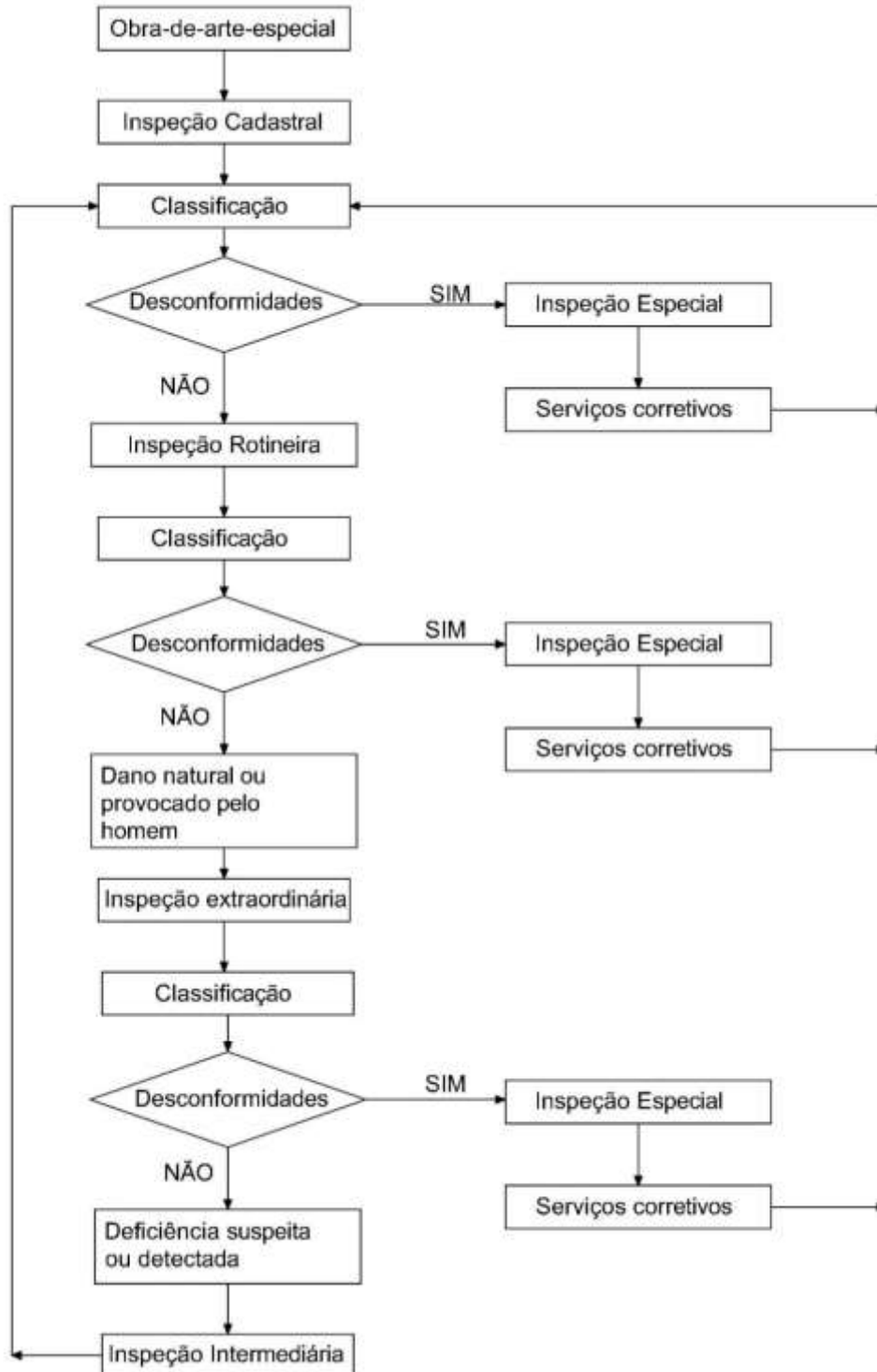
É prevista em casos onde inspeções cadastral e rotineira revelarem defeitos graves ou críticos na estrutura; em pontes complexas e; em ocasiões especiais como a passagem de cargas singulares.

Inspeção intermediária

Esta categoria de inspeção é executada para monitorar um dano suspeito ou já identificado em uma inspeção anterior. Busca descrever e detalhar a deficiência e possíveis reparos necessários. Deve identificar a evolução e possíveis tratamentos para os danos existentes.

O Fluxograma 4 apresenta a sequência de processos da inspeção através do DNIT 010/2004 – PRO. Os processos de “Dano natural ou provocado pelo homem” e “Deficiência suspeita ou detectada” foram propositalmente inseridos para ser possível a indicação das inspeções extraordinária e intermediária.

Fluxograma 4: Sequência da inspeção em OAEs segundo a norma DNIT 010/2004 - PRO



Fonte: Adaptado da DNIT 101/2004 – PRO.

É importante destacar que para a inspeção obter melhores resultados deve-se considerar o Manual de Inspeção de pontes Rodoviárias do DNIT (2004) como material fundamental.

Classificação segundo a norma DNIT 010/2004 – PRO

A classificação estabelecida é bastante semelhante a ABNT NBR 9452/2016 e também varia de 1 a 5. Porém, são indicadas ações corretivas de acordo com a classificação atingida pela estrutura.

A Tabela 92 apresenta a classificação segundo a norma do DNIT 010/2004 - PRO.

Tabela 92: Classificação dos elementos com função estrutural segundo o DNIT.

| Nota | Dano no elemento/insuficiência estrutural | Ação corretiva | Condições de estabilidade | Classificação das condições das pontes |
|------|---|--|---------------------------|--|
| 5 | Não há danos nem insuficiência estrutural. | Nada a fazer. | Boa | Obra sem problemas |
| 4 | Há alguns danos, mas não há sinais de que estejam gerando insuficiência estrutural | Nada a fazer; apenas serviços de manutenção. | Boa | Obra sem problemas importantes |
| 3 | Há danos gerando alguma insuficiência estrutural, mas não há sinais de comprometimento da estabilidade da obra. | A recuperação da obra pode ser postergada, devendo-se, porém, neste caso, colocar-se o problema em observação sistemática. | Boa aparentemente | Obra potencialmente problemática Recomenda-se acompanhar a evolução dos problemas através das inspeções rotineiras, para detectar, em tempo hábil, um eventual agravamento da insuficiência estrutural. |
| 2 | Há danos gerando significativa insuficiência estrutural na ponte, porém não há ainda, aparentemente, um risco tangível de colapso estrutural. | A recuperação (geralmente com reforço estrutural) da obra deve ser feita no curto prazo. | Sofrível | Obra problemática Postergar demais a recuperação da obra pode levá-la a um estado crítico, implicando também sério comprometimento da vida útil da estrutura. Inspeções intermediárias são recomendáveis para monitorar os problemas. |
| 1 | Há danos gerando grave insuficiência estrutural na ponte; o elemento em questão encontra-se em estado crítico, havendo um risco tangível de colapso estrutural. | A recuperação (geralmente com reforço estrutural) - ou em alguns casos, substituição da obra - deve ser feita sem tardar. | Precária | Obra crítica Em alguns casos, pode configurar uma situação de emergência, podendo a recuperação da obra ser acompanhada de medidas preventivas especiais, tais como: restrição de carga na ponte, interdição total ou parcial ao tráfego, escoramentos provisórios, instrumentação com leituras contínuas de deslocamentos e deformações etc. |

Fonte: DNIT 010/2004 – PRO.

A nota final da ponte corresponde a menor entre as notas recebidas pelos elementos com função estrutural.

ANEXO I – V1: INSPEÇÃO VISUAL

A inspeção visual foi realizada de acordo com o procedimento apresentado na NBR 9452/2019. A inspeção foi cadastral e os registros do viaduto V1 são apresentados na Tabela 93, Tabela 94 e Tabela 95.

Tabela 93: V1 - Ficha cadastral A1

| Ficha de inspeção cadastral | |
|--|--|
| Inspeção cadastral (ano): 2020 | OAE Código: OAE285RSS282309W524002 |
| Jurisdição (DNIT, Concessão ou outro): DNIT | Data da inspeção: 17/02/2020 |
| Administração: | |
| Inspetor Responsável: | |
| Parte I – Cadastro | |
| A – Identificação e localização | |
| Rodovia, ferrovia: Rodovia | Sentido: - |
| Obra (nome): Não consta | Localização (km ou endereço): BR 285, km 296 |
| Ano da construção: Não consta | Projetista: Não consta |
| Coordenada: -28,230946 S; -52,40028 W | Município (UF): Passo Fundo / RS |
| Trem-tipo: Não consta | Construtor: Não consta |
| Importância: - | Finalidade: Não consta |
| Desvio ou rota alternativa (com extensão, no caso de rodovias): - | |
| B – Característica da estrutura | |
| Comprimento e largura | |
| Comprimento total (m): 22,50 | Largura total (m): 10,20 |
| | Largura útil (m): 8,60 |
| | Altura útil (m): - |
| Tipologia estrutural | |
| Sistema construtivo: Moldado no local | |
| Natureza da transposição: Ferrovia | Material: Concreto armado |
| Seção tipo: | |
| Longitudinal (superestrutural): Bi- apoiada ou isostática | Mesoestrutura: Pilares com travessa |
| Transversal (superestrutural): Duas vigas | Infraestrutura: Direta |
| Características particulares | |
| Número e comprimento de vãos (m): 1 vão com comprimento de 12,10 m | |
| | Altura dos pilares (m): - |
| Aparelhos de apoio (quantidade e tipo): 4 (quatro), não identificados | Jutas de dilatação (quantidade e tipo): impossível de identificar |
| Encontros: Alas em concreto armado | |
| Outras peculiaridades (exemplos: existência de dentes Gerber, no caso de seção celular registrar se há acesso): Não possui | |
| C – Características funcionais | |
| Características plani-altimétricas | |
| (informar se a região é plana, ondulada ou montanhosa, traçado em tangente ou curvo, escondidade, rampa): Plana | |

Tabela 94: V1 - Ficha cadastral A2

| Características da pista | |
|---|---|
| Número de faixas (e/ou número de vias ferroviárias): Duas faixas | Largura da faixa (m) ou via férrea: 8,60 |
| Acostamento: Não possui | Largura do acostamento: - |
| Refúgios: Não possui | Largura do refúgio: - |
| Passeio, passarela de pedestres ou passarela de manutenção: Passeio | Largura do passeio, passarela de pedestres ou passarela de manutenção (m): 0,80 |
| Barreira-rígida: concreto | Guarda-corpo: concreto |
| Pavimento (asfáltico, concreto) e/ou via permanente (sobre lastro ou sobre dormentes fixados diretamente sobre elementos da OAE): Pavimento asfáltico | Drenos: Possui |
| Pingadeiras: Não possui | |
| Gabaritos | |
| Gabarito vertical sob o viaduto ou passagem inferior (m): - | |
| Gabarito navegável (altura): - | Gabarito navegável (largura): - |
| Tráfego | |
| Frequência de passagem de carga especial rodoviária: Desconhecido | |
| Volume médio diário (VDM): Desconhecido | Ano de referência: Desconhecido |
| Parte II - Registro de manifestações patológicas | |
| A - Elementos estruturais | |
| Superestrutura: Ocorrência de manchas escuras devido à umidade nas extremidades laterais em balanço em todo o comprimento e manchas brancas que podem estar associadas ao início da eflorescência na mesma região; a parte inferior do tabuleiro apresentava linhas brancas, que podem estar associadas à eflorescência, marcavam a superfície do concreto de forma bastante suave e se desenvolviam no sentido transversal, localizadas nas regiões próximas à metade do vão e uma das extremidades longitudinais. | |
| Mesoestrutura: | |
| Infraestrutura: Armadura exposta no topo de um dos blocos aparentes | |
| Aparelhos de apoio: | |
| Juntas de dilatação: | |
| Encontros: Fissuras no pavimento | |
| Outros elementos: | |
| B – Elementos da pista ou funcionais | |
| Pavimento e/ou via permanente ferroviária: Pavimento com fissuras nos encontros. | |
| Acostamento, gabarito por via permanente, refúgio: - | |
| Drenagem: - | |
| Guarda-corpos: - | |
| Barreira rígida / Defesa metálica / Contra-trilhos: - | |
| Iluminação: - | |
| Sinalização: - | |
| Pintura: - | |

Tabela 95: V1 - Ficha cadastral A3

| | |
|--|--|
| C – Outros elementos | |
| Barreiras rígidas/Defensas metálicas: - | |
| Taludes: - | |
| Sinalização: - | |
| Gabaritos: - | |
| Proteção dos pilares: - | |
| D – Características ambientais | |
| Grau de agressividade ambiental (conforme NBR 6118): II | |
| Fraca (rural, submersa): - | Moderada (urbana): - |
| Forte (marinha, industrial): - | Muito forte (industrial, respingos de maré): - |
| Caracterização do curso d'água aplicável: (S) / (N) | |
| Nome do curso d'água: - | |
| Vazão média anual (m ³ /s): - | Vazão máxima anual (m ³ /s): - |
| Nível médio anual (m): - | Nível Máximo anual (m): - |
| Velocidade de escoamento média anual (m/s): - | Velocidade de escoamento máxima anual (m/s): - |
| E – informações complementares | |
| | |
| Parte III – Classificação da OEA | |
| Estrutural: 5 | Funcional: 5 |
| Durabilidade: 5 | |
| Justificativas: No quesito estrutural existiam indicativos de danos em estágio inicial. A funcionalidade não foi afetada, os gabaritos não apresentavam desconformidades e a estrutura fornece conforto aos usuários. A durabilidade também não foi afetada, a manifestação que gera preocupação são as manchas escuras devido à umidade nas extremidades laterais em balanço e à ausência de pingadeiras. | |
| Croquis | |
| Planta do tabuleiro | |
| | |
| | |
| | |

A nota final do viaduto V1 é igual a 5 para todos os parâmetros. Existem poucos danos e estes se apresentam em estágio inicial. A classificação do viaduto V1 é apresentado na Tabela 96.

Tabela 96: V1 - Classificação

| Parâmetro | Super. | Meso. | Infra. | Elementos complementares | | Pista (ou via permanente) | Nota final |
|--------------|--------|-------|--------|--------------------------|----------|---------------------------|------------|
| | | | | Estrutura | Encontro | | |
| Estrutural | 5 | 5 | 5 | - | - | 5 | 5 |
| Funcional | 5 | NA | NA | - | - | 5 | 5 |
| Durabilidade | 5 | 5 | 5 | - | - | 5 | 5 |

Onde: Super.= superestrutura; Meso. = mesoestrutura; Infra. = Infraestrutura

Os principais danos encontrados em V1 foram as manchas de umidade e as linhas brancas na parte inferior do tabuleiro que podem indicar eflorescência. As manchas de umidade que atingem a área lateral em balanço podem ser vistas na Figura 115.

Figura 115: V1 - Manchas de umidade



Fonte: Autor

Na Figura 116 é possível visualizar as linhas brancas na parte inferior do tabuleiro, localizadas próximas à metade do vão.

Figura 116: V1 – Indicativo de eflorescência



Fonte: Autor

ANEXO J – V2: INSPEÇÃO VISUAL

A inspeção visual aplicada foi a cadastral, prevista pela NBR 9452/2019. A Tabela 97, Tabela 98 e Tabela 99 apresentam os registros oriundos da inspeção.

Tabela 97: V2 – Ficha cadastral A1

| Ficha de inspeção cadastral | |
|--|---|
| Inspeção cadastral (ano): 2020 | OAE Código: Não consta |
| Jurisdição (DNIT, Concessão ou outro): DAER/RS | Data da inspeção: 17/02/2020 |
| Administração: - | |
| Inspetor Responsável: | |
| Parte I – Cadastro | |
| A – Identificação e localização | |
| Rodovia, ferrovia: Rodovia | Sentido: - |
| Obra (nome): - | Localização (km ou endereço): RS-135 |
| Ano da construção: Aproximadamente 1985 | Projetista: Renato J. B. Garcia |
| Coordenada: -28,27061 S, -52,36492 W | Município (UF): Passo Fundo / RS |
| Trem-tipo: 36 toneladas (NB-6) | Construtor: Não consta |
| Importância: - | Finalidade: - |
| Desvio ou rota alternativa (com extensão, no caso de rodovias): - | |
| B – Característica da estrutura | |
| Comprimento e largura | |
| Comprimento total (m): 40,00 | Largura total (m): 10,60 |
| | Largura útil (m): 8,80 |
| | Altura útil (m): 6,75 |
| Tipologia estrutural | |
| Sistema construtivo: Moldado no local | |
| Natureza da transposição: Ferrovia | Material: Concreto armado |
| Seção tipo: | |
| Longitudinal (superestrutural): Bi-apoiada ou isostática | Mesoestrutura: Pilares com travessa |
| Transversal (superestrutural): Duas vigas | Infraestrutura: Tubulões |
| Características particulares | |
| Número e comprimento de vãos (m): 1 vão com comprimento de 24,00 metros | |
| | Altura dos pilares (m): - |
| Aparelhos de apoio (quantidade e tipo): 4 (quatro) em Neoprene | Jutas de dilatação (quantidade e tipo): impossível de identificar |
| Encontros: Alas em concreto | |
| Outras peculiaridades (exemplos: existência de dentes Gerber, no caso de seção celular registrar se há acesso): Não possui | |
| C – Características funcionais | |
| Características plani-altimétricas | |
| (Informar se a região é plana, ondulada ou montanhosa, traçado em tangente ou curvo, esconsidade, rampa): Rampa | |

Tabela 98: V2 – Ficha cadastral A2

| Características da pista | |
|---|---|
| Número de faixas (e/ou número de vias ferroviárias): Duas faixas | Largura da faixa (m) ou via férrea: 8,20 |
| Acostamento: Não possui | Largura do acostamento: - |
| Refúgios: Não possui | Largura do refúgio: - |
| Passeio, passarela de pedestres ou passarela de manutenção: Passeio | Largura do passeio, passarela de pedestres ou passarela de manutenção (m): 0,70 |
| Barreira-rígida: New-Jersey | Guarda-corpo: concreto |
| Pavimento (asfáltico, concreto) e/ou via permanente (sobre lastro ou sobre dormentes fixados diretamente sobre elementos da OAE): Pavimento asfáltico | Drenos: Possui |
| Pingadeiras: Possui | |
| Gabaritos | |
| Gabarito vertical sob o viaduto ou passagem inferior (m): 6,75 | |
| Gabarito navegável (altura): - | Gabarito navegável (largura): - |
| Tráfego | |
| Frequência de passagem de carga especial rodoviária: Desconhecido | |
| Volume médio diário (VDM): Desconhecido | Ano de referência: Desconhecido |
| Parte II - Registro de manifestações patológicas | |
| A - Elementos estruturais | |
| Superestrutura: Na parte inferior do tabuleiro existiam manchas escuras de percolação de água nas proximidades dos dutos. As manchas atingem a parte inferior do tabuleiro, a lateral das longarinas e os aparelhos de apoio; nas longarinas existem quebras de material sem à exposição das armaduras; próximo a um dos dutos foram identificadas armaduras aparentes e manchas brancas que podem estar associada à eflorescência; na parte inferior do tabuleiro existiam linhas brancas de forte e fraca expressão que se desenvolviam no sentido transversal e lembravam eflorescências localizadas em regiões próximas às transversinas intermediárias e na região da metade do vão; em uma das extremidades do viaduto, existiam pontos distribuídos com cor avermelhada, os quais tinham aspecto visual de elementos sob estado de corrosão. | |
| Mesoestrutura: - | |
| Infraestrutura: - | |
| Aparelhos de apoio: - | |
| Juntas de dilatação: - | |
| Encontros: - | |
| Outros elementos: - | |
| B – Elementos da pista ou funcionais | |
| Pavimento e/ou via permanente ferroviária: - | |
| Acostamento, gabarito por via permanente, refúgio: - | |
| Drenagem: - | |
| Guarda-corpos: - | |
| Barreira rígida / Defesa metálica / Contra-trilhos: - | |
| Iluminação: - | |
| Sinalização: - | |
| Pintura: - | |

Tabela 99: V2 – Ficha cadastral A3

| | |
|--|--|
| C – Outros elementos | |
| Barreiras rígidas/Defensas metálicas: - | |
| Taludes: um dos taludes de contenção apresentava erosão do solo. | |
| Sinalização: - | |
| Gabaritos: - | |
| Proteção dos pilares: - | |
| D – Características ambientais | |
| Grau de agressividade ambiental (conforme NBR 6118): II | |
| Fraca (rural, submersa): - | Moderada (urbana): - |
| Forte (marinha, industrial): - | Muito forte (industrial, respingos de maré): - |
| Caracterização do curso d'água aplicável: (S) / (N) | |
| Nome do curso d'água: - | |
| Vazão média anual (m ³ /s): - | Vazão máxima anual (m ³ /s): - |
| Nível médio anual (m): - | Nível Máximo anual (m): - |
| Velocidade de escoamento média anual (m/s): - | Velocidade de escoamento máxima anual (m/s): - |
| E – informações complementares | |
| | |
| Parte III – Classificação da OEA | |
| Estrutural: 4 | Funcional: 5 |
| Durabilidade: 4 | |
| Justificativas: Os danos localizados não comprometem a saúde estrutural do viaduto V2, porém, é necessário a investigação, o diagnóstico e a recuperação das áreas danificadas. A corrosão, a eflorescência e a exposição de armaduras no tabuleiro afetam a nota final dada a este quesito. A funcionalidade não foi afetada, o conforto aos usuários ainda é garantido, bem como o alinhamento dos gabaritos horizontal e vertical. A nota final da durabilidade foi afetada pela presença de indicadores de corrosão, eflorescência e também a exposição de armaduras no tabuleiro que tem a capacidade de diminuir a vida útil desta estrutura. | |
| Croquis | |
| Planta do tabuleiro | |
| | |
| | |
| | |

Para o viaduto V2, a classificação que considera o parâmetro estrutural foi igual a 4, menor nota atribuída para este quesito. O parâmetro funcional obteve nota final igual a 5 e a durabilidade obteve nota igual a 4. A classificação do viaduto V2 é apresentada na Tabela 100.

Tabela 100: V2 - Classificação

| Parâmetro | Super. | Meso. | Infra. | Elementos complementares | | Pista (ou via permanente) | Nota final |
|--------------|--------|-------|--------|--------------------------|----------|---------------------------|------------|
| | | | | Estrutura | Encontro | | |
| Estrutural | 4 | 5 | 4 | - | - | 5 | 4 |
| Funcional | 5 | NA | NA | - | - | 5 | 5 |
| Durabilidade | 4 | 5 | 4 | - | - | 5 | 4 |

Onde: Super.= superestrutura; Meso. = mesoestrutura; Infra. = Infraestrutura

No viaduto V2 foram encontrados danos na superestrutura e infraestrutura. No tabuleiro foram encontrados danos nas regiões dos balanços laterais como as manchas por percolação de água e a exposição de armaduras. Na parte inferior do tabuleiro foram encontradas manifestações que indicam corrosão e eflorescência. Além disso, foi identificado um processo de erosão em um dos taludes e a quebra de material nas longarinas, sem a exposição das armaduras. A Figura 117 apresenta as manchas de percolação de água junto à exposição de armaduras.

Figura 117: V2 - Manchas de percolação e armaduras expostas no tabuleiro



Fonte: Autor.

Na parte inferior do tabuleiro foram encontradas linhas brancas que podem ser associadas à eflorescência e pontos de cor marrom que possuem aspecto de corrosão na região próxima aos pilares. A Figura 118 apresenta estes danos.

Figura 118: V2 - Eflorescência e corrosão no tabuleiro



Fonte: Autor.

Na parte inferior do tabuleiro, próximo à metade do vão, foram encontradas linhas brancas que também podem ser associadas à eflorescência. A Figura 119 apresenta esta manifestação patológica.

Figura 119: V2 - Eflorescência



Fonte: Autor.

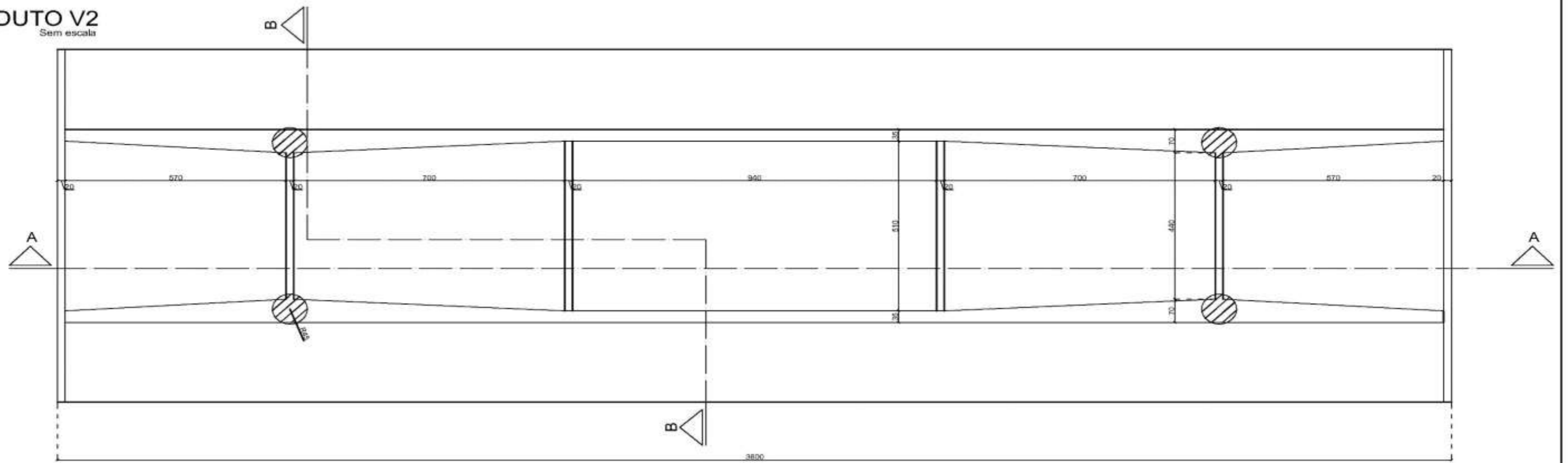
A Figura 120 apresenta a erosão do solo encontrada em um dos taludes.

Figura 120: V2 - Erosão em um dos taludes

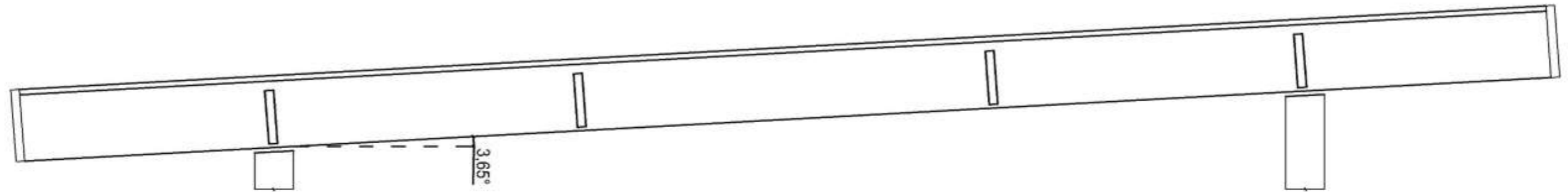


Fonte: Autor.

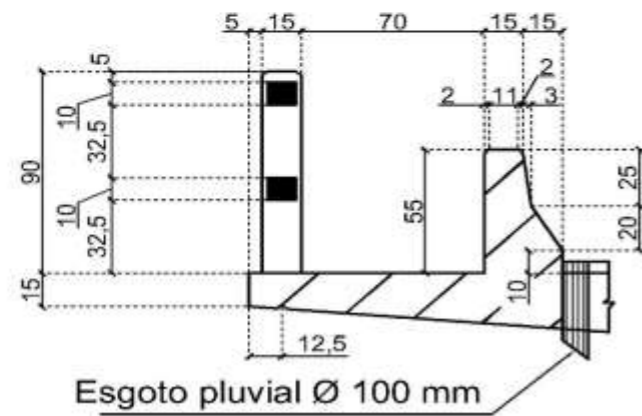
VIADUTO V2
Sem escala



CORTE AA



DETALHE DO PASSEIO LATERAL



CORTE BB
SEÇÃO TRANSVERSAL





UPF
UNIVERSIDADE
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900
(54) 3316 7000 - www.upf.br