

REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE VIBRAÇÃO AMBIENTAL

Análise comparativa do desempenho de um sistema
comercial e de um sistema desenvolvido na FEUP

PEDRO MIGUEL TEIXEIRA SOARES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS E GEOTECNIA

Orientador: Professor Doutor Carlos Manuel Ramos Moutinho

Coorientador: Mestre Giancarlo Badini Marulli

JULHO DE 2026

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2025/2026

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E GEORRECURSOS

Tel. +351-22-508 1901



m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil - 2025/2026 - Departamento de Engenharia Civil e Georrecursos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2026*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha família

As utopias existem e são elas que despertam as pessoas.

Artur Santos (Pepetela)

AGRADECIMENTOS

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para o meu percurso académico, profissional e pessoal, deixo o meu sincero agradecimento.

No âmbito académico, expresso a minha gratidão a todos os docentes do Mestrado em Engenharia Civil, em particular ao Professor Carlos Moutinho, pelo apoio constante e motivação desde o início dos ensaios até à conclusão deste trabalho, bem como pela forma inspiradora como transmitiu a sua paixão pela área da monitorização estrutural. À Professora Elsa Caetano, agradeço a colaboração, o apoio e a disponibilização de documentação relativa aos ensaios realizados. Ao estudante de doutoramento Giancarlo Marulli, pela disponibilidade e auxílio no desenvolvimento dos scripts para os ensaios customizados. À empresa A2P, pela disponibilização das peças desenhadas que contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos colegas de curso, pelo espírito de entajuda e pelos momentos de trabalho partilhados, com especial destaque para Emanuel Pessoa, Luana Rizzato e Reginaldo Vicente.

No plano profissional, agradeço a Roberto Henriques pelo apoio desde o início da minha carreira, pela partilha de conhecimento na área das estruturas metálicas e pela orientação ao longo do meu percurso.

Às amigas construídas no meu primeiro contacto profissional na engenharia, Ana Catarina, Elizabete Barros e Elizabeth Valente, pelo companheirismo, apoio e pelos momentos que tornaram o quotidiano mais leve.

Por fim, no plano pessoal, um agradecimento muito especial à minha família: à minha mãe, Liliana Teixeira, à minha irmã, Nádia Pinto, ao meu irmão, Luís Soares, e a minha madrinha Malvina Teixeira, por todo o carinho, apoio e presença constante ao longo da minha vida.

RESUMO

Esta dissertação tem como objetivo a realização e análise de ensaios de vibração ambiental, com foco na comparação entre o desempenho de um sistema de aquisição comercial e o de um sistema desenvolvido na FEUP. Inicialmente, é apresentado o estado da arte, abordando a utilidade dos ensaios de vibração na monitorização estrutural, as principais condicionantes associadas à sua execução e as diferentes soluções de instrumentação disponíveis. Seguidamente, e como caso de estudo, foram aplicados estes conhecimentos no ensaio da Ponte Engenheiro Machado Vaz, em Mirandela, no contexto dos estudos dinâmicos levados a efeito pela FEUP tendo em vista o desenvolvimento do projeto de reabilitação da estrutura.

Com base neste enquadramento, procedeu-se à realização de um ensaio de vibração ambiental utilizando ambos os sistemas, tendo como objetivo principal verificar se o sistema customizado desenvolvido na FEUP seria adequado para a realização de ensaios deste tipo em pontes rodoviárias correntes, tendo sido descritas detalhadamente as metodologias adotadas em cada abordagem.

Paralelamente, foi desenvolvido um modelo numérico da estrutura, cuja calibração se revelou essencial para a correta interpretação dos resultados experimentais e para a validação do comportamento dinâmico da ponte.

Por fim, é realizada uma análise comparativa do desempenho dos dois sistemas de medição, destacando-se as suas vantagens, limitações e aplicabilidade no contexto da monitorização de estruturas, contribuindo para uma melhor compreensão das potencialidades de soluções comerciais e desenvolvidas em ambiente académico.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaio de Vibração Ambiental, Monitorização Estrutural, Instrumentação Customizada, Modelação Numérica, Análise Comparativa.

ABSTRACT

This dissertation aims to conduct and analyse ambient vibration tests, focusing on the comparison between the performance of a commercial data acquisition system and that of a system developed at FEUP. Initially, a state-of-the-art review is presented, addressing the usefulness of vibration testing in structural health monitoring, the main constraints associated with its implementation, and the different instrumentation solutions currently available. Subsequently, these concepts were applied to a case study involving the Engenheiro Machado Vaz Bridge, located in Mirandela, within the framework of the dynamic studies carried out by FEUP for the development of the bridge rehabilitation project.

Based on this context, an ambient vibration test was performed using both acquisition systems, with the primary objective of assessing whether the custom-made system developed at FEUP would be suitable for conducting this type of test on conventional road bridges. The methodologies adopted for each approach are described in detail.

In parallel, a numerical model of the structure was developed, whose calibration proved essential for the correct interpretation of the experimental results and for the validation of the bridge's dynamic behaviour.

Finally, a comparative analysis of the performance of the two measurement systems is presented, highlighting their advantages, limitations, and applicability in the context of structural monitoring. This work contributes to a better understanding of the potential of both commercial solutions and systems developed in an academic environment.

KEYWORDS: Ambient Vibration Testing, Structural Health Monitoring, Custom Instrumentation, Numerical Modelling, Comparative Analysis.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	2
2 ESTADO DA ARTE.....	5
2.1 UTILIDADE DOS ENSAIOS DE VIBRAÇÃO	6
2.1.1 Relevância e enquadramento	6
2.1.2 Tipos de Ensaios de Vibração.....	6
2.1.2.1 Ensaio de Vibração Forçada (EMA)	6
2.1.2.2 Ensaio de Vibração Ambiental (OMA).....	8
2.2 MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS MODAIS	11
2.2.1 Método Peak-Picking	11
2.2.1.1 Densidade Espectral de Potência Média Normalizada (ANPSD).....	12
2.2.2 Método avançado de decomposição no domínio da frequência	13
2.3 CONDICIONANTES A TER EM CONTA NA REALIZAÇÃO DO ENSAIO.....	15
2.3.1 Definição dos objetivos do ensaio	15
2.3.2 Procedimentos de medição e aquisição de dados	16
2.3.3 Precisão, repetibilidade e incerteza de medição	16
2.3.4 Proximidade com critérios normativos	16
2.3.5 Documentação e relato dos ensaios	17
2.4 SOLUÇÕES DE INSTRUMENTAÇÃO	18
2.4.1 Soluções de instrumentação aplicadas a ensaios em geral.....	18
2.4.2 Disposição e planejamento da instrumentação em ensaios dinâmicos	21

2.4.3 Monitorização com recurso a um sistema comercial	23
2.4.3.1 Sismógrafos triaxiais	23
2.4.3.2 Acelerómetro do tipo force balance	24
2.4.4 Monitorização com recurso a um sistema customizado	25
2.4.4.1 Descrição dos sensores	25
2.4.4.2 Microprocessador	25
2.4.4.3 Arduino pro mini	26
2.4.4.4 Teensy	26
2.4.4.5 Teensy 3.2	26
2.4.4.6 Teensy 4.0	27
2.4.5 Aquisição de dados	28
2.4.5.1 Características dos acelerómetros	29
2.4.5.2 Transmissão de dados	30
2.4.5.3 Outros componentes	30
3 PONTE ENGENHEIRO MACHADO VAZ – CASO DE ESTUDO.....	32
3.1 ASPETOS HISTÓRICOS	32
3.2 CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA E MATERIAL	35
3.3 MOTIVAÇÃO DOS ENSAIOS.....	38
4 MONITORIZAÇÃO CONTÍNUA DAS VIBRAÇÕES	41
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA MONITORIZAÇÃO.....	41
4.2 AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE VIBRAÇÃO	43
4.3 IDENTIFICAÇÃO DE FREQUÊNCIAS NATURAIS AO LONGO DO PERÍODO DE MONITORIZAÇÃO.....	49
4.4 CONCLUSÕES DA MONITORIZAÇÃO CONTÍNUA	50
5 MODELAÇÃO NUMÉRICA	51
5.1 JUSTIFICAÇÃO DAS FERRAMENTAS UTILIZADAS.....	51
5.2 DESENVOLVIMENTO DO MODELO NUMÉRICO	52
5.2.1 Objetivos da modelação	52

5.2.2 Geometria e propriedades dos materiais	53
5.3 AÇÕES PERMANENTES	55
5.4 RESULTADOS DA ANÁLISE MODAL	56
6 ENSAIOS DE VIBRAÇÃO AMBIENTAL	61
6.1 MALHA DE PONTOS UTILIZADA	61
6.2 ENSAIO DE VIBRAÇÃO AMBIENTAL COM RECURSO A UM SISTEMA COMERCIAL	63
6.2.1 Identificação de parâmetros modais	63
6.3 ENSAIO DE VIBRAÇÃO AMBIENTAL COM RECURSO A UM SISTEMA CUSTOMIZADO.....	67
6.3.1 Identificação de Parâmetros Modais	68
6.3.1.1 Importação e tratamento inicial dos dados.....	68
6.3.1.2 Resultados da densidade espectral de potência média normalizada (ANPSD)	69
6.3.1.3 Identificação modal pelo método da seleção de picos (Peak-Picking)....	71
6.3.1.4 Identificação dos modos laterais pelo método de Peak-Picking	71
6.3.1.5 Identificação dos modos verticais e torsionais pelo método de Peak-Picking	72
7 ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DOS DOIS SISTEMAS UTILIZADOS	74
7.1 IDENTIFICAÇÃO DE FREQUÊNCIAS E MODOS DE VIBRAÇÃO	74
7.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS DE CADA SISTEMA.....	81
7.2.1 Síntese comparativa	81
7.2.2 Ensaio com sensores customizados	84
7.2.2.1 Vantagens.....	84
7.2.2.2 Desvantagens	84
7.2.3 Ensaio comercial.....	85
7.2.3.1 Vantagens.....	85
7.2.3.2 Desvantagens	85

8 CONCLUSÕES.....	87
8.1 INTRODUÇÃO.....	87
8.2 SÍNTESE DE RESULTADOS E CONCLUSÕES.....	88
8.3 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	89
 ANEXOS.....	 93
A.1 DISTRIBUIÇÃO DOS SENSORES POR SETUP DURANTE O ENSAIO DE VIBRAÇÃO AMBIENTAL	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Excitador hidráulico na ponte Pedro e Inês [2]	7
Figura 2.2 - FRFs sem e com activação de TMD [2]	8
Figura 2.3 - Ponte de Humber, Reino Unido [2]	9
Figura 2.4 - Modos de vibração identificados na ponte de Humber através de ensaio de vibração ambiental [2]	10
Figura 2.5 - Sistema de teste de vibração ambiental	16
Figura 2.6 - Locais de medição da ponte estaiada de vão longo com vista esquemática 3D [21]	22
Figura 2.7 - Preparação dos equipamentos de aquisição durante o ensaio de vibração ambiental.	23
Figura 2.8 - Exemplo de uma estação de referência utilizada no ensaio da ponte, constituída pelos aparelhos	24
Figura 2.9 - Sensor customizado exemplar utilizado no ensaio	25
Figura 2.10 - Teensy 4.0 microcontrolador	26
Figura 2.11 - Teensy 3.2 microcontrolador	27
Figura 2.12 - Teensy 4.0 microcontrolador	28
Figura 2.13 - Diferentes sensores de aquisição de dados (temperatura à esquerda, dois acelerómetros diferentes no centro e deslocamento à direita).	28
Figura 2.14 - Módulo acelerómetro ADXL	29
Figura 2.15 - Módulo Digi XBee3 RF	30
Figura 2.16 - Acelerómetro baseado em Arduino com seus componentes especificados	31
Figura 3.1 - Ponte Engenheiro Machado Vaz (nova)	33
Figura 3.2 - Pilares da ponte erguidos sobre o Rio Tua	33
Figura 3.3 - Vista lateral longitudinal do Pilar	33
Figura 3.4 - Perspetiva da Ponte Engenheiro Machado Vaz	34
Figura 3.5 - Planta do tabuleiro da ponte	35
Figura 3.6 - Alçado da Ponte	35
Figura 3.7 - Corte vertical longitudinal (Pilares)	36
Figura 3.8 - Tabuleiro secção pelo apoio (corte vertical transversal)	37
Figura 3.9 - Tabuleiro secção a meio-vão (Corte vertical transversal)	38
Figura 3.10 - Estado atual dos pilares da ponte (com o nível do rio tua baixo)	39
Figura 3.11 - Observação do desalinhamento do tabuleiro.	40
Figura 3.12 - Fissuração da pedra de revestimento dos passeios e destacamento no bordo do tabuleiro.	40
Figura 4.1 - Representação em planta do tabuleiro da ponte, com indicação da localização dos sensores triaxiais (Secções 7A, 7D, 11A e 11D).	42
Figura 4.2 - Vista de sensores instalados na ponte para monitorização contínua.	42

Figura 4.3 - Aceleração máxima registada em séries consecutivas de 10 minutos de duração, entre 25/7/25 e 8/8/2025. Direção transversal ao eixo do tabuleiro (cima). Direção vertical (baixo).	44
Figura 4.4 - Registos de acelerações verticais no dia 4/8/2025, entre as 10:40 e as 10:50 (cima). Ampliação do registo numa janela de 60 s (baixo)	46
Figura 4.5 - Registos de acelerações verticais no dia 5/8/2025, entre as 21:40 e as 21:50 (cima). Ampliação do registo numa janela de 60 s (baixo).	46
Figura 4.6 - Espectros médios das séries temporais com máxima amplitude de aceleração	48
Figura 4.7 - Modos de vibração locais identificados em frequências próximas de 13 Hz e 21 Hz	48
Figura 4.8 - Seguimento das frequências naturais realizado a partir da monitorização da ponte entre 25 de julho e 8 de agosto de 2025.	49
Figura 5.1 - Modelo tridimensional da Ponte Engenheiro Machado Vaz (Revit)	52
Figura 5.2 - Modelo Numérico da Ponte Engenheiro Machado Vaz (Robot Structural Analysis)	53
Figura 5.3 - Esquema dos apoios verticais adotados no modelo estrutural	57
Figura 5.4 - Esquema das rótulas introduzidas no topo dos pilares no modelo numérico da ponte	57
Figura 5.5 - 1º Modo de vibração do modelo numérico, frequência: 1,96Hz	58
Figura 5.6 - 1º Modo de vibração do EVA	58
Figura 5.7 - 2º Modo de vibração do modelo numérico, frequência: 2,17 Hz	58
Figura 5.8 - 2º Modo de vibração do EVA	58
Figura 5.9 - 3º Modo de vibração do modelo numérico, frequência: 2,49 Hz	59
Figura 5.10 - 3º Modo de vibração do EVA	59
Figura 5.11 - 4º Modo de vibração do modelo numérico, frequência: 2,88 Hz	59
Figura 5.12 - 4º Modo de vibração do EVA	59
Figura 5.13 - 5º Modo de vibração do modelo numérico, frequência: 3,30 Hz	59
Figura 5.14 - 5º Modo de vibração do EVA	59
Figura 5.15 - 6º Modo de vibração do modelo numérico, frequência: 3,70 Hz	59
Figura 5.16 - 6º Modo de vibração do EVA	59
Figura 6.1 - Plano de instrumentação.	62
Figura 6.2 - Exemplo de séries temporais colhidas: medições nas secções 11C, 12A, 18A, 19A, 21A, direções Y e Z.....	64
Figura 6.3 - Funções densidade espectral de potência média na secção de referência 12A, na direção transversal (cima) e na secção 21A, na direção transversal (meio). Mapa de cores das transformadas de Fourier na direção transversal (baixo).	65
Figura 6.4 - Função densidade espectral de potência na secção 12B, na direção vertical (cima). Mapa de cores das transformadas de Fourier na direção vertical (baixo).	65
Figura 6.5 - Valores singulares dos espectros de potência	66
Figura 6.6 - Frequências naturais identificadas a partir da decomposição em valores singulares dos espectros de potência medidos.....	66
Figura 6.7 - Preparação e sincronização dos sensores antes do ensaio de vibração ambiental.	67
Figura 6.8 - Identificação das frequências naturais a partir dos espectros de resposta	70

Figura 7.1 – 1ª Forma modal vertical (MATLAB)	74
Figura 7.2 - 1ª Forma modal vertical (ARTEMIS)	74
Figura 7.3 - 2ª Forma modal vertical (MATLAB)	75
Figura 7.4 - 2ª Forma modal vertical (ARTEMIS)	75
Figura 7.5 - 3ª Forma modal vertical (MATLAB)	75
Figura 7.6 - 3ª Forma modal vertical (ARTEMIS)	75
Figura 7.7 - 4ª Forma modal vertical (MATLAB)	76
Figura 7.8 - 4ª Forma modal vertical (ARTEMIS)	76
Figura 7.9 - 5ª Forma modal vertical (MATLAB)	76
Figura 7.10 - 5ª Forma modal vertical (ARTEMIS)	76
Figura 7.11 - 6ª Forma modal vertical (MATLAB)	76
Figura 7.12 - 6ª Forma modal vertical (ARTEMIS)	76
Figura 7.13 - 7ª Forma modal vertical (MATLAB)	77
Figura 7.14 - 7ª Forma modal vertical (ARTEMIS)	77
Figura 7.15 - 8ª Forma modal torsional (MATLAB)	77
Figura 7.16 - 8ª Forma modal torsional (ARTEMIS)	77
Figura 7.17 - 9ª Forma modal torsional (MATLAB)	77
Figura 7.18 - 9ª Forma modal torsional (ARTEMIS)	77
Figura 7.19 - 10ª Forma modal torsional (MATLAB)	78
Figura 7.20 - 10ª Forma modal torsional (ARTEMIS)	78
Figura 7.21 - 11ª Forma modal torsional (ARTEMIS)	78
Figura 7.22 - 11ª Forma modal torsional (MATLAB)	78
Figura 7.23 - 12ª Forma modal torsional (ARTEMIS)	78
Figura 7.24 - 12ª Forma modal torsional (MATLAB)	78

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tipo de sensor baseado em grandezas físicas	19
Tabela 2.2 - Resumo das vantagens e limitações do ensaio de vibração ambiental	21
Tabela 4.1 - Valores máximos da aceleração registada entre 25/7/2025 e 8/7/2025.	45
Tabela 5.1 - Características geométricas adotadas aos elementos estruturais	54
Tabela 5.2 - Propriedades mecânicas dos materiais adotados no modelo numérico	55
Tabela 5.3 - Área dos elementos estruturais	55
Tabela 5.4 - Restantes cargas permanentes	56
Tabela 5.5 - Comparação das frequências naturais do modelo numérico e ensaio comercial	60
Tabela 7.1 - Comparação das Frequências Naturais e Características Modais Obtidas por Ensaio Customizado e Ensaio Comercial	79
Tabela 7.2 - Critério qualitativo	80
Tabela 7.3 - Comparação entre os sistemas customizado e comercial	83

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

ANPSD – Densidade Espectral de Potência Média Normalizada

E – Módulo de Elasticidade

EFDD – Decomposição no Domínio da Frequência Melhorada

EMA – Ensaio de vibração forçada

FDD – Decomposição no Domínio da Frequência

FEM – Modelos de Elementos Finitos

Fp – Casos de Carga dos Peões

FRFs – Funções resposta em frequência

Hz – Frequência natural

Kg – Kilogramas

m/s² – Aceleração

MAC – Critério de correlação modal

N – Newtons

NPSD – Espectros normalizados

OMA – Ensaio de vibração ambiental

PP – Peak Picking

PP – Peso Próprio

RCP – Restantes Cargas Permanentes

SVD – Decomposição em Valores Singulares

TMDs – Tuned Mass Dampers

UDL – Casos de Carga

γ - Densidade

ν – Coeficiente de Poisson

1

INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A avaliação do comportamento dinâmico de estruturas é um aspeto fundamental no domínio da engenharia civil, particularmente no contexto da monitorização estrutural e da garantia de segurança ao longo da vida útil das infraestruturas. Neste âmbito, os ensaios de vibração ambiental têm vindo a assumir um papel de destaque, permitindo a identificação das propriedades dinâmicas das estruturas, tais como frequências naturais, modos de vibração sem necessidade de excitação artificial induzida por equipamentos mecânicos.

Com o avanço tecnológico, têm sido desenvolvidas diversas soluções para a realização destes ensaios, nomeadamente ensaios de sistemas comerciais altamente especializados, assim como sistemas customizados desenvolvidos para aplicações específicas. Enquanto os sistemas comerciais se encontram muito implementados no mercado, apresentando em geral grande robustez, precisão e com suporte técnico avançado, os sistemas customizados surgem mais recentemente como alternativas potencialmente mais económicas e flexíveis, embora com desafios associados à sua validação e fiabilidade.

Neste contexto, torna-se relevante comparar o desempenho destas duas abordagens, não apenas do ponto de vista técnico, mas também considerando fatores como custo, tempo de execução e viabilidade prática de aplicação em casos reais. Esta análise é particularmente pertinente em estruturas de grande relevância, como pontes, onde a monitorização contínua e a correta identificação do comportamento dinâmico são essenciais.

1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo desta tese consiste na realização de uma análise comparativa entre ensaios de vibração ambiental realizados com recurso a sistemas comerciais e sistemas customizados.

De forma mais específica, pretende-se:

- Analisar e comparar os resultados obtidos em termos de identificação dos modos de vibração das estruturas;
- Avaliar as frequências naturais determinadas por cada sistema, verificando a consistência e precisão dos resultados;
- Comparar os custos associados à implementação de cada tipo de ensaio;
- Analisar o tempo necessário para execução, processamento e interpretação dos dados;
- Realizar um estudo de viabilidade técnica e económica, com base nos resultados obtidos, de modo a avaliar a aplicabilidade prática de cada solução.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho foi organizado em nove capítulos:

- Capítulo 2 – Estado da Arte: apresenta uma revisão bibliográfica sobre os ensaios de vibração ambiental, os seus princípios, aplicações e principais vantagens na avaliação do comportamento dinâmico de estruturas. São igualmente abordadas as técnicas de identificação modal, com destaque para os métodos mais utilizados na determinação dos parâmetros modais, bem como as tecnologias e sistemas de aquisição de dados atualmente disponíveis, incluindo soluções comerciais e de baixo custo.
- Capítulo 3 – Ponte Engenheiro Machado Vaz – Caso de Estudo: descreve a estrutura objeto de estudo, apresentando a sua localização, enquadramento, características construtivas e funcionais, bem como a caracterização geométrica e dos materiais constituintes. São ainda referidas as principais particularidades estruturais relevantes para a realização dos ensaios e para a modelação numérica.

- Capítulo 4 – Monitorização Contínua das Vibrações: descreve o sistema de monitorização contínua instalado na ponte, incluindo a sua arquitetura, os sensores utilizados, os equipamentos de aquisição de dados e a estratégia de monitorização adotada. Apresenta ainda a motivação para a realização dos ensaios de vibração ambiental, enquadrando a sua importância na avaliação do comportamento dinâmico da estrutura e na validação dos resultados obtidos.
- Capítulo 5 – Modelação Numérica: aborda o desenvolvimento do modelo numérico da ponte através do método dos elementos finitos, descrevendo as hipóteses assumidas, as propriedades dos materiais, as condições de fronteira e os critérios de discretização adotados. São igualmente apresentados os processos de calibração e validação do modelo, com base na comparação entre os resultados numéricos e experimentais, de forma a garantir uma representação fidedigna do comportamento estrutural.
- Capítulo 6 – Ensaios de Vibração Ambiental com Recurso a um Sistema Comercial e a um Sistema Customizado: descreve a metodologia experimental adotada para a realização dos ensaios de vibração ambiental, incluindo o planeamento, a instrumentação, a configuração dos equipamentos e o processamento dos dados. Inicialmente são apresentados os ensaios realizados com recurso a um sistema comercial, bem como os parâmetros modais identificados. Posteriormente, é descrito o desenvolvimento e implementação de um sistema customizado, incluindo a sua arquitetura, processo de aquisição e tratamento de dados, sendo apresentados e discutidos os resultados obtidos e o seu desempenho na identificação modal da estrutura.
- Capítulo 7 – Análise Comparativa do Desempenho dos Dois Sistemas Utilizados: apresenta uma comparação detalhada entre o sistema comercial e o sistema customizado, considerando aspetos como a qualidade dos sinais adquiridos, a precisão na identificação dos parâmetros modais, a facilidade de implementação, a robustez dos equipamentos, os custos associados e o tempo necessário para a realização dos ensaios e processamento dos dados. São ainda discutidas as vantagens e limitações de cada solução, identificando os contextos em que cada uma poderá ser mais adequada.

- Capítulo 8 – Conclusões: sintetiza os principais resultados obtidos ao longo do trabalho, destacando as conclusões mais relevantes relativamente à identificação modal da estrutura, ao desempenho dos sistemas de aquisição utilizados e à validação do modelo numérico. Por fim, são apresentadas as principais limitações do estudo e propostas de desenvolvimento para trabalhos futuros, nomeadamente ao nível da otimização do sistema customizado, da monitorização estrutural e da aplicação da metodologia a outras estruturas.

2

ESTADO DA ARTE

O presente capítulo tem como finalidade apresentar uma revisão crítica e sistematizada do conhecimento científico e técnico existente sobre os ensaios de vibração ambiental e sobre os sistemas de aquisição de dados utilizados neste tipo de ensaios. Esta análise permite enquadrar o trabalho desenvolvido, bem como compreender as abordagens mais relevantes aplicadas à caracterização dinâmica de estruturas através de medições de resposta vibratória.

Num primeiro momento, é feita uma contextualização da utilidade dos ensaios de vibração forçada e ambiental, abordando a sua importância na identificação modal e na avaliação do comportamento estrutural sem a necessidade de excitação controlada. De seguida, são discutidas as condicionantes associadas à realização destes ensaios, nomeadamente a influência das condições ambientais, a seleção de sensores, o número e a disposição dos pontos de medição, bem como os parâmetros de aquisição e processamento dos sinais.

Por fim, são apresentadas as principais soluções de instrumentação e aquisição de dados descritas na literatura, com especial atenção à distinção entre sistemas comerciais e soluções customizadas. Esta comparação é relevante para avaliar o desempenho, a precisão, a versatilidade e o custo das diferentes abordagens tecnológicas, permitindo fundamentar a escolha e o desenvolvimento dos sistemas analisados no âmbito deste trabalho.

2.1 UTILIDADE DOS ENSAIOS DE VIBRAÇÃO

2.1.1 Relevância e enquadramento

Os ensaios de vibração de estruturas desempenham um papel relevante na análise do comportamento dinâmico estrutural, permitindo a determinação de parâmetros fundamentais como frequências naturais, modos de vibração e coeficientes de amortecimento. Estes ensaios possibilitam uma caracterização experimental mais próxima do comportamento real das estruturas, complementando as abordagens analíticas e numéricas habitualmente utilizadas em projeto [1].

A realização de ensaios de vibração é particularmente importante devido às diferenças que podem existir entre os modelos teóricos e o desempenho efetivo das estruturas, resultantes de simplificações de cálculo, variabilidade dos materiais e condições reais de funcionamento. Além disso, a análise dinâmica experimental pode ser utilizada como ferramenta de apoio à avaliação do estado de conservação estrutural, contribuindo para a identificação de alterações de rigidez associadas a danos ou degradação ao longo da vida útil.

2.1.2 Tipos de Ensaios de Vibração

Os ensaios de vibração podem ser classificados de acordo com o tipo de excitação aplicada ao corpo de prova e com o objetivo específico da avaliação. Esses testes permitem reproduzir, de forma controlada, as solicitações dinâmicas a que um produto, componente ou estrutura pode estar sujeito durante sua vida útil. A seguir, apresentam-se os principais tipos de ensaio, suas características e finalidades [1].

2.1.2.1 Ensaio de Vibração Forçada (EMA)

Historicamente, os ensaios de vibração forçada constituíram a principal metodologia para a caracterização dinâmica de grandes estruturas, como pontes e barragens. Nestes ensaios, a estrutura é submetida a excitações artificiais controladas, geradas por dispositivos mecânicos ou hidráulicos, capazes de aplicar forças com variação sinusoidal ou aleatória numa banda de frequências previamente definida. A resposta estrutural é registada, geralmente sob a forma de acelerações, permitindo a construção de funções de resposta em frequência. A partir destas funções, recorrem-se a algoritmos de identificação modal para a determinação dos principais parâmetros dinâmicos, nomeadamente as frequências naturais, os modos de vibração e os coeficientes de amortecimento [2].

A principal finalidade dos ensaios de vibração forçada é a obtenção de uma caracterização modal detalhada e rigorosa do comportamento dinâmico da estrutura, sendo esta abordagem considerada, do ponto de vista experimental, uma das mais completas. Contudo, a necessidade de equipamentos de excitação com elevada potência, capazes de induzir respostas estruturais superiores às vibrações ambientais, implica custos elevados e uma complexidade operacional significativa. Por este motivo, a aplicação deste tipo de ensaio tem vindo a restringir-se a situações específicas, como estudos aprofundados ou validação de modelos numéricos.

Existem, contudo, situações em que a utilização de uma fonte de excitação artificial se torna indispensável para a correta avaliação do comportamento dinâmico de uma estrutura. Um exemplo relevante é o estudo realizado na ponte pedonal Pedro e Inês [2], em Coimbra, após a implementação de um sistema de amortecedores de massa sintonizados (Tuned Mass Dampers – TMDs) com o objetivo de mitigar vibrações induzidas pela circulação de peões. Verificou-se, nesse caso, que o desempenho dos TMDs era inferior ao inicialmente previsto, tornando necessária uma análise mais detalhada do comportamento dinâmico da estrutura em condições de funcionamento efetivo dos dispositivos de controlo.



Figura 2.1 - Excitador hidráulico na ponte Pedro e Inês [2]

Para esse efeito, foi fundamental aplicar uma excitação controlada capaz de induzir níveis de vibração superiores aos observados durante a utilização corrente da ponte por um número reduzido de utilizadores. Esta abordagem permitiu garantir a ativação dos TMDs e, consequentemente, avaliar a sua influência real na resposta dinâmica da estrutura.

A campanha experimental recorreu a um excitador hidráulico desenvolvido no Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, capaz de gerar uma força sinusoidal da ordem dos 1500 N, associada à oscilação de uma massa de aproximadamente 1200 kg, atuando na vizinhança da frequência fundamental da estrutura, em torno de 0,8 Hz. A aplicação deste sistema possibilitou a obtenção de funções de resposta em frequência antes e após a ativação do TMD horizontal, a partir das quais foram estimados os parâmetros modais correspondentes.

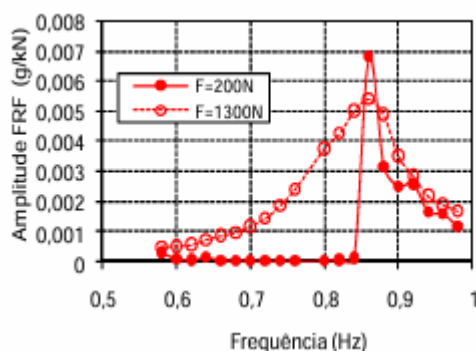


Figura 2.2 - FRFs sem e com activação de TMD [2]

2.1.2.2 Ensaio de Vibração Ambiental (OMA)

Os ensaios de vibração ambiental, baseados na medição da resposta estrutural em serviço, têm evoluído significativamente na última década devido ao avanço dos sensores, sistemas de aquisição e algoritmos de identificação modal, permitindo determinar frequências naturais, modos de vibração e coeficientes de amortecimento com maior precisão.

A metodologia consiste em fixar um ou mais sensores em secções de referência enquanto outros registam simultaneamente a vibração em diferentes pontos. Estes sensores podem ser realocados para novas posições, repetindo-se os registos, de modo a cobrir todos os pontos necessários para caracterizar os modos de interesse, previamente estimados por modelação numérica [2].

A frequência de amostragem é definida com base nas propriedades dinâmicas da estrutura e nas especificações do sistema de aquisição. O tempo de registo em cada posição depende da resolução em frequência desejada, variando tipicamente entre 10 minutos para estruturas com frequências elevadas e 1 hora para estruturas com frequências baixas.

A extensão dos ensaios depende do equipamento disponível e da disponibilidade temporal. Em estruturas de grande porte, é necessário considerar o uso de longas extensões de cablagem elétrica para assegurar uma representação adequada dos modos de vibração.

A extensão dos ensaios de vibração ambiental depende fundamentalmente das características do equipamento de medição disponível e do tempo destinado à realização do ensaio. Em grandes estruturas, é necessário considerar a utilização de extensas cablagens elétricas para garantir a aquisição adequada dos dados e a correta representação dos modos de vibração. Um exemplo clássico é o ensaio realizado em 1985 na ponte suspensa de Humber, no Reino Unido, com vão central de 1.410 m, no qual foram utilizados apenas três acelerómetros, cerca de 2 km de cabos e um sistema de gravação analógica em fita magnética [2].



Figura 2.3 - Ponte de Humber, Reino Unido [2]

A instrumentação da estrutura foi realizada utilizando um conjunto de 10 sismógrafos triaxiais, programáveis por computador e sincronizados por meio de antenas GPS. Essa configuração permitiu monitorizar 76 secções ao longo do tabuleiro e das torres em um período de cinco dias, registando, em cada secção, acelerações nas extremidades do tabuleiro nas três direções, durante intervalos de aproximadamente uma hora. Com este procedimento, foram obtidos dados correspondentes a 228 graus de liberdade, sendo dois pares de sensores utilizados como referência, o que facilitou a distinção entre modos de flexão e torção da estrutura [2].

Considerando-se as dimensões da ponte e a presença de múltiplas frequências naturais próximas, a mais baixa das quais em torno de 0,06 Hz, este ensaio permitiu validar a eficácia dos sensores e da metodologia aplicada. Os resultados demonstraram que a técnica empregada foi altamente eficiente, mesmo em virtude das grandes distâncias entre os pontos de medição.

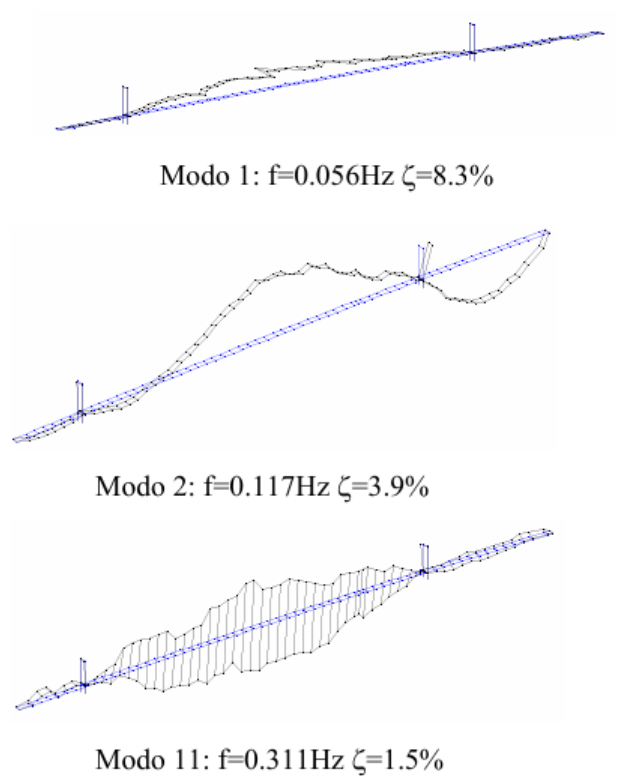


Figura 2.4 - Modos de vibração identificados na ponte de Humber através de ensaio de vibração ambiental [2]

2.2 MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS MODAIS

Uma vez comprovada a ampla disponibilidade de sensores com elevada sensibilidade, bem como a eficácia e confiabilidade das técnicas atualmente empregadas na medição de vibrações ambientais, torna-se pertinente e oportuno aprofundar a abordagem dos diferentes métodos utilizados na identificação dos parâmetros modais, os quais serão apresentados e discutidos nos capítulos a seguir, visando à adequada caracterização do comportamento dinâmico das estruturas.

2.2.1 Método Peak-Picking

O método de seleção de picos, também conhecido como Peak-Picking (PP), constitui uma das abordagens mais tradicionais no domínio da frequência para a identificação dinâmica de estruturas a partir da medição da resposta estrutural a ações ambientais. Atualmente, continua amplamente empregado na engenharia civil devido à sua implementação simples, interpretação física intuitiva e capacidade de fornecer resultados satisfatórios em diversas aplicações.

As primeiras utilizações deste método em estruturas de engenharia civil recorreram a procedimentos mais simplificados do que os atualmente adotados. Entre os estudos pioneiros destacam-se os trabalhos de Crawford e Ward [3], MacLamore et al. [4], Trifunac [5] e Abdel-Ghaffar e Housner [6].

A formulação teórica que fundamenta o formato moderno do método foi desenvolvida por Bendat e Piersol em 1980 [7]. Posteriormente, a sistematização dos procedimentos e sua implementação computacional foram promovidas por Felber [8]. O mesmo autor contribuiu ainda para a consolidação prática da metodologia através de diferentes aplicações experimentais, destacando-se os ensaios de vibração ambiental realizados em sete pontes pelo EMPA, em colaboração com Cantieni [9].

Desde então, o método passou a ser amplamente utilizado na identificação modal de estruturas civis em diferentes países. Em Portugal, destacam-se aplicações conduzidas pelo LNEC e pela FEUP em obras relevantes, como a Ponte 25 de Abril, em Lisboa, a ampliação do Aeroporto da Madeira, a Ponte Salgueiro Maia, em Santarém, a Ponte Luís I, no Porto, a Ponte Internacional do Guadiana e o viaduto ferroviário sobre a Ponte Vasco da Gama, em Lisboa.

O método de seleção de picos enquadra-se nos procedimentos de identificação modal no domínio da frequência e baseia-se na hipótese de que, em regiões próximas das frequências naturais da estrutura, a resposta dinâmica é predominantemente influenciada pelo modo ressonante correspondente. Essa premissa é rigorosamente válida para sistemas de um grau de liberdade, mas também pode ser aplicada, de forma aproximada, a sistemas estruturais mais complexos. Nessas situações, o comportamento da estrutura nas proximidades de uma frequência de ressonância pode ser representado por um sistema equivalente de um grau de liberdade, caracterizado pela mesma frequência natural e pelo mesmo coeficiente de amortecimento do modo dominante.

São empregues métodos de identificação modal de natureza simplificada, com destaque para o método denominado Peak-Picking (PP). Tal abordagem baseia-se na identificação das frequências naturais por meio da seleção dos picos presentes nos espectros médios normalizados (ANPSD), conforme apresentado no subcapítulo 2.2.1.1, bem como na determinação das componentes modais a partir da análise das relações de amplitude e fase das funções resposta em frequência (FRFs), obtidas pela comparação entre a resposta medida em cada ponto e a resposta em um ponto de referência. Ressalta-se que, em decorrência dos pressupostos inerentes ao método, os resultados obtidos correspondem à estimativa dos modos operacionais de vibração, não representando, portanto, os modos próprios da estrutura.

2.2.1.1 Densidade Espectral de Potência Média Normalizada (ANPSD)

A avaliação de apenas um espectro de potência, correspondente a um elemento da diagonal principal da matriz espectral, é suficiente para identificar as frequências de ressonância da estrutura. Isso ocorre porque cada grau de liberdade está associado a um ou mais modos de vibração, tornando possível detetar a presença de todos os modos por meio da análise das frequências dominantes. Assim, é prática corrente examinar os picos dos espectros de potência obtidos a partir das séries temporais de aceleração medidas [10].

Com o objetivo de evitar a análise de um grande número de gráficos, especialmente em sistemas com muitos graus de liberdade instrumentados, utiliza-se frequentemente o espectro médio normalizado de potência (ANPSD), conforme proposto por Felber [8]:

$$ANPSD(\omega) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l NPSD_i(\omega) \quad (2.1)$$

em que l representa o número de graus de liberdade instrumentados e $NPSD_i(\omega)$ corresponde aos espectros normalizados, obtidos pela divisão de cada autoespectro (denominado aqui como PSD) pela soma das suas ordenadas:

$$NPSD(\omega) = \frac{PSD(\omega)}{\sum PSD(\omega_K)} \quad (2.2)$$

A normalização dos espectros torna-se essencial em ensaios realizados com diferentes configurações experimentais (setups), uma vez que as séries temporais correspondentes a cada grau de liberdade não são registradas simultaneamente. Dessa forma, podem ocorrer variações na intensidade da excitação ao longo do ensaio, resultando em espectros de resposta com distintos níveis de energia.

2.2.2 Método avançado de decomposição no domínio da frequência

O método de Decomposição no Domínio da Frequência Melhorada, designado por Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD), foi desenvolvido como uma extensão do método clássico de Decomposição no Domínio da Frequência (Frequency Domain Decomposition – FDD) e encontra-se implementado em plataformas computacionais especializadas, como o software ARTeMIS. A principal contribuição do método EFDD consiste na sua capacidade de identificar modos de vibração com frequências muito próximas, bem como de permitir a estimação dos coeficientes de amortecimento modais, parâmetros que não são passíveis de determinação por meio do método FDD [11] na sua formulação original.

O método EFDD fundamenta-se na aplicação da Decomposição em Valores Singulares (Singular Value Decomposition – SVD) às matrizes de densidade espectral de potência da resposta estrutural. A aplicação desta técnica de factorização matricial a sistemas com n graus de liberdade conduz à obtenção de um conjunto de funções espectrais equivalentes a sistemas de um único grau de liberdade, preservando as frequências naturais e os coeficientes de amortecimento associados aos modos de vibração da estrutura sob análise [11].

No procedimento inerente ao método FDD, procede-se inicialmente à estimação das funções de densidade espectral de potência da resposta estrutural. Posteriormente, realiza-se a decomposição das matrizes espectrais por meio da SVD, sendo os espectros dos valores singulares analisados com o objetivo de identificar os picos de ressonância correspondentes aos modos de vibração. As configurações modais são então determinadas a partir dos vetores singulares associados a esses picos, possibilitando a identificação das frequências naturais e das respectivas formas modais [12].

O método EFDD segue, numa fase inicial, os mesmos procedimentos do método FDD. Todavia, em lugar de se restringir à seleção pontual dos picos dos espectros de valores singulares, o EFDD considera intervalos de frequência nos quais os vetores singulares apresentam elevada correlação entre si, caracterizando de forma mais robusta a resposta do sistema estrutural associada a um determinado modo de vibração. Deste modo, a identificação modal passa a incorporar não apenas o vetor singular correspondente à frequência de ressonância, mas também a contribuição dos vetores singulares na sua vizinhança espectral, permitindo uma representação mais fiel do comportamento dinâmico da estrutura [12].

Para a quantificação da similaridade entre o vetor singular associado à frequência de ressonância e os vetores singulares correspondentes às frequências adjacentes, recorre-se ao critério de correlação modal conhecido como Modal Assurance Criterion (MAC). A sua expressão é a seguinte, onde Φ_i e Φ_j são dois vetores com configurações modais a serem comparados.

$$MAC_{ij} = \frac{(\Phi_i^T \times \Phi_j)^2}{(\Phi_i^T \times \Phi_i)(\Phi_j^T \times \Phi_j)} \quad (2.3)$$

Este coeficiente estabelece uma medida normalizada de correlação entre duas configurações modais, assumindo valores compreendidos entre zero e um. Valores próximos da unidade indicam elevada correspondência modal, ao passo que valores próximos de zero denotam baixa similaridade entre as configurações modais analisadas.

2.3 CONDICIONANTES A TER EM CONTA NA REALIZAÇÃO DO ENSAIO

Os ensaios de vibração ambiental constituem uma ferramenta fundamental para a caracterização do comportamento dinâmico de sistemas estruturais, equipamentos e componentes sujeitos a excitações provenientes do ambiente envolvente. Estes ensaios permitem identificar propriedades modais, avaliar níveis de solicitação dinâmica e verificar a conformidade com critérios normativos de segurança, durabilidade e conforto. Contudo, a fiabilidade dos resultados obtidos depende diretamente do cumprimento rigoroso de condições e requisitos técnicos, metodológicos e normativos previamente estabelecidos.

Neste contexto, o presente capítulo tem como objetivo descrever os principais pressupostos necessários para a execução correta dos ensaios de vibração ambiental, abordando aspetos relacionados com o planeamento experimental, a instrumentação, as condições ambientais, os procedimentos de medição, o controlo da qualidade e a documentação dos resultados, com base em normas técnicas e literatura científica reconhecida.

2.3.1 Definição dos objetivos do ensaio

A evolução das técnicas de ensaio, aliada ao desenvolvimento de sensores, sistemas de aquisição de dados e algoritmos para identificação e deteção de danos, tem permitido uma compreensão mais aprofundada do comportamento estrutural de estruturas complexas. Este progresso tem conduzido à crescente integração da dinâmica experimental em programas de gestão e monitorização de infraestruturas, com o objetivo de apoiar decisões relacionadas com intervenções de reabilitação ou reforço após a deteção de danos. Neste contexto, torna-se pertinente analisar os avanços recentes no ensaio dinâmico e na monitorização estrutural de pontes, bem como a sua aplicação nas fases de projeto, construção e exploração [13].

2.3.2 Procedimentos de medição e aquisição de dados

Os procedimentos de medição devem ser definidos de forma sistemática e rigorosa. Isto inclui o posicionamento adequado dos sensores, a orientação correta dos eixos de medição, a escolha da taxa de amostragem e a duração do registro. Uma fixação inadequada dos sensores pode introduzir erros significativos, nomeadamente devido a efeitos de ressonância local ou perda de contacto [13].

A aquisição de dados deve ser realizada com equipamentos capazes de garantir resolução adequada e sincronização entre canais, quando aplicável (mencionados no subcapítulo 2.2). Todos os parâmetros utilizados durante o ensaio devem ser registados de forma detalhada, permitindo a posterior análise e validação dos resultados.

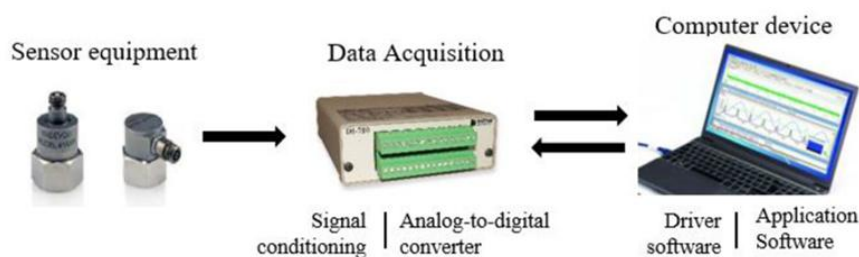


Figura 2.5 - Sistema de teste de vibração ambiental

2.3.3 Precisão, repetibilidade e incerteza de medição

A avaliação da qualidade dos ensaios de vibração ambiental requer a análise da precisão e da repetibilidade dos resultados. Sempre que possível, devem ser realizados ensaios repetidos para verificar a consistência dos dados obtidos. A estimativa da incerteza de medição constitui um aspeto fundamental, uma vez que permite quantificar a confiabilidade dos resultados e a sua adequação aos objetivos do estudo.

2.3.4 Proximidade com critérios normativos

Os resultados obtidos nos ensaios de vibração devem ser analisados e interpretados com base nos critérios definidos pelas normas técnicas aplicáveis, permitindo verificar a conformidade do sistema ensaiado relativamente aos limites admissíveis de vibração, aos requisitos de desempenho e às condições de segurança. Esta análise é particularmente relevante no que se refere à limitação dos níveis de vibração associados ao conforto humano, à integridade estrutural e à salvaguarda da integridade dos equipamentos.

No contexto nacional, destacam-se a NP 2074, relativa ao controlo de vibrações induzidas por explosões [14] ou solicitações de natureza semelhante. Complementarmente, no domínio do conforto humano, é comum recorrer a normas e recomendações internacionais, tais como a ISO 2631 [15], a BS 6472 [16], a DIN 4150-2 [17], o BRE Digest 278 e as orientações do Sétra [18], que fornecem valores de referência e metodologias para a avaliação dos efeitos das vibrações em pessoas e edifícios.

Relativamente à integridade estrutural, verifica-se a inexistência de normas portuguesas específicas para a avaliação de vibrações contínuas em estruturas. Nesses casos, a interpretação dos resultados baseia-se frequentemente em valores-limite e critérios de referência apresentados na literatura técnica e científica da especialidade, bem como em recomendações internacionais, devendo qualquer situação de não conformidade ser cuidadosamente analisada e discutida à luz das suas possíveis causas e implicações para a segurança e durabilidade da estrutura.

2.3.5 Documentação e relato dos ensaios

A documentação completa e rigorosa dos ensaios de vibração ambiental é essencial para garantir a rastreabilidade e a transparência do processo experimental. Os relatórios de ensaio devem incluir a descrição do objeto ensaiado, os objetivos do ensaio, a instrumentação utilizada, os procedimentos adotados, as condições ambientais, os resultados obtidos e a respetiva análise [19].

Uma documentação adequada permite não apenas a validação científica dos resultados, mas também a sua utilização futura em estudos comparativos, auditorias técnicas ou processos de certificação.

2.4 SOLUÇÕES DE INSTRUMENTAÇÃO

2.4.1 Soluções de instrumentação aplicadas a ensaios em geral

Na definição da configuração experimental dos ensaios, a escolha do tipo de equipamento e das suas características técnicas assume um papel determinante na qualidade e fiabilidade das medições. Em particular, a seleção criteriosa dos sensores e dos sistemas de digitalização é fundamental para assegurar a adequada captação da resposta dinâmica da estrutura. O tipo de sensor a utilizar como extensómetros, acelerómetros, termómetros ou sistemas integrados de aquisição de dados deve ser definido em função dos objetivos específicos do ensaio. Estes objetivos podem incluir a caracterização de parâmetros físicos e químicos dos materiais, tais como temperatura, fissuração, teor de humidade, pH e processos de corrosão, bem como a avaliação de parâmetros de natureza mecânica, nomeadamente condições ambientais, ação do vento, estados de carga e comportamento estático e dinâmico da estrutura [20].

A instalação e a configuração dos sensores dependem, assim, das finalidades do programa de monitorização, das limitações económicas associadas e das características geométricas e estruturais do sistema em estudo, aspetos que condicionam a distribuição, o número e o tipo de sensores a adotar, conforme sintetizado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Tipo de sensor baseado em grandezas físicas

Quantidade física	Sensor
Deslocamentos	Transformador diferencial variável linear
	Fibra ótica de longo alcance
	Ótico
	Laser
Aceleração	Acelerómetro piezoelétrico
	Acelerómetro capacitivo
	Acelerómetro balanceado por força
	Sismógrafo MEMS
Força	Células de carga resistivas
	Células de carga piezoelétricas
Temperatura	Termómetros de resistência elétrica
	Termopares
	Termístores
	Sensores baseados em fibra ótica

Em determinadas situações, a realização de ensaios requer um elevado número de pontos de medição ou envolve locais de difícil acesso, como ocorre, por exemplo, na avaliação indireta de esforços em cabos de pontes estaiadas ou suspensas. Nestes casos, a utilização de sistemas de medição sem contacto constitui uma alternativa particularmente vantajosa. Estes sistemas permitem a aquisição de dados sem interação física com a estrutura, sendo especialmente adequados para medições com elevadas taxas de amostragem e para a análise de elementos sensíveis ou deformáveis. Comparativamente aos dispositivos de contacto, as soluções sem contacto possibilitam a medição simultânea de múltiplos pontos e direções, reduzindo o tempo de instalação e de ensaio [20].

Os sistemas de medição sem contacto baseiam-se, essencialmente, em tecnologias laser, radar, GPS, vídeo e fotogrametria digital, sendo que estudos recentes indicam que a combinação de diferentes tecnologias pode melhorar o desempenho global do sistema de medição. A tecnologia laser destaca-se pela elevada precisão na medição de vibrações e deslocamentos a grandes distâncias, embora apresente custos de implementação elevados. Por sua vez, os sistemas baseados em GPS têm sido aplicados na monitorização de pontes de grande vão permitindo a medição de deslocamentos estruturais, ainda que com limitações de precisão, que podem ser mitigadas através da utilização de estações de referência locais. A integração de recetores GPS com acelerómetros triaxiais tem demonstrado potencial para a caracterização da resposta dinâmica estrutural e para a deteção de deformações de pequena magnitude, quando validada por modelos numéricos [20].

De um modo geral, a análise da literatura evidencia que, no caso específico de ensaios dinâmicos, os ensaios de vibração ambiental apresentam vantagens significativas face aos ensaios de vibração forçada, nomeadamente pela possibilidade de serem realizados em condições normais de exploração da infraestrutura, pela ausência de dispositivos de excitação dispendiosos e pelo menor custo global associado à campanha experimental, mantendo, simultaneamente, um nível adequado de fiabilidade dos resultados obtidos (ver Tabela 2.2).

Tabela 2.2 - Resumo das vantagens e limitações do ensaio de vibração ambiental

Ensaio de Vibração Ambiental	
Vantagens	Limitações
Um método conveniente para medir a estrutura sob carregamento de serviço	Configurações trabalhosas, usando centenas de metros de cabos elétricos
Nenhum dispositivo de excitação especial é necessário	É necessário garantir perda mínima de sinal e interferência em longas distâncias
Dados robustos	Os valores de amortecimento estimados estão sujeitos a erros
Ensaios não destrutivos	Sensores de alta sensibilidade são necessários
O custo do experimento como um todo é reduzido	
Pode ser realizado durante a operação normal da estrutura	
Prático para uso em estruturas grandes e pesadas	

2.4.2 Disposição e planeamento da instrumentação em ensaios dinâmicos

O posicionamento dos sensores constitui uma etapa crítica no planeamento de campanhas experimentais de monitorização e ensaio dinâmico de estruturas. A definição dos pontos de medição deve basear-se em modelos numéricos prévios, nomeadamente modelos de elementos finitos (FEM), de forma a garantir que as posições selecionadas apresentem máxima sensibilidade aos modos de vibração relevantes. Esta abordagem permite otimizar a quantidade de sensores utilizados e assegurar que as medições recolhidas sejam representativas do comportamento modal global da estrutura.

A quantidade e a localização dos pontos de medição exercem influência direta sobre a qualidade da identificação modal e sobre a reconstrução das formas modais (mode shapes). Uma distribuição inadequada dos sensores pode resultar em lacunas de informação espacial, dificultando a interpretação dos modos de vibração ou conduzindo a erros na estimativa das frequências naturais e coeficientes de amortecimento.

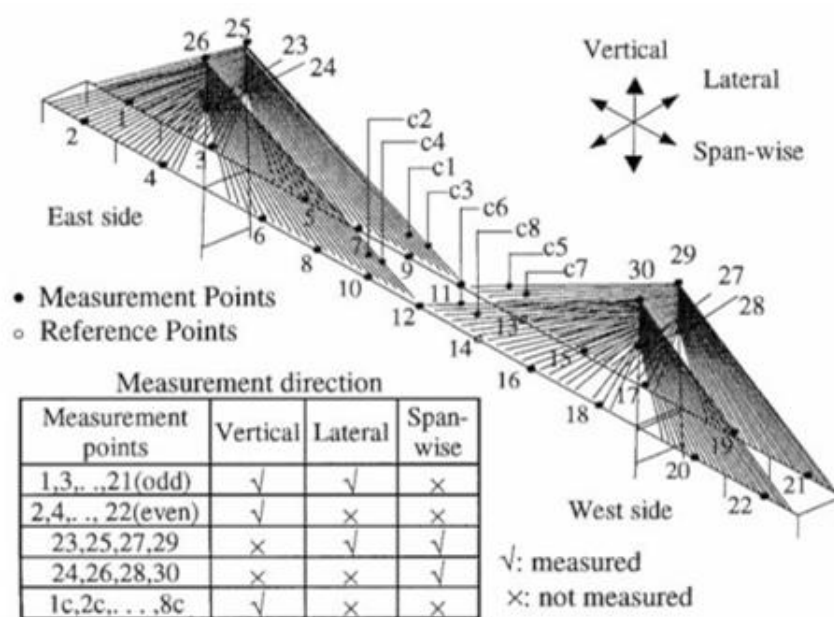


Figura 2.6 - Locais de medição da ponte estaiada de vão longo com vista esquemática 3D [21]

Por esta razão, recomenda-se a adoção de configurações simétricas e redundantes, que possibilitem a validação cruzada dos resultados e aumentem a fiabilidade das medições. Além disso, a realização de medições simultâneas em diferentes zonas da estrutura tais como tabuleiros, pilares e apoios é fundamental para garantir uma correlação modal consistente entre os diversos pontos instrumentados e para evitar ambiguidades na identificação das respostas estruturais, como o exemplo da Ponte estaiada da Figura 2.6.

2.4.3 Monitorização com recurso a um sistema comercial

2.4.3.1 Sismógrafos triaxiais

A principal função desses equipamentos é registar acelerações resultantes de excitações externas, como atividades sísmicas, embora também possam captar vibrações provocadas por outras fontes dinâmicas, como o tráfego ferroviário, rodoviário e de pedestres (ver Figura 2.8).



Figura 2.7 - Preparação dos equipamentos de aquisição durante o ensaio de vibração ambiental.

Cada unidade é composta por um sistema triaxial de medição, capaz de registar acelerações em três direções ortogonais, além de incluir módulos de alimentação elétrica, conversão de sinal, processamento e armazenamento de dados [22].

Os dispositivos podem ser programados previamente para iniciar o registo de acelerações em um horário determinado e por um período definido pelo operador.

Quando utilizados em conjunto, esses sensores permitem monitorar simultaneamente diferentes pontos de uma estrutura, desde que seus relógios internos estejam sincronizados a uma mesma referência temporal.

Essa configuração possibilita a identificação experimental dos parâmetros modais de estruturas de engenharia civil, contribuindo para a avaliação dinâmica do seu comportamento.

2.4.3.2 Acelerômetro do tipo force balance

Esses dispositivos são compostos por uma massa interna e um sistema de controle associado conforme representado na Figura 2.8.



Figura 2.8 - Exemplo de uma estação de referência utilizada no ensaio da ponte, constituída pelos aparelhos

Quando submetida a uma aceleração externa, a massa tende a deslocar-se, gerando um sinal elétrico proporcional à força aplicada, o qual é equilibrado por meio de forças de natureza eletromagnética que mantêm o sistema estável.

Devido à sua alta sensibilidade e precisão, esses sensores são especialmente adequados para ensaios de identificação modal estocástica em estruturas de engenharia civil [23].

Podem ser utilizados tanto em estruturas de comportamento mais flexível, como também em sistemas menos sensíveis às excitações ambientais, onde as respostas dinâmicas apresentam menor amplitude.

2.4.4 Monitorização com recurso a um sistema customizado

2.4.4.1 Descrição dos sensores

Os sensores personalizados (acelerómetros) empregados nesta pesquisa foram concebidos na FEUP por integrantes do grupo de investigação CONSTRUCT. Esses dispositivos são sem fio, alimentados por baterias e, em certos casos, por pequenos painéis solares. Apresentam dimensões reduzidas e custo inferior em relação aos sensores tradicionais.

O dispositivo está alojado em uma caixa metálica robusta existindo também alguns em caixas de plástico, utilizada para proteger os componentes eletrónicos internos contra poeira, humidade e impactos mecânicos, características importantes em medições realizadas em ambiente externo (ver Figura 2.9).



Figura 2.9 - Sensor customizado exemplar utilizado no ensaio

2.4.4.2 Microprocessador

Os sensores contam com um microprocessador incorporado na sua placa, que pode ser um microcontrolador do tipo Arduino Pro Mini ou Teensy. Como ambos podem ser programados através do software gratuito Arduino sendo que, no caso da Teensy, é necessário o uso do complemento Teensyduino, disponível no site oficial da marca [24], grande parte do código utilizado para o funcionamento integrado dos componentes pode ser partilhado entre as duas plataformas.

2.4.4.3 Arduino pro mini

A placa Arduino Pro Mini (ilustrada na Figura 2.10) é um microcontrolador desenvolvido pela SparkFun Electronics [25]. Ela utiliza o chip ATmega328P e possui dimensões aproximadas de 17,5 mm × 32,5 mm. Existem duas versões: uma que opera a 3,3 V e 8 MHz e outra a 5 V e 16 MHz, sendo a primeira a utilizada nos sensores personalizados.

A placa conta com 14 pinos digitais de entrada/saída (dos quais 6 podem funcionar como saídas PWM), 6 entradas analógicas, um botão de reinício e furos para a instalação de conectores. Um conector de seis pinos permite a ligação a um cabo FTDI ou a uma placa de expansão SparkFun, possibilitando a alimentação via USB e a comunicação série.

Por padrão, a Arduino Pro Mini é fornecida sem conectores soldados, o que oferece flexibilidade para o uso de diferentes tipos de conectores ou para a soldagem direta de fios. O microcontrolador ATmega328P oferece suporte às comunicações I2C (TWI) e SPI, além de dispor de 32 kB de memória flash, 2 kB de RAM e 1 kB de EEPROM.



Figura 2.10 - Teensy 4.0 microcontrolador

2.4.4.4 Teensy

A Teensy é uma família de placas de microcontroladores concebida e fabricada pela PJRC Electronic Projects. Nesta pesquisa foram utilizados dois tipos de placas Teensy: a 3.2 e a 4.0.

2.4.4.5 Teensy 3.2

A Teensy 3.2 [26] (apresentada na Figura 2.11) baseia-se no ARM Cortex-M4 e as suas dimensões são de aproximadamente 17,8 mm × 36,5 mm. Opera a 3 V e até 72 MHz.

Possui 34 pinos de entrada/saída digitais (dos quais 12 podem ser utilizados como saídas PWM), 21 pinos de entrada analógica e um pino de saída analógica, um botão de reset e orifícios para montagem de conectores de pinos. Possui uma porta micro-USB integrada para fornecer alimentação USB e comunicação série à placa. A placa vem sem conectores pré-montados, permitindo a utilização de vários tipos de conectores ou soldadura direta de fios. Suporta comunicação I2C (TWI) e SPI, possui 256 kB de memória flash para armazenamento de código, 64 kB de RAM e 2 kB de EEPROM.

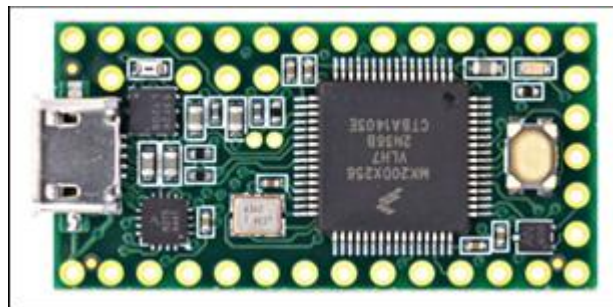


Figura 2.11 - Teensy 3.2 microcontrolador

2.4.4.6 Teensy 4.0

O Teensy 4.0 [27] (apresentado na Figura 2.12) baseia-se no ARM Cortex-M7 e nas suas dimensões são de aproximadamente 17,8 mm × 36,5 mm. Opera a 3,3 V e até 600 MHz.

Possui 40 pinos de entrada/saída digitais (dos quais 31 podem ser utilizados como saídas PWM), 14 pinos de entrada analógica, um botão de reset e orifícios para a montagem de conectores de pinos. Possui uma porta micro-USB integrada para fornecer alimentação USB e comunicação série à placa. A placa vem sem conectores pré-montados, permitindo a utilização de vários tipos de conectores ou a soldadura direta de fios.

Suporta comunicação I2C (TWI) e SPI, possui 1984 kB de memória flash para armazenamento de código, 1024 kB de RAM e 1 kB de EEPROM.



Figura 2.12 - Teensy 4.0 microcontrolador

2.4.5 Aquisição de dados

A aquisição de dados é a parte mais importante da monitorização estrutural, pois é a primeira etapa da cadeia e todas as seguintes dependem dos dados gerados nesta etapa. Para cada tipo de sensor utilizado nesta investigação, foi integrado um dispositivo de aquisição de dados específico, dado que o tipo de dados recolhidos varia de um para outro. Exemplos dos sensores que serão utilizados podem ser observados na Figura 2.13.



Figura 2.13 - Diferentes sensores de aquisição de dados (temperatura à esquerda, dois acelerómetros diferentes no centro e deslocamento à direita).

2.4.5.1 Características dos acelerómetros

A aquisição de dados foi realizada com acelerómetros integrados no próprio sensor. Foram utilizados dois tipos diferentes de acelerómetros, ambos com o mesmo mecanismo de trabalho: o ADXL355 [28] e o ADXL 357 [29].

Estes componentes são acelerómetros de 3 eixos, com baixa densidade de ruído, baixo consumo e gamas de medição seleccionáveis, produzidos pela Analog Devices. Oferecem um desvio mínimo de deslocamento em relação à temperatura e estabilidade a longo prazo, permitindo aplicações de precisão com calibração mínima.

O ADXL355 suporta as gamas de medição de ± 2 g, ± 4 g e ± 8 g, enquanto o ADXL357 suporta as gamas de medição de ± 10 g, ± 20 g e ± 80 g. Desta forma, foi possível desenvolver sensores mais precisos utilizando o ADXL355 para aplicações em ambientes de baixa vibração (como ensaios de vibração ambiental) e sensores mais tolerantes utilizando o ADXL357 para aplicações em ambientes de elevada vibração (como obras de construção). Um módulo ADXL pode ser visto na Figura 2.14.



Figura 2.14 - Módulo acelerómetro ADXL

2.4.5.2 Transmissão de dados

A transmissão de dados é em geral realizada através de um módulo de radiofrequência Digi XBee3 RF [30] (apresentado na Figura 2.15). Estes módulos permitem a transmissão de sinais por ondas de rádio entre dispositivos, alcançando distâncias de transmissão até cerca de dois quilómetros. Os módulos são configurados especificamente de acordo com a sua função, como transmissor ou recetor, e são integrados no sensor através da respetiva porta série (serial1, no caso do Teensy).



Figura 2.15 - Modulo Digi XBee3 RF

Nos casos correntes, por vezes é mais fácil gravar os dados num cartão local microSD, evitando a necessidade de estabelecer uma ligação permanente a um computador durante o ensaio. Esta abordagem simplifica significativamente a instalação em campo, reduzindo o número de equipamentos auxiliares necessários e aumentando a flexibilidade operacional do sistema. Além disso, permite a realização de campanhas de medição em locais de difícil acesso ou onde a disponibilidade de alimentação elétrica e de infraestruturas de comunicação é limitada.

2.4.5.3 Outros componentes

Todos os sensores estão equipados com um leitor de cartões micro-SD, para permitir o armazenamento integral dos dados recolhidos (ou seja, o próprio sinal e os parâmetros calculados), e também com um módulo de relógio em tempo real. Podem também ter um módulo GPS que permite a sincronização entre múltiplos sensores em aplicações de longa duração.

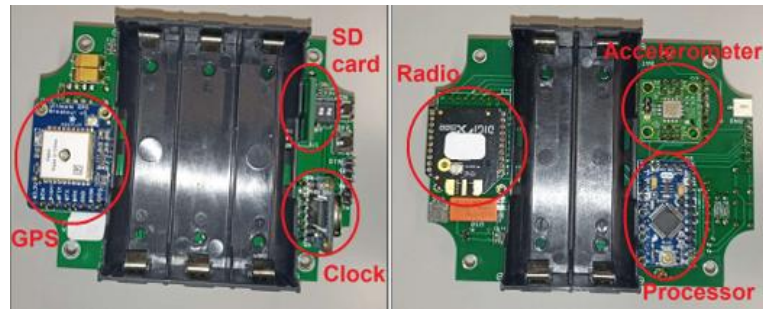


Figura 2.16 - Acelerômetro baseado em Arduino com seus componentes especificados

Todos os sensores são alimentados por baterias de lítio, geralmente cinco para os módulos Arduino e seis para os módulos Teensy; alguns dos módulos possuem almofadas metálicas que permitem a ligação a baterias extra (geralmente quatro). Têm uma autonomia média de seis meses para a base em Arduino e de um mês para a base em Teensy. A Figura 2.16 mostra um acelerômetro baseado em Arduino com os seus componentes especificados.

3

PONTE ENGENHEIRO MACHADO VAZ – CASO DE ESTUDO

3.1 ASPETOS HISTÓRICOS

A Ponte Engenheiro Machado Vaz, localizada na cidade de Mirandela, distrito de Bragança, constitui uma das principais infraestruturas de ligação urbana sobre o rio Tua, desempenhando um papel relevante tanto no contexto da mobilidade local como na história do desenvolvimento infraestrutural da região (ver Figura 3.1). A sua construção enquadra-se no processo de modernização das vias de comunicação do interior norte de Portugal, que ganhou expressão a partir da segunda metade do século XX, com o objetivo de melhorar as ligações rodoviárias e promover o desenvolvimento económico regional.



Figura 3.1 - Ponte Engenheiro Machado Vaz (nova)

A ponte recebeu o nome do engenheiro Machado Vaz, em homenagem ao contributo deste profissional para o planeamento e execução de obras de engenharia civil na região de Trás-os-Montes (ver Figura 3.2). A estrutura reflete as práticas construtivas e soluções técnicas características da época, incorporando avanços na utilização do betão armado e pré-esforçado, bem como metodologias de cálculo estrutural mais evoluídas, os pilares de geometria variável (ver Figura 3.3).



Figura 3.2 - Pilares da ponte erguidos sobre o Rio Tua



Figura 3.3 - Vista lateral longitudinal do Pilar

Ao longo das décadas, a ponte tem sido objeto de intervenções de manutenção e inspeções periódicas, de modo a assegurar a sua durabilidade e desempenho funcional. A sua relevância histórica e técnica justifica a escolha desta estrutura como caso de estudo, permitindo analisar o comportamento dinâmico de uma ponte real sujeita a ações ambientais e operacionais representativas das condições de serviço (ver Figura 3.4).



Figura 3.4 - Perspetiva da Ponte Engenheiro Machado Vaz

3.2 CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA E MATERIAL

A Ponte Engenheiro Machado Vaz apresenta uma configuração estrutural em vigas contínuas de betão armado, apoiadas em pilares e encontros fundados nas margens do rio. O tabuleiro é composto por um conjunto de vigas longitudinais pré-esforçadas, interligadas por lajes transversais de betão armado, que asseguram a distribuição uniforme das cargas e o comportamento monolítico da estrutura (ver Figura 3.5).

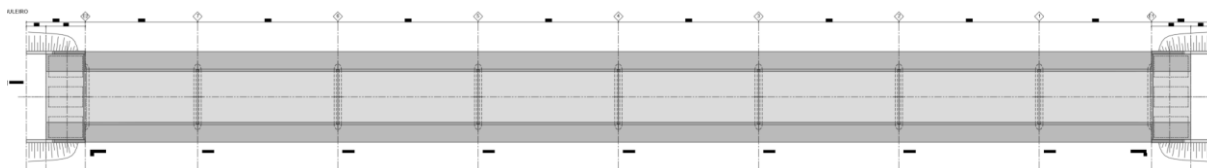


Figura 3.5 - Planta do tabuleiro da ponte

A ponte possui um comprimento total aproximado de 190 metros, divididos em 8 vãos com 6 vãos principais de cerca de 25 metros cada e 1 vão próximo de cada um dos encontros de 20 metros cada. A largura total do tabuleiro é de cerca de 16 metros, permitindo a circulação de duas faixas de rodagem e passeios laterais para peões. Os pilares são constituídos por elementos prismáticos de secção retangular em betão armado, concebidos para resistir predominantemente a esforços de compressão, enquanto os apoios elastoméricos asseguram a transferência de cargas e acomodam deslocamentos horizontais devido a variações térmicas e retrações do betão (ver Figura 3.6).

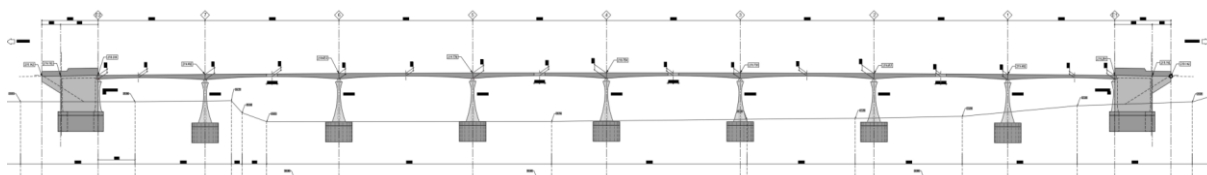


Figura 3.6 - Alçado da Ponte

O pilar em análise apresenta uma geometria simétrica e esbelta, caracterizada por um fuste de forma troncocónica curvilínea, apoiado sobre uma base prismática maciça. A configuração global revela uma conceção que conjuga eficiência estrutural e coerência estética, típica de obras de arte em betão armado de grande porte, como pontes rodoviárias.

A altura total do pilar é de 8,00 m, subdividida em 7,50 m correspondentes ao fuste e 0,70 m à base de fundação aparente. O fuste apresenta um desenvolvimento vertical com perfil variável, cuja secção aumenta progressivamente da parte superior para a inferior, formando uma superfície suavemente alargada que confere maior rigidez e estabilidade à estrutura.

Na zona superior, o pilar possui uma largura aproximada de 2,50 m, que se expande até atingir 5,00 m na base do fuste, conforme indicado no alçado lateral. Essa variação de secção é descrita por linhas de contorno curvas, resultando numa forma contínua e aerodinamicamente eficiente, conforme representada na Figura 3.7.

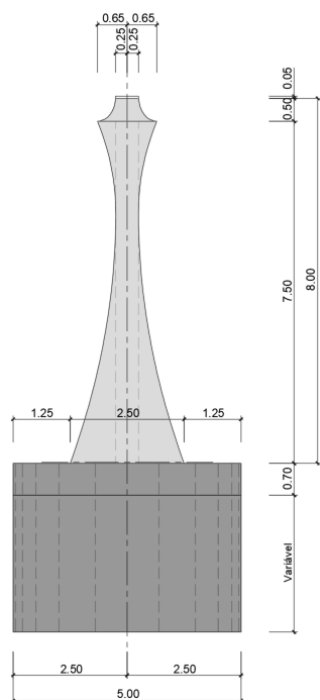


Figura 3.7 - Corte vertical longitudinal (Pilares)

O capitel do pilar, localizado no topo do fuste, apresenta uma ligeira saliência com 0,25 m de espessura, servindo de interface entre o pilar e o tabuleiro da ponte. Esta região é projetada para uniformizar as reações de apoio e reduzir concentrações de tensões (ver Figura 3.8).

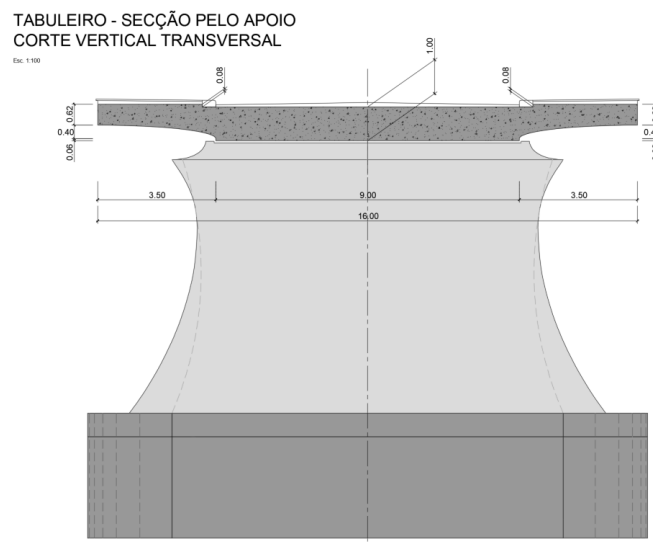


Figura 3.8 - Tabuleiro secção pelo apoio (corte vertical transversal)

O perfil longitudinal do pilar evidencia uma curvatura dupla, com alargamento controlado na base e estreitamento progressivo até ao topo, o que além de otimizar o desempenho sob cargas verticais e laterais, proporciona uma aparência harmoniosa e coerente com a estética global da ponte.

A Figura 3.9 apresentada corresponde a um corte vertical transversal do tabuleiro da estrutura, representando a secção a meio-vão. Observa-se que o tabuleiro possui uma largura total de 16,00 metros, sendo composto por um tramo central de 9,00 metros e dois tramos laterais de 3,50 metros cada. A espessura varia ao longo da secção, com 0,20 metros na zona central e 0,10 metros nas extremidades. O esquema evidencia também a inclinação das superfícies superiores, indicando a existência de pendentos de 2% destinadas ao escoamento das águas pluviais.

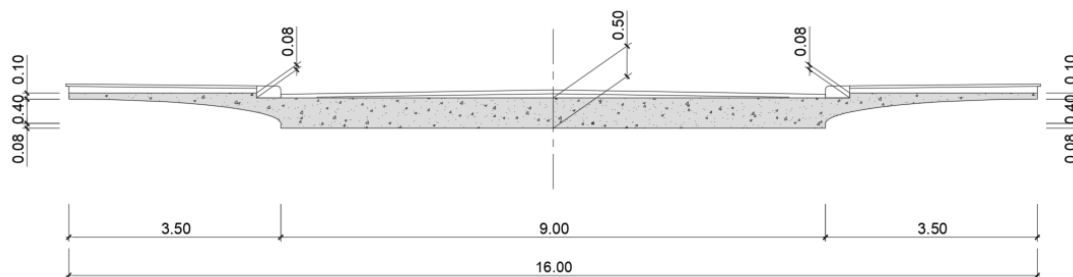


Figura 3.9 - Tabuleiro seção a meio-vão (Corte vertical transversal)

Os materiais estruturais utilizados correspondem a betões de resistência característica à compressão da classe C30/37, armaduras de aço do tipo A400 NR, e cabos de aço de alta resistência para o pré-esforço das vigas principais. As propriedades mecânicas e geométricas da estrutura foram obtidas a partir de desenhos de projeto e inspeções visuais *in situ*, complementadas por medições topográficas e levantamentos tridimensionais realizados previamente ao ensaio experimental.

Esta caracterização é essencial para o desenvolvimento do modelo numérico de elementos finitos (FEM), uma vez que permite reproduzir de forma adequada as condições geométricas, as propriedades dos materiais e as condições de fronteira da estrutura.

3.3 MOTIVAÇÃO DOS ENSAIOS

A realização dos ensaios na Ponte Engenheiro Machado Vaz enquadra-se na necessidade de avaliar o desempenho dinâmico e estrutural de pontes existentes, num contexto em que o envelhecimento das infraestruturas e o aumento das cargas de tráfego impõem desafios significativos à durabilidade e à segurança estrutural. A monitorização experimental *in situ* constitui uma ferramenta essencial para a validação de modelos numéricos, a identificação de alterações no comportamento vibratório e a avaliação da integridade estrutural ao longo do tempo, fornecendo suporte técnico para intervenções de reabilitação e manutenção preventiva (Ver Figura 3.10).



Figura 3.10 - Estado atual dos pilares da ponte (com o nível do rio tua baixo)

Do ponto de vista dinâmico, a ponte evidenciou níveis de vibração perceptíveis sob passagem de veículos pesados, sugerindo uma frequência fundamental relativamente baixa, característica de estruturas esbeltas e de grande vão. Observou-se ainda uma amplificação da resposta vibratória em determinadas zonas do tabuleiro e dos pilares, o que justifica a necessidade de identificar modos de vibração dominantes, frequências naturais e coeficientes de amortecimento modal através de ensaios de vibração ambiental.

Após inspeções em 2019, 2021 e 2023, conclui-se a necessidade de se promover o reforço global da estrutura, de forma a adequá-la à regulamentação atual, confirmando-se que a ponte não verifica a segurança à ação sísmica e agravou o estado de conservação da obra para EC4 [31].

A inspeção da superfície da estrutura revela que o perfil do tabuleiro apresenta irregularidades, destacando-se um desalinhamento longitudinal nas zonas das consolas em vários tramos próximos dos encontros. Esse desalinhamento vem acompanhado de fissuras generalizadas nas peças de calcário que revestem os passeios, as quais se tornam mais evidentes junto aos encontros.

Também se nota o destacamento de algumas das pedras de revestimento ao longo do bordo do tabuleiro. Além disso, verificam-se deformações e desníveis na faixa de rodagem, provavelmente resultantes da circulação variada sobre a ponte, incluindo o trânsito frequente de tratores e equipamentos agrícolas (Ver Figura 3.11 e Figura 3.12).



Figura 3.11 - Observação do desalinhamento do tabuleiro.



Figura 3.12 - Fissuração da pedra de revestimento dos passeios e destacamento no bordo do tabuleiro.

Assim, a motivação central deste estudo reside na integração entre a modelação numérica e a análise experimental, visando uma abordagem híbrida capaz de quantificar o estado de conservação estrutural, detetar anomalias incipientes, e otimizar estratégias de gestão e reabilitação de pontes existentes. No caso particular da Ponte Engenheiro Machado Vaz, os ensaios permitem não apenas caracterizar o seu comportamento vibratório, mas também estabelecer uma correlação entre os parâmetros dinâmicos, as patologias observadas e as medições de flecha, contribuindo para a definição de um diagnóstico estrutural mais completo e fiável.

4

MONITORIZAÇÃO CONTÍNUA DAS VIBRAÇÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA MONITORIZAÇÃO

Antes dos ensaios de vibração ambiental, e a título complementar, foi realizada uma campanha de monitorização contínua das vibrações da ponte durante um período de cerca de duas semanas, entre 25 de julho de 2025 e 8 de agosto de 2025. Como o objetivo de avaliar as condições de conforto da ponte durante a utilização por peões, a estrutura foi monitorizada de forma contínua com quatro sensores triaxiais customizados descritos anteriormente.

O intervalo de monitorização abrangeu o período das Festas da Cidade (25 de julho a 2 de agosto), fase em que se previa um fluxo elevado de utilizadores. A Figura 4.1 apresenta a posição escolhida para os sensores, instalada ao meio vão do segundo e do terceiro tramo a partir do encontro do lado de Bragança (secções 7A, 7D, 11A e 11D) [32] .

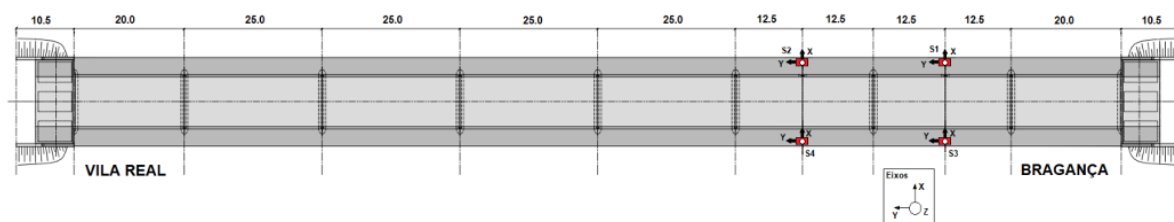


Figura 4.1 - Representação em planta do tabuleiro da ponte, com indicação da localização dos sensores triaxiais (Secções 7A, 7D, 11A e 11D).

A Figura 4.2 mostra imagens de um dos sensores colocado no bordo externo da ponte, fora do guarda-corpos. No lado interior, os sensores foram apenas instalados durante o ensaio de vibração ambiental, permitindo comparar os registos com os provenientes dos sismógrafos e confirmar a qualidade dos dados. Durante toda a campanha de monitorização, as caixas de proteção contendo os sensores, os módulos de aquisição, o cartão de memória e as baterias foram fixadas ao tabuleiro, evitando a sua remoção. Os sensores realizaram a amostragem a 62,5 Hz, com armazenamento de séries temporais de aceleração com a duração de 10 minutos.



Figura 4.2 - Vista de sensores instalados na ponte para monitorização contínua.

4.2 AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE VIBRAÇÃO

Para avaliar a relevância dos níveis de vibração registados, recorrem-se aos limites de conforto indicados nas recomendações internacionais do SÉTRA [18]. Embora estes valores de referência tenham sido estabelecidos para situações de marcha, eles também traduzem a sensibilidade dos peões a vibrações provocadas por outras ações, como o tráfego rodoviário.

No que diz respeito às vibrações horizontais, os valores máximos de aceleração associados aos diferentes níveis de conforto mínimo, médio e intolerável são, respetivamente, $0,15 \text{ m/s}^2$, $0,3 \text{ m/s}^2$ e $0,8 \text{ m/s}^2$. Para vibrações na direção vertical, os limites correspondentes são $0,5 \text{ m/s}^2$, 1 m/s^2 e $2,5 \text{ m/s}^2$. Tais valores encontram-se ilustrados nos gráficos da Figura 4.3.

A partir da análise dos dados recolhidos, é possível concluir que:

- A aceleração transversal situa-se habitualmente no intervalo de conforto máximo, portanto com amplitude inferior a $0,15 \text{ m/s}^2$. No período de 15 dias, apenas se registaram quatro ocorrências em que a aceleração atingiu pontualmente o valor máximo de $0,23 \text{ m/s}^2$, situado no intervalo de conforto médio.
- A aceleração vertical situa-se habitualmente no intervalo de conforto médio, com amplitude máxima genericamente variando entre $0,5$ e 1 m/s^2 . Em algumas ocorrências esporádicas, a aceleração atinge valores mais elevados, situados no intervalo de conforto mínimo, com o máximo de $2,12 \text{ m/s}^2$ observado nos dias 4 e 5 de agosto.

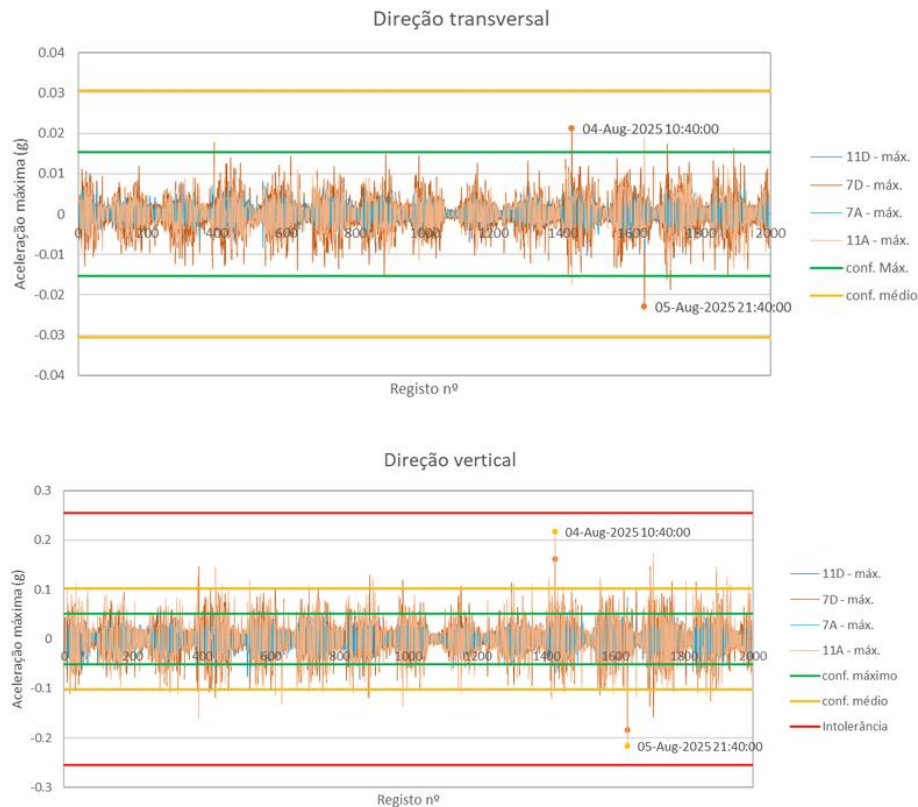


Figura 4.3 - Aceleração máxima registada em séries consecutivas de 10 minutos de duração, entre 25/7/25 e 8/8/2025. Direção transversal ao eixo do tabuleiro (cima). Direção vertical (baixo).

Com o objetivo de caracterizar as vibrações de maior intensidade, apresentam-se na Tabela 4.1 e Figura 4.4 e Figura 4.5 exemplos de registos temporais que estiveram na origem dos valores máximos mais elevados de aceleração vertical. A partir da observação dessas figuras, verifica-se que, embora os picos de aceleração sejam significativos, estes ocorrem em intervalos de tempo relativamente curtos, não ultrapassando os 10 segundos.

Tabela 4.1 - Valores máximos da aceleração registada entre 25/7/2025 e 8/7/2025.

Secção	Aceleração Transversal Máxima (m/s ²)	Aceleração Vertical Máxima (m/s ²)
7 A	0,09	0,82
7 D	0,10	0,79
11 A	0,19	2,12
11 D	0,23	1,81

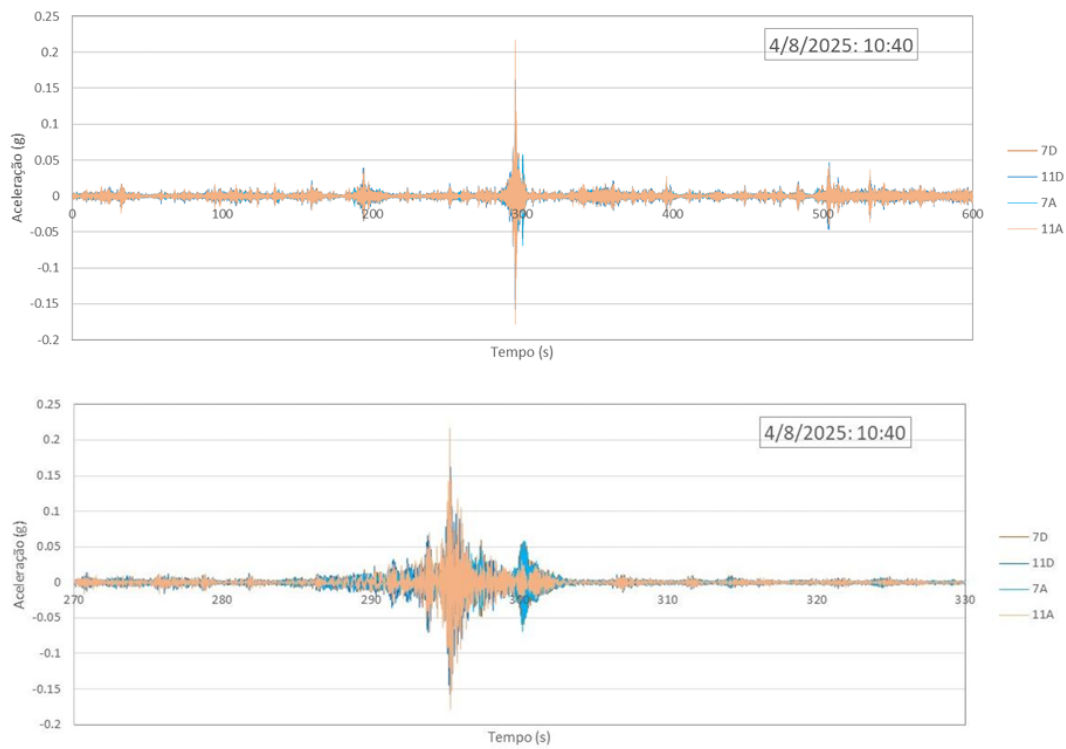


Figura 4.4 - Registos de acelerações verticais no dia 4/8/2025, entre as 10:40 e as 10:50 (cima).
Ampliação do registo numa janela de 60 s (baixo)

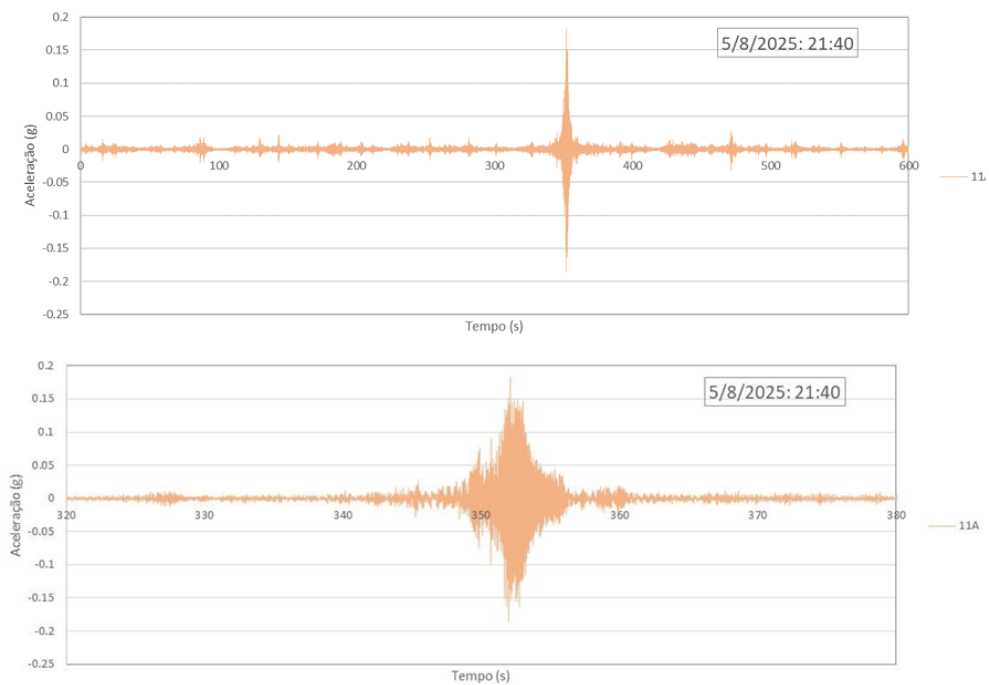


Figura 4.5 - Registos de acelerações verticais no dia 5/8/2025, entre as 21:40 e as 21:50 (cima).
Ampliação do registo numa janela de 60 s (baixo).

Procedeu-se à análise espectral das séries temporais sendo os respectivos espectros médios apresentados na Figura 4.6. A observação dessa figura evidencia a participação de diversos modos de vibração na resposta estrutural, com maior relevância nos dois primeiros modos, bem como em dois outros modos associados a frequências naturais próximas de 13 Hz e 21 Hz. Uma nova avaliação dos dados possibilitou a identificação de dois modos vibratórios de natureza local, associados às consolas de alguns tramos. O modo local de primeira ordem apresenta uma frequência de 13,28 Hz, enquanto o modo local de segunda ordem se caracteriza por uma frequência de 21,78 Hz, conforme ilustrado na Figura 4.7.

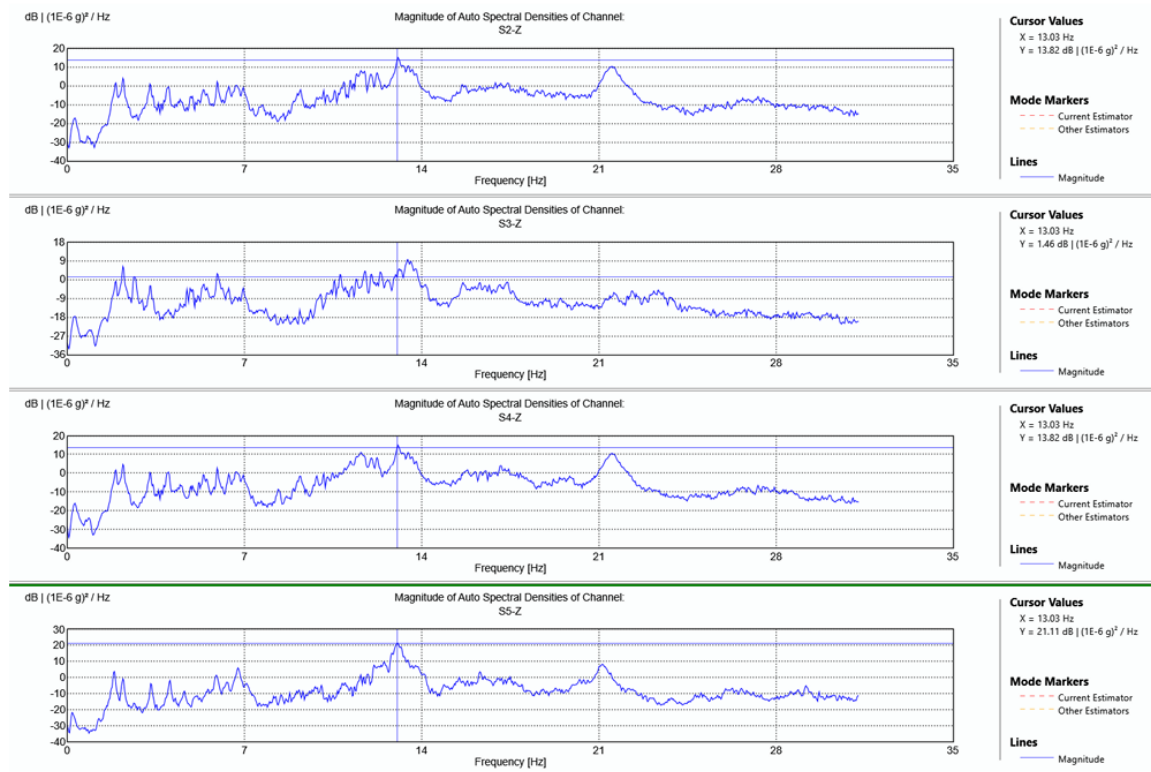


Figura 4.6 - Espectros médios das séries temporais com máxima amplitude de aceleração

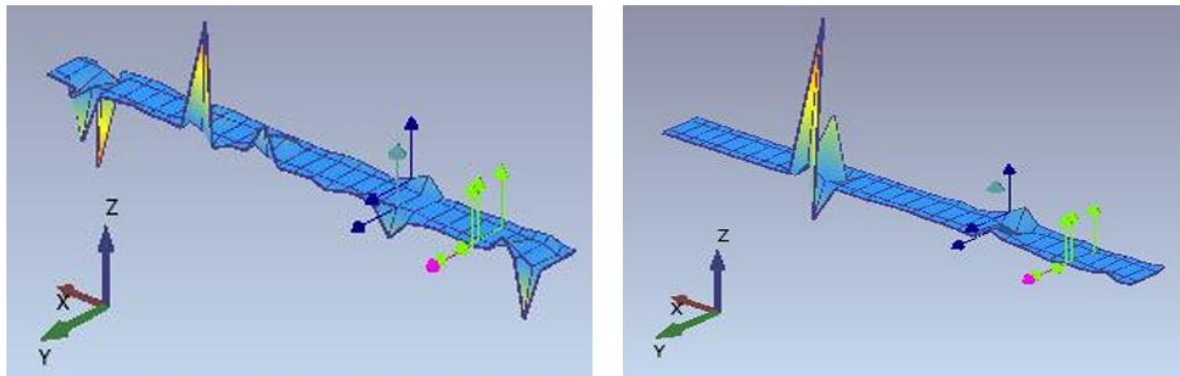


Figura 4.7 - Modos de vibração locais identificados em frequências próximas de 13 Hz e 21 Hz

4.3 IDENTIFICAÇÃO DE FREQUÊNCIAS NATURAIS AO LONGO DO PERÍODO DE MONITORIZAÇÃO

Utilizando o método do Peak-Picking, a evolução temporal das frequências naturais da estrutura foi determinada. Para isso considerou-se, a extração das frequências características do sistema foi efetuada através de dois critérios distintos:

- a seleção dos nove picos dominantes do espectro de potência, correspondentes aos máximos locais de maior amplitude
- a identificação do pico mais significativo em cada banda de frequência previamente estabelecida. Esta segunda abordagem permite assegurar uma distribuição mais homogênea dos modos identificados ao longo do espectro de frequências, evitando a concentração excessiva de resultados em regiões de elevada densidade modal.

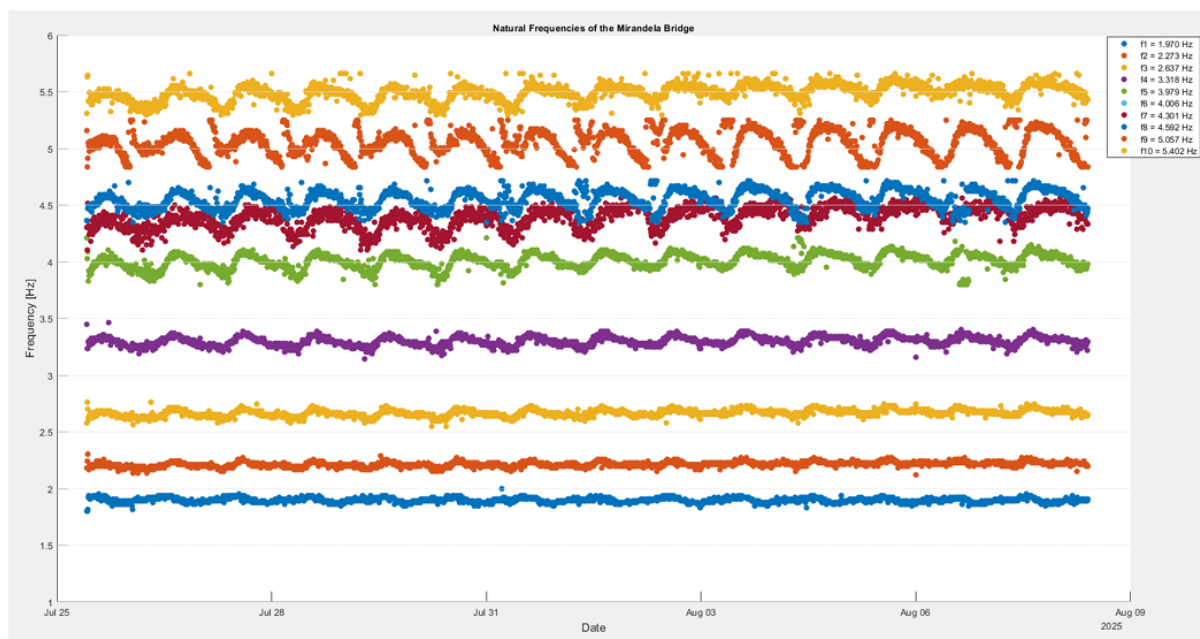


Figura 4.8 - Seguimento das frequências naturais realizado a partir da monitorização da ponte entre 25 de julho e 8 de agosto de 2025.

4.4 CONCLUSÕES DA MONITORIZAÇÃO CONTÍNUA

Como conclusão, a campanha de monitorização contínua realizada entre 25 de julho e 8 de agosto de 2025 permitiu caracterizar os níveis de vibração da estrutura em condições normais de exploração, associadas à circulação regular de veículos e peões, incluindo a resposta da ponte durante um período de maior afluência pedonal relacionado com as festividades da cidade.

Na direção vertical, os níveis de vibração registados nas extremidades das consolas foram, de um modo geral, classificados como médios, sendo apenas pontualmente ultrapassados para valores enquadráveis no intervalo de conforto mínimo. A análise de registos com amplitudes mais elevadas evidenciou que os picos de aceleração ocorrem em períodos muito curtos, não se tendo identificado indícios de fenómenos de ressonância, nomeadamente associados à sincronização do movimento dos peões com a estrutura, pelo menos para os níveis máximos de vibração observados. Constatou-se ainda que as acelerações mais significativas conduzem à mobilização local das consolas nos seus modos vibratórios de primeira e segunda ordem, correspondentes a frequências da ordem dos 13 Hz e 21 Hz.

Já no que respeita à identificação de frequências naturais ao longo do período de monitorização, verifica-se que as frequências apresentam uma variação cíclica ao longo do tempo, caracterizada por um aumento gradual até atingir um valor máximo diário, seguido de uma diminuição subsequente. Este comportamento oscilatório está diretamente relacionado com as variações de temperatura ambiente, que influenciam as propriedades mecânicas da estrutura e, consequentemente, os seus parâmetros dinâmicos.

5

MODELAÇÃO NUMÉRICA

5.1 JUSTIFICAÇÃO DAS FERRAMENTAS UTILIZADAS

A escolha do Autodesk Robot Structural Analysis para a modelação estrutural da Ponte Engenheiro Machado Vaz fundamenta-se na sua elevada capacidade de análise numérica e na ampla aplicação em estudos de engenharia estrutural avançada. O software constitui uma ferramenta consolidada no campo da engenharia civil, reconhecida pela precisão na análise de estruturas complexas e pela integração eficiente com outras plataformas de modelação e desenho assistido por computador, nomeadamente o Autodesk Revit e o AutoCAD.

O Robot Structural Analysis permite a realização de análises lineares e não lineares, estáticas e dinâmicas, possibilitando a simulação de diferentes condições de carga, combinações de esforços e comportamentos estruturais realistas. Esta versatilidade é essencial no contexto da presente investigação, uma vez que a Ponte Engenheiro Machado Vaz apresenta um comportamento estrutural complexo, decorrente das suas dimensões, tipologia e condições de apoio.

Por fim, a escolha deste programa deve-se também à sua credibilidade técnica e validação científica, sendo amplamente adotado em projetos de engenharia e em trabalhos de investigação académica. Assim, a utilização do Robot Structural Analysis assegura não apenas a consistência e fiabilidade dos resultados, mas também a compatibilidade metodológica com práticas de análise estrutural reconhecidas internacionalmente, contribuindo para a robustez e a qualidade científica do estudo.

5.2 DESENVOLVIMENTO DO MODELO NUMÉRICO

5.2.1 Objetivos da modelação

O objetivo principal da modelação numérica da Ponte Engenheiro Machado Vaz é obter um modelo da estrutura capaz de representar o mais aproximadamente o seu comportamento dinâmico. Desta forma, será possível realizar no futuro outros estudos envolvendo diversos cenários de carregamento dinâmico, quer em termos de ações pedonais quer em termos de ações induzidas pelos veículos.

O nível de detalhe adotado corresponde a um modelo global tridimensional da superestrutura, representando os principais elementos estruturais. Foram assumidas hipóteses simplificativas, nomeadamente (ver Figura 5.1):

- Comportamento linear elástico dos materiais;
- Ausência de fissuração explícita do betão;
- Rigidez total nas ligações entre vigas e lajes;
- E apoios representados por restrições lineares.

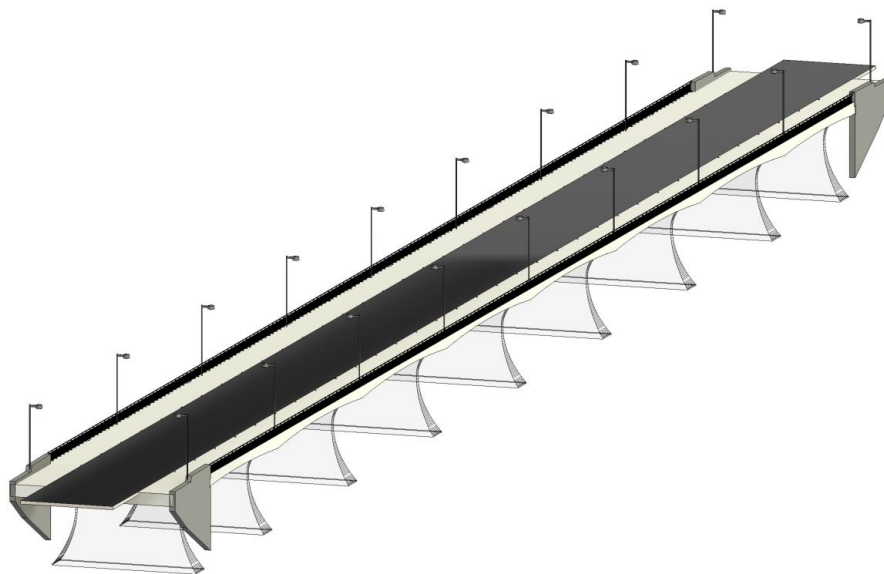


Figura 5.1 - Modelo tridimensional da Ponte Engenheiro Machado Vaz (Revit)

5.2.2 Geometria e propriedades dos materiais

A Ponte Engenheiro Machado Vaz é constituída por um tabuleiro em betão armado com múltiplos vãos, apoiado em pilares e encontros igualmente em betão armado. A definição da geometria baseou-se em levantamentos topográficos existentes e documentação técnica, sendo complementada por medições realizadas in situ.

A modelação numérica foi desenvolvida no software Autodesk Robot Structural Analysis Professional, com introdução paramétrica da geometria estrutural. O tabuleiro foi representado por meio de elementos de viga (frame elements), correspondentes à estrutura resistente principal.

Os pilares foram modelados numericamente como elementos de casca com espessura constante, assumindo comportamento plano e permitindo a adequada representação da rigidez vertical e da transferência de esforços para o tabuleiro. Cada pilar foi definido por superfícies retangulares contínuas, conectadas rigidamente à laje na extremidade superior e vinculadas aos apoios inferiores conforme as condições de contorno do modelo, conforme representa a Figura 5.2.

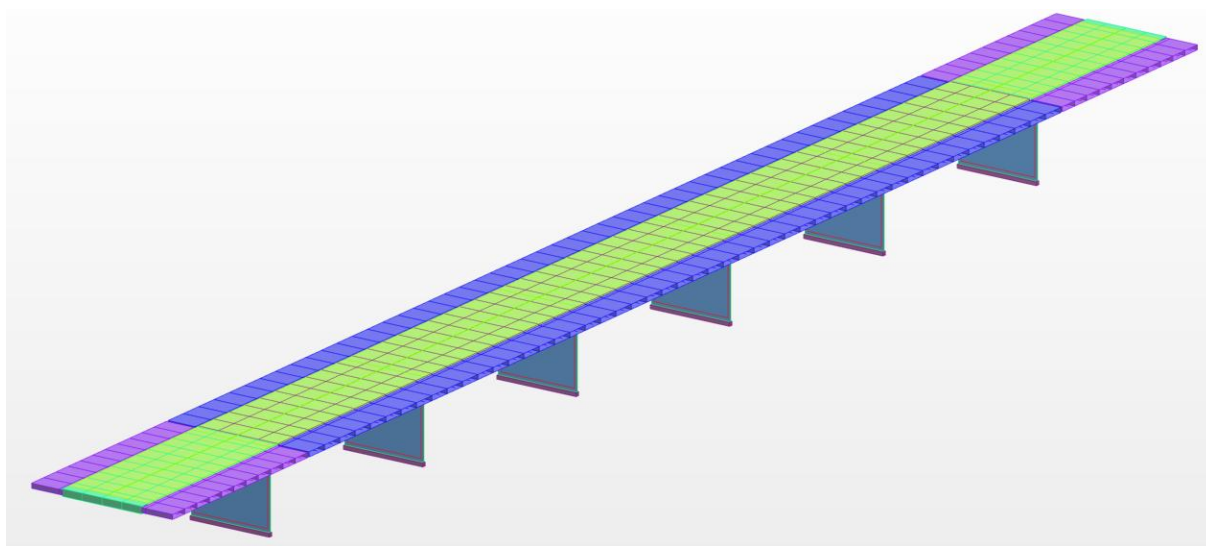


Figura 5.2 - Modelo Numérico da Ponte Engenheiro Machado Vaz (Robot Structural Analysis)

A discretização da estrutura foi realizada por meio de uma malha gerada automaticamente, utilizando o recurso de “automatic selection of a meshing method”, que seleciona o algoritmo mais apropriado para a geometria. Adotou-se um tamanho de elemento uniforme de 1,0 m, garantindo regularidade na malha e compatibilidade entre os elementos de casca dos pilares e os elementos da laje. Essa configuração permitiu obter uma malha suficientemente refinada para capturar os efeitos locais nos apoios, ao mesmo tempo mantendo o custo computacional adequado.

A discretização do modelo foi cuidadosamente ajustada, de forma a assegurar um compromisso entre a precisão dos resultados e a eficiência computacional. O dimensionamento médio dos elementos (representado na Tabela 5.1) finitos foi estabelecido com o objetivo de garantir a convergência dos resultados, nomeadamente ao nível dos deslocamentos e esforços internos.

Tabela 5.1 - Características geométricas adotadas aos elementos estruturais

Troço	Zona da ponte	Dimensão (m)
20 m (Encontros)	Viga transversal (Berma)	2,00 x 0,50
	Viga transversal (Via)	2,00 x 0,75
25 m (Entre Pilares)	Viga transversal (Berma)	2,50 x 0,50
	Viga transversal (Via)	2,50 x 0,75
	Pilares (espessura 0,50 m)	9,00 x 8,00

As propriedades dos materiais adotadas refletem as características típicas das pontes em betão armado construídas na década de 1970, sendo estas complementadas com dados obtidos durante a mais recente campanha de inspeção à estrutura (ver Tabela 5.2).

Tabela 5.2 - Propriedades mecânicas dos materiais adotados no modelo numérico

Material	Classe/ Tipo	Módulo de Elasticidade (E)	Densidade (γ)	Coeficiente de Poisson (ν)
Betão armado	C30/37	33 GPa	25 kN/m ³	0,20
Aço	A500 NR	210 GPa	-	0,30

5.3 AÇÕES PERMANENTES

O peso próprio da ponte foi calculado automaticamente, com base nas propriedades de densidade atribuídas a cada material estrutural (betão e aço). Esta ação representa a contribuição principal das cargas permanentes, estando diretamente associada à geometria e à massa dos elementos modelados, como representa na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Área dos elementos estruturais

Troço	Zona da ponte	Área (m ²)
2,0 m	Viga transversal (Berma)	1,00
	Viga transversal (Via)	1,50
2,5 m	Viga transversal (Berma)	1,25
	Viga transversal (Via)	1,875

Adicionalmente, foram introduzidas cargas permanentes complementares, correspondentes ao revestimento do tabuleiro (asfalto), guarda-corpos e demais componentes não estruturais. Estas cargas (apresentadas na Tabela 5.4) foram consideradas como distribuições uniformes equivalentes, aplicada sobre as superfícies da laje e transmitida às vigas principais, valores de peso próprio retirados do Eurocódigo 1 – parte 2 [33].

Tabela 5.4 - Restantes cargas permanentes

Troço	Zona da ponte	Peso Específico (kN.m)	Espessura	Carga de RCP (kN.m)
2,0 m	Asfalto	24,00	0,08	3,84
	Berma	20,00	0,2	8,00
	Viga e Guarda	3,00		6,00
	Guarda-corpo	4,00		8,00
2,5 m	Asfalto	24,00	0,08	4,80
	Berma	20,00	0,2	10,00
	Viga e Guarda	3,00		7,50
	Guarda-corpo	4,00		10,00

5.4 RESULTADOS DA ANÁLISE MODAL

Os resultados na análise modal tiveram em conta uma calibração do modelo numérico tendo em consideração os ensaios de vibração ambiental descritos nas próximas secções. Neste processo, começou-se por fazer ajustes às condições de apoio da ponte numa das extremidades dos encontros. Em particular, os apoios inicialmente considerados como fixos, impedindo deslocamentos em todas as direções, foram substituídos por apoios verticais, permitindo assim restringir apenas o deslocamento na direção vertical e possibilitando maior compatibilidade com o comportamento estrutural observado experimentalmente (ver Figura 5.3).

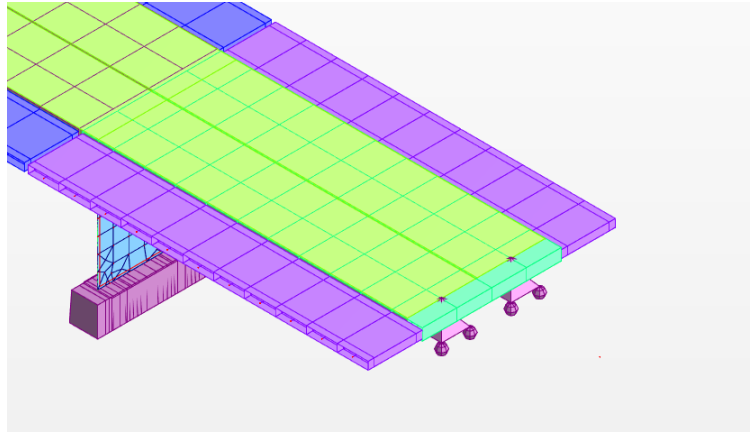


Figura 5.3 - Esquema dos apoios verticais adotados no modelo estrutural

Adicionalmente, para a simulação do comportamento estrutural no topo dos pilares, foram introduzidas rótulas estruturais. Esta modelação teve como objetivo representar de forma mais realista as condições de ligação entre o tabuleiro e os pilares, limitando determinados movimentos e rotações no topo dos pilares da ponte.

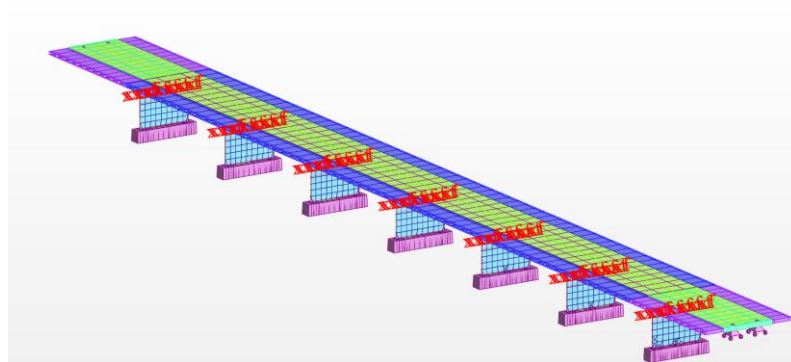


Figura 5.4 - Esquema das rótulas introduzidas no topo dos pilares no modelo numérico da ponte

Posteriormente, procedeu-se à alteração da classe de betão considerada no modelo numérico, passando de C30/37 para C25/30, de modo a aproximar as propriedades mecânicas do material às condições reais da estrutura em estudo. Paralelamente, foi ainda considerada a introdução de uma camada teórica de aço ao longo das duas vias centrais do tabuleiro, com a finalidade de reproduzir o comportamento associado à armadura de pré-esforço. A adoção desta armadura teórica justificou-se pela ausência de pormenores construtivos detalhados relativos às armaduras existentes na estrutura.

O resultado deste processo de ajuste culminou na determinação dos modos de vibração identificados e respetivas frequências naturais indicados na Figura 5.5 a Figura 5.16, nas quais se inclui a comparação com os valores obtidos no ensaio de vibração ambiental (EVA).

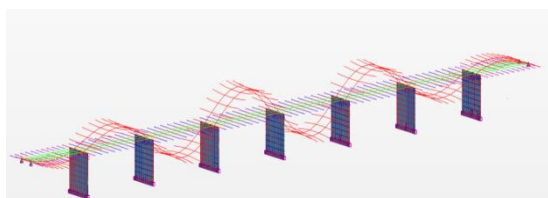


Figura 5.5 - 1º Modo de vibração do modelo numérico, frequência: 1,96Hz

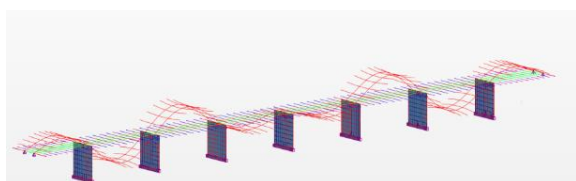


Figura 5.7 - 2º Modo de vibração do modelo numérico, frequência: 2,17 Hz

$F_1=1,977 \text{ Hz}; \xi_1=2,08\%$

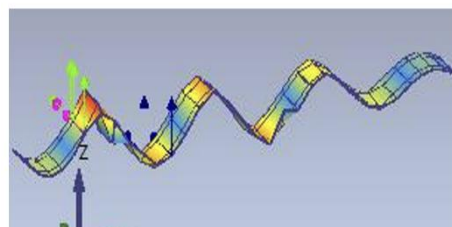


Figura 5.6 - 1º Modo de vibração do EVA

$F_2=2,176 \text{ Hz}; \xi_2=1,46\%$

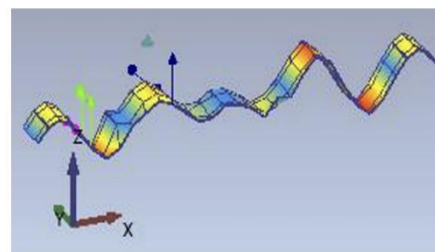


Figura 5.8 - 2º Modo de vibração do EVA

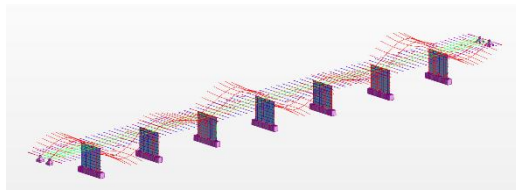


Figura 5.9 - 3º Modo de vibração do modelo numérico, frequência: 2,49 Hz

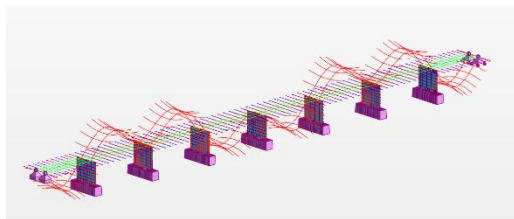


Figura 5.11 - 4º Modo de vibração do modelo numérico, frequência: 2,88 Hz

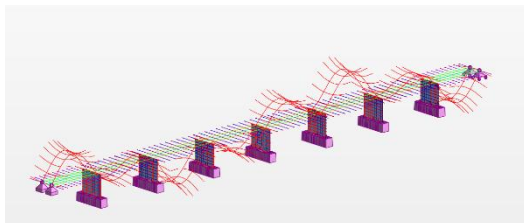


Figura 5.13 - 5º Modo de vibração do modelo numérico, frequência: 3,30 Hz

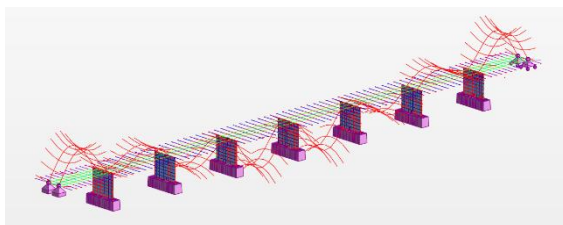


Figura 5.15 - 6º Modo de vibração do modelo numérico, frequência: 3,70 Hz

$F_3=2,668 \text{ Hz}; \xi_3=1,50\%$

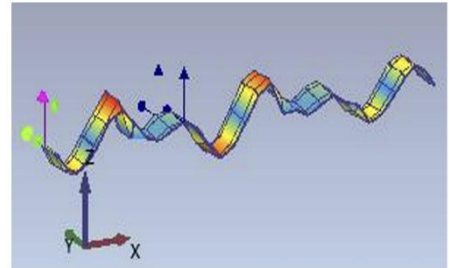


Figura 5.10 - 3º Modo de vibração do EVA

$F_4=3,337 \text{ Hz}; \xi_4=1,16\%$

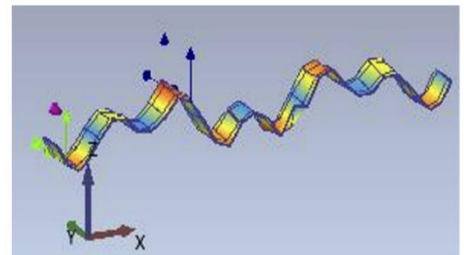


Figura 5.12 - 4º Modo de vibração do EVA

$F_5=3,992 \text{ Hz}; \xi_5=1,16\%$

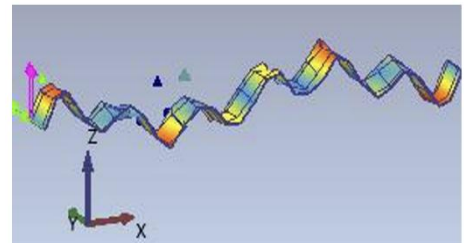


Figura 5.14 - 5º Modo de vibração do EVA

$F_8=4.529 \text{ Hz};$

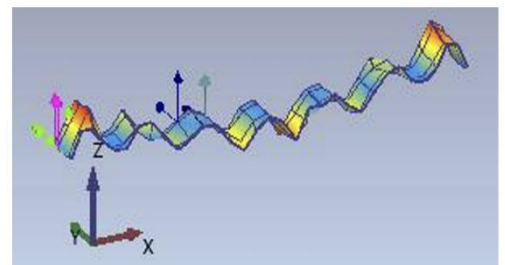


Figura 5.16 - 6º Modo de vibração do EVA

De forma geral, verificou-se que a calibração do modelo numérico apresentou boa concordância com os resultados do ensaio experimental até ao 3º modo de vibração, mantendo-se consistentes tanto as formas modais como as frequências, com valores bastante próximos.

A partir do 4º até ao 6º modo de vibração, observa-se que as formas modais do modelo calibrado permanecem semelhantes às obtidas no ensaio experimental; contudo, as frequências associadas apresentam discrepâncias relevantes.

Essas diferenças podem estar associadas a simplificações inerentes ao modelo numérico, limitações na representação das condições de contorno ou propriedades dos materiais, bem como a incertezas experimentais. Ainda assim, o modelo demonstra capacidade adequada para representar o comportamento dinâmico global da estrutura nos modos de vibração mais relevantes, sendo mais preciso nos modos de menor ordem.

Em resumo, apresenta-se na Tabela 5.5 a comparação das frequências, na qual se evidenciam as diferenças observadas entre os dois conjuntos de resultados.

Tabela 5.5 - Comparação das frequências naturais do modelo numérico e ensaio comercial

Modo	Modelo numérico Freq. (Hz)	Ensaio comercial Freq. (Hz)	Diferenças
1	1,96	1,97	0,50 % (Desprezível)
2	2,17	2,17	0,00 % (nula)
3	2,49	2,66	6,40 % (Baixa)
4	2,88	3,33	13,50 % (Moderada)
5	3,30	3,99	17,30 % (Significativa)
6	3,70	4,52	18,10 % (Elevada)

6

ENSAIOS DE VIBRAÇÃO AMBIENTAL

6.1 MALHA DE PONTOS UTILIZADA

Para a realização dos ensaios de vibração ambiental na Ponte Machado Vaz, localizada em Mirandela, foi estabelecida uma malha de pontos de medição ao longo do tabuleiro, de modo a permitir a identificação e caracterização das principais formas modais da estrutura. A ponte possui um comprimento total de aproximadamente 190 metros, sendo o levantamento experimental efetuado ao longo do eixo longitudinal principal do tabuleiro.

A malha, representada esquematicamente na Figura 6.1, é composta por 33 pontos de medição distribuídos uniformemente ao longo do comprimento da ponte. Cada ponto representa uma posição onde foi instalado um sensor de aceleração durante o ensaio. Essa discretização foi concebida de forma a garantir uma adequada resolução espacial na captura das respostas dinâmicas, possibilitando a identificação das deformadas modais correspondentes aos modos fundamentais de vibração.

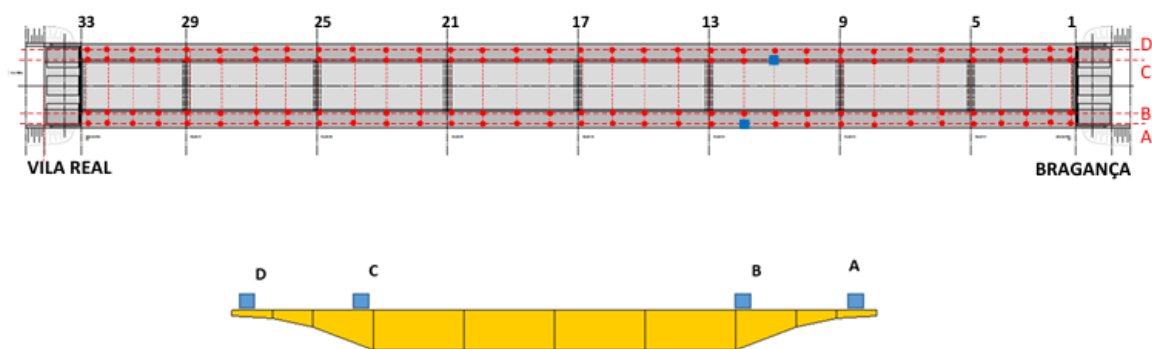


Figura 6.1 - Plano de instrumentação.

Os pontos foram numerados sequencialmente de 1 a 33, iniciando-se em uma das extremidades da ponte (extremidade oeste) e seguindo até à extremidade oposta (extremidade leste). A disposição linear dos pontos reflete o comportamento essencialmente unidimensional da estrutura na direção longitudinal, uma vez que o objetivo principal do ensaio consistiu na avaliação dos modos verticais e longitudinais predominantes [21].

Na extremidade direita do esquema, identificam-se ainda os pontos de referência A, B, C e D, correspondentes às posições instrumentadas próximas ao apoio da ponte, onde foram posicionados sensores adicionais para a verificação de condições de contorno e calibração dos resultados. Esses pontos auxiliaram na análise de coerência entre os sinais medidos e na validação da modelagem numérica posteriormente utilizada.

A distância entre os pontos consecutivos da malha foi definida de forma proporcional ao comprimento total da ponte, resultando em um espaçamento médio de aproximadamente 5,75 metros entre cada ponto de medição. Essa densidade de discretização mostrou-se adequada para a caracterização experimental das frequências naturais mais baixas e das respectivas formas modais, atendendo aos critérios recomendados em ensaios de vibração ambiental para pontes de grande vão.

Assim, a malha de 33 pontos adotada permitiu uma cobertura eficiente da estrutura, equilibrando o número de medições com a complexidade operacional do ensaio, assegurando, portanto, uma representação fidedigna do comportamento dinâmico global da ponte.

6.2 ENSAIO DE VIBRAÇÃO AMBIENTAL COM RECURSO A UM SISTEMA COMERCIAL

6.2.1 Identificação de parâmetros modais

Realizou-se inicialmente um tratamento das séries temporais, removendo a componente DC e reduzindo a taxa de amostragem para 25 Hz. Esse procedimento permitiu concentrar a análise no espectro entre 0 e 10 Hz, faixa considerada suficiente para descrever a resposta dinâmica da estrutura.

A Figura 6.2 apresenta um exemplo de um conjunto de séries temporais obtidas para as direções de medição transversal ao eixo da ponte (Y) e vertical (Z).

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos com a aplicação do software ARTEMIS, recorrendo ao método “Enhanced Frequency Domain Decomposition” [2], o qual se baseia na decomposição em valores singulares dos espectros de potência derivados dos sinais medidos, permitindo a identificação das frequências naturais, dos modos de vibração e dos coeficientes de amortecimento da estrutura [33].

Na Figura 6.3 e Figura 6.4 apresentam-se exemplos de espectros de potência médios obtidos, respetivamente, nas direções transversal (Y) e vertical (Z), acompanhados por mapas de cores do conteúdo espectral medido, que permitem identificar as gamas de frequência predominantes na resposta dinâmica da ponte. A análise destas figuras evidencia a existência de um número reduzido de modos de vibração com componentes transversais ao eixo da ponte, tendo sido identificados apenas dois modos, com frequências naturais aproximadas de 3,7 Hz e 4,5 Hz. Embora estes modos sejam visíveis nos espectros de potência, não foi possível determinar as respetivas configurações modais, possivelmente devido ao elevado nível de amortecimento associado.

Na direção vertical, observa-se claramente a presença de um número significativamente superior de modos de vibração. A Figura 6.5 apresenta os valores singulares dos espectros de potência correspondentes ao conjunto total das medições efetuadas, enquanto na Figura 6.6 se indicam as frequências naturais identificadas.

A listagem integral dos modos identificados encontra-se no Capítulo 7.

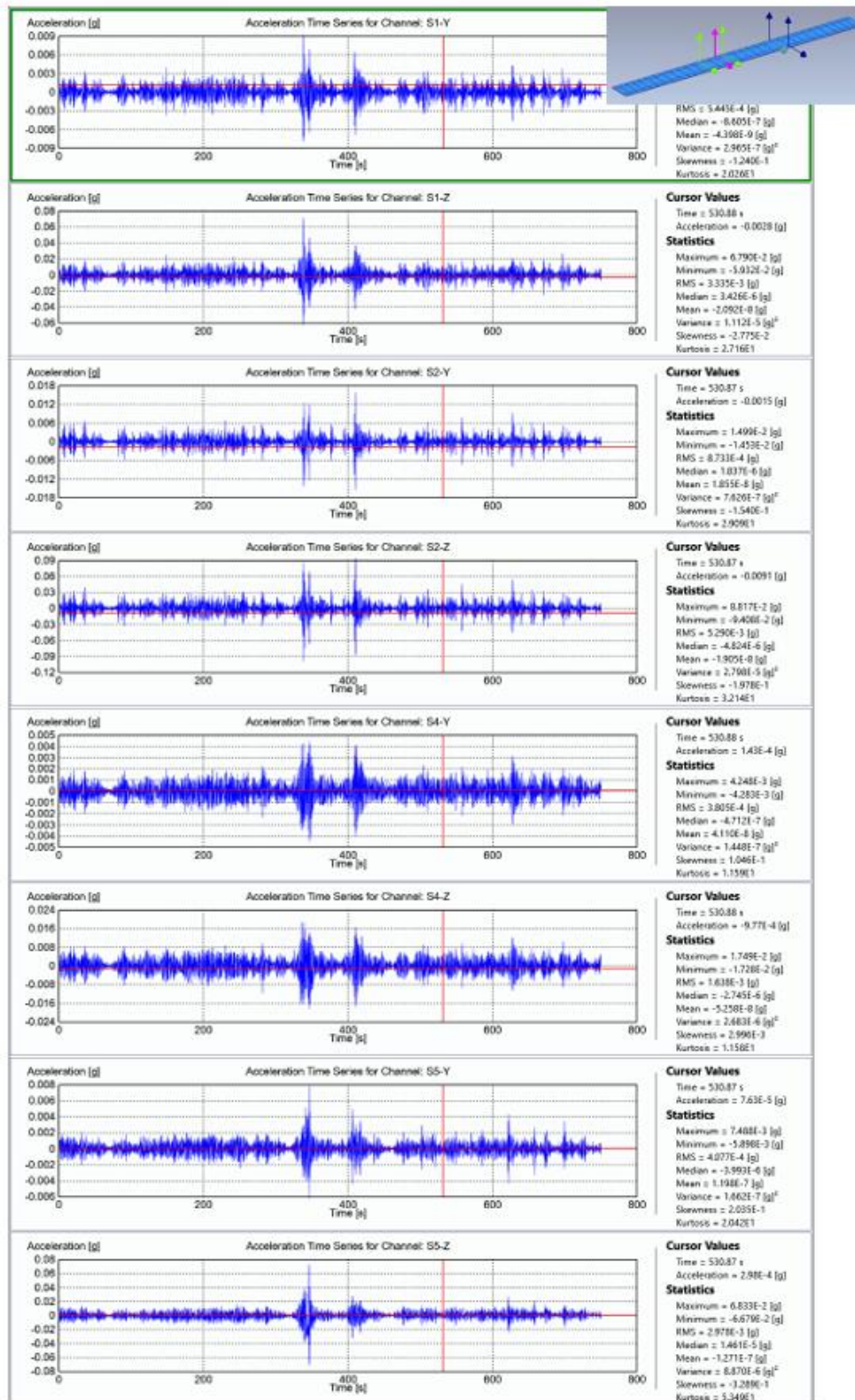


Figura 6.2 - Exemplo de séries temporais colhidas: medições nas secções 11C, 12A, 18A, 19A, 21A, direções Y e Z

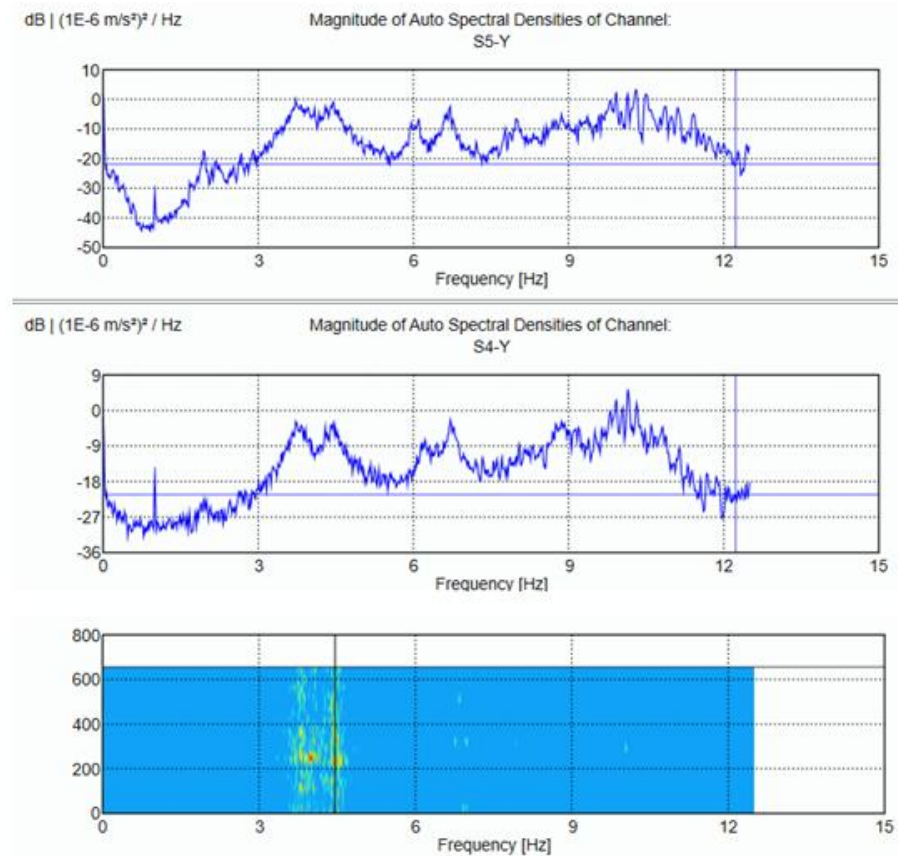


Figura 6.3 - Funções densidade espectral de potência média na secção de referência 12A, na direção transversal (cima) e na secção 21A, na direção transversal (meio). Mapa de cores das transformadas de Fourier na direção transversal (baixo).

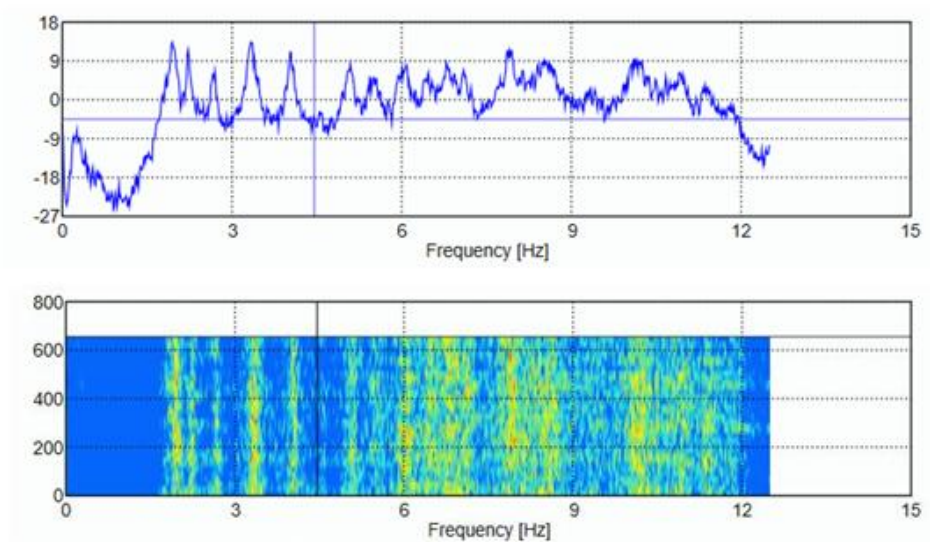


Figura 6.4 - Função densidade espectral de potência na secção 12B, na direção vertical (cima). Mapa de cores das transformadas de Fourier na direção vertical (baixo).

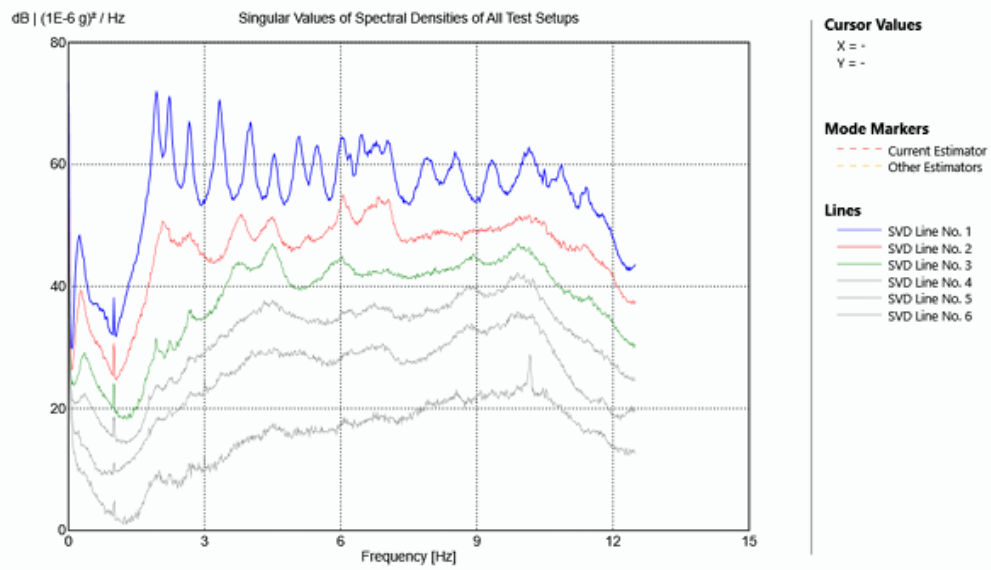


Figura 6.5 - Valores singulares dos espectros de potência

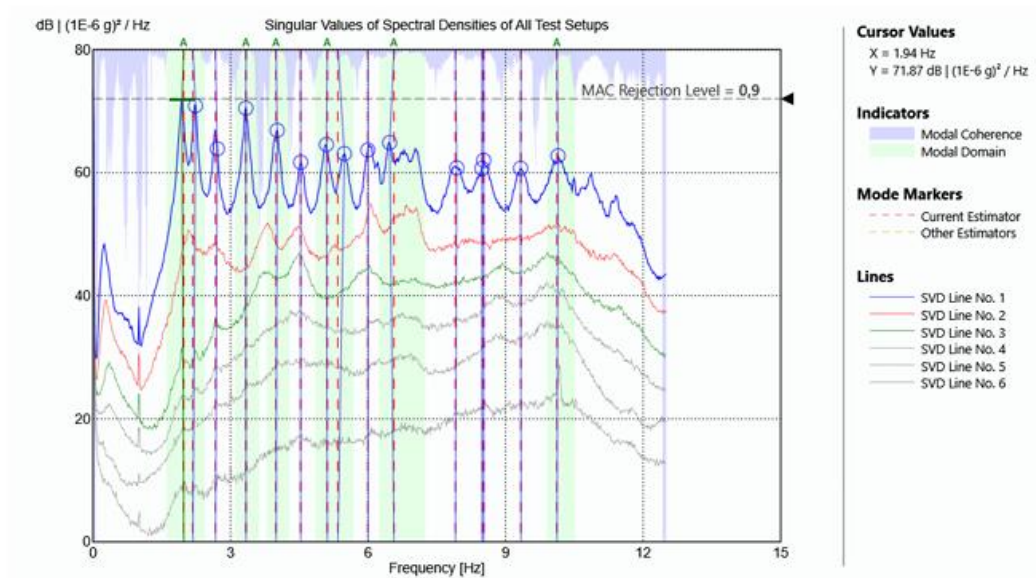


Figura 6.6 - Frequências naturais identificadas a partir da decomposição em valores singulares dos espectros de potência medidos

6.3 ENSAIO DE VIBRAÇÃO AMBIENTAL COM RECURSO A UM SISTEMA CUSTOMIZADO

A malha de pontos considerada neste ensaio corresponde à utilizada no ensaio com o sistema comercial, referida no Capítulo 6.1.

A Figura 6.1 apresenta a distribuição dos sensores utilizados nos quatro setups de aquisição durante o ensaio de vibração ambiental. O objetivo desta configuração foi garantir uma cobertura espacial completa da estrutura ensaiada, mantendo a coerência entre medições sucessivas através da utilização de sensores de referência fixos.

Em cada setup foram utilizados 36 sensores ativos, identificados na tabela pelos números de 1 a 36, enquanto os sensores 37 e 38 foram reservados como unidades de contingência, destinadas a substituir qualquer sensor que apresentasse anomalia ou mau funcionamento durante o processo experimental (ver Anexo A1).



Figura 6.7 - Preparação e sincronização dos sensores antes do ensaio de vibração ambiental.

As posições de referência, que permaneceram fixas ao longo de todos os setups, correspondem aos pontos 11A, 11D, 12A e 12D. Esses sensores de referência são essenciais para o processo de reconciliação modal, permitindo a correlação entre os diferentes conjuntos de medições e garantindo a consistência global dos dados obtidos (Ver Figura 6.7).

Cada setup teve duração de aproximadamente 30 minutos, período durante o qual foram adquiridos os sinais de resposta dinâmica sob excitação ambiental. Entre cada mudança de setup, foi reservado um intervalo de 10 minutos destinado à realocação dos sensores móveis, garantindo o correto posicionamento e a verificação da integridade dos canais de medição antes do início de uma nova aquisição.

6.3.1 Identificação de Parâmetros Modais

Nesta secção é descrito o procedimento utilizado para a identificação dos parâmetros modais do sistema, nomeadamente as frequências naturais e modos de vibração, os coeficientes de amortecimento não foram identificados através desta metodologia. O processo foi realizado em MATLAB através de três ficheiros principais: “Importar Arquivos”, “ANPSD” e “Peak Picking”.

6.3.1.1 Importação e tratamento inicial dos dados

O ficheiro “Importar Arquivos” foi desenvolvido com o propósito de automatizar a leitura, filtragem e organização dos dados experimentais obtidos nos ensaios de vibração. O código inicia-se com a criação de variáveis vazias destinadas ao armazenamento das respostas em cada configuração de ensaio (setup 1 a setup 4), separando os registos segundo as direcções de medição x e z. Em seguida, é verificada a existência da pasta principal que contém os ficheiros experimentais, e, caso esta seja identificada, o programa percorre o seu conteúdo para determinar o número de ficheiros disponíveis.

Durante o ciclo de importação, cada ficheiro é carregado individualmente e o seu nome é analisado para identificar a que configuração experimental pertence, através da extração do caractere correspondente ao número do setup. Os dados são então armazenados nas variáveis adequadas, distinguindo as direcções x e z, e submetidos a um processo de filtragem digital com coeficientes previamente definidos (B e A), de modo a eliminar componentes de ruído e interferências não representativas do comportamento estrutural.

Após o carregamento e filtragem de todos os ficheiros, o script executa ainda correções pontuais em determinados canais e intervalos temporais, substituindo os valores afetados por ruído ou saturação por zeros. Essas correções visam garantir a integridade e a coerência dos dados antes da análise espectral, assegurando que apenas as respostas válidas do sistema sejam consideradas nas etapas subsequentes de identificação modal.

6.3.1.2 Resultados da densidade espectral de potência média normalizada (ANPSD)

O ficheiro “ANPSD” tem como objetivo calcular e representar a densidade espectral de potência média normalizada (ANPSD) das respostas obtidas nos ensaios de vibração. Este cálculo constitui uma etapa essencial da análise modal experimental, pois permite identificar as frequências naturais do sistema através da observação dos picos de energia distribuídos no domínio da frequência.

Inicialmente, o código, utiliza a função `pwelch` para estimar a densidade espectral de potência (PSD) das respostas em cada direção e para cada configuração experimental (setup 1 a setup 4). O método de Welch foi escolhido por proporcionar uma estimativa estável e de baixa variância, obtida através da divisão dos sinais em segmentos sobrepostos, aplicação de uma janela e posterior média das transformadas de Fourier desses segmentos. No presente caso, foram considerados 8192 pontos por segmento, com 50% de sobreposição (4097 pontos) e uma frequência de amostragem de 62,5 Hz, valores que garantem uma boa resolução em frequência e uma adequada suavização do espectro.

Após o cálculo das densidades espectrais, o script procede à normalização de cada espectro, dividindo os valores da PSD de cada canal pela soma total do respetivo espectro. Este procedimento resulta na densidade espectral de potência normalizada (NPSD), que permite comparar diferentes medições independentemente da amplitude absoluta dos sinais. Em seguida, são calculadas as médias dos espectros normalizados de todos os canais e configurações consideradas, obtendo-se assim a Average Normalized Power Spectral Density (ANPSD) para as direções x (lateral) e z (vertical). Essa média representa o comportamento global da estrutura, filtrando irregularidades locais e destacando as frequências predominantes associadas aos modos de vibração.

Por fim, o ficheiro gera a representação gráfica semilogarítmica (semilogy) dos resultados, onde as curvas da ANPSD são traçadas em função da frequência. O gráfico apresenta as respostas laterais e verticais na mesma escala representados na Figura 6.8, facilitando a identificação dos picos correspondentes às frequências naturais. O intervalo de análise é limitado entre 1,5 Hz e 7,5 Hz, faixa onde se concentram os modos principais do sistema. Esta etapa constitui a base para o processo de Peak Picking, utilizado posteriormente para a determinação quantitativa dos parâmetros modais.

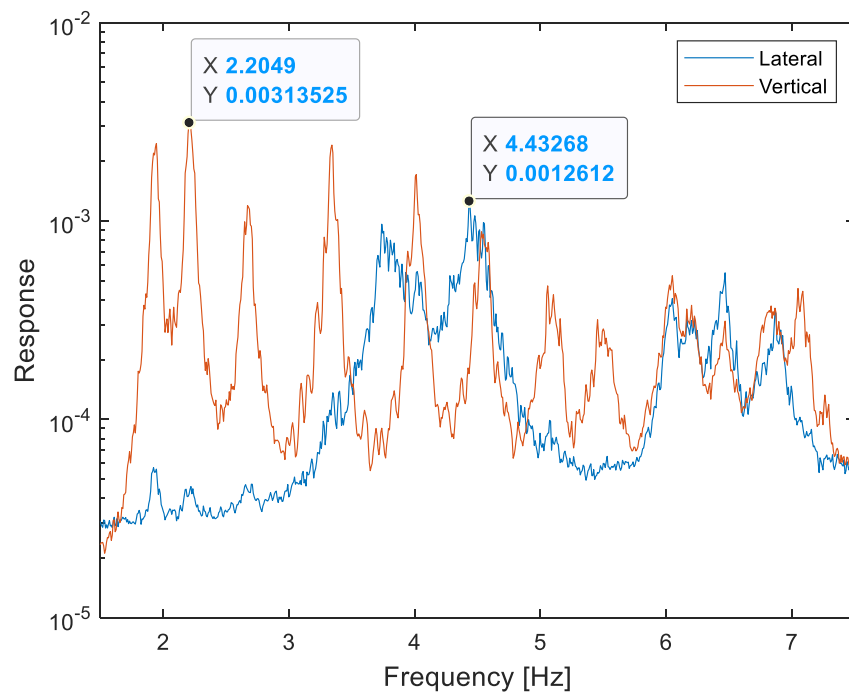


Figura 6.8 - Identificação das frequências naturais a partir dos espectros de resposta

6.3.1.3 Identificação modal pelo método da seleção de picos (Peak-Picking)

No presente estudo, a identificação dos modos de vibração foi organizada em duas categorias distintas: modos laterais e modos verticais.

Os modos laterais correspondem a deslocamentos predominantes na direção horizontal, estando associados à resposta estrutural face a ações transversais, como vento ou sismo. Já os modos verticais caracterizam-se por movimentos dominantes na direção vertical, relacionados sobretudo com a rigidez à flexão dos elementos estruturais e com a distribuição de massas.

Esta classificação permitiu uma interpretação mais clara do comportamento dinâmico da estrutura e uma análise mais sistematizada dos resultados obtidos.

6.3.1.4 Identificação dos modos laterais pelo método de Peak-Picking

O ficheiro “Peak-Picking x” tem como objetivo identificar e representar os modos de vibração predominantes na direção lateral (x) da estrutura, a partir dos dados experimentais processados nas etapas anteriores.

Inicialmente, o script calcula as funções espectrais cruzadas (CSD) entre os sinais medidos nas direções vertical e lateral para cada par de sensores e configurações experimentais. Este cálculo é realizado por meio da função cpsd, que permite obter a densidade espectral cruzada de potência entre pares de sinais. Os resultados são organizados em matrizes tridimensionais correspondentes a cada setup de medição.

Após esta etapa, é aplicada a técnica de Peak-Picking, que consiste em identificar as amplitudes máximas de resposta associadas às frequências naturais previamente determinadas a partir da análise espectral média (ANPSD). Para cada frequência de interesse, o algoritmo seleciona os valores máximos e mínimos do espectro e escolhe aquele com maior módulo, assegurando a correta captura do comportamento modal.

Em seguida, os valores obtidos são normalizados relativamente a um ponto de referência (sensor 4), permitindo a comparação direta entre modos. Essa normalização é fundamental para a determinação das formas modais relativas, que descrevem o padrão espacial de vibração da estrutura.

O script também realiza a ponderação e correção de fase entre os diferentes setups experimentais, garantindo coerência entre as medições e alinhando as respostas de fase por meio de fatores de correção (cz2, cz3 e cz4). Essa etapa assegura que todas as medições sejam referenciadas ao mesmo sistema de coordenadas.

Posteriormente, as matrizes corrigidas são reorganizadas de forma a facilitar a representação gráfica das formas modais. Para isso, os deslocamentos normalizados são associados às posições físicas dos sensores ao longo da estrutura (definidas pelos vetores *posicao*x e *posicao*y).

Por fim, são gerados gráficos bidimensionais (plot) que ilustram a deformada correspondente a cada frequência modal identificada, permitindo visualizar qualitativamente os modos de vibração lateral da estrutura. Esses resultados servem de base para a comparação com modelos numéricos e para a identificação de modos experimentais dominantes.

A listagem integral dos modos identificados encontra-se no Capítulo 8.

6.3.1.5 Identificação dos modos verticais e torsionais pelo método de Peak-Picking

O ficheiro “Peak-Picking z” tem função análoga ao anterior, mas direciona-se à identificação dos modos de vibração verticais e torsionais da estrutura, com base nas medições experimentais na direção z.

A primeira etapa consiste na construção das funções espectrais cruzadas (CSD) entre todos os pares de sensores verticais, utilizando novamente a função *cpsd*. O código é otimizado para evitar cálculos redundantes (reutilizando os resultados simétricos das matrizes), o que reduz o tempo computacional.

Com base nas frequências naturais previamente determinadas (armazenadas no vetor *fANPSD*), o script executa o procedimento de Peak-Picking, identificando as amplitudes máximas associadas a cada frequência de interesse. Os valores são extraídos para cada sensor e setup, e os sinais normalizados em relação a um ponto de referência comum.

Em seguida, realiza-se a ponderação e normalização modal, obtendo as amplitudes relativas (*ppze*) e os sinais de fase (*phize*). A correção de fase entre os diferentes setups é novamente aplicada através de fatores de ajuste (cz2, cz3 e cz4), garantindo a coerência entre as medições.

Os resultados corrigidos são agrupados nas matrizes LAz, LBz, LCz e LDz, que representam as amplitudes modais correspondentes a diferentes posições transversais na estrutura. Essa organização permite reconstruir espacialmente as formas modais verticais e torsionais.

Para cada frequência identificada, o script gera superfícies tridimensionais (surf) que representam a deformada modal da estrutura, em função das coordenadas espaciais posicao_x (comprimento) e posicao_y (largura). Os gráficos são legendados automaticamente, distinguindo entre modos verticais (para frequências mais baixas) e modos de torção (para as frequências mais elevadas).

O resultado do Peak-Picking z.m consiste, portanto, na reconstrução visual e quantitativa das formas modais experimentais em vibração vertical e torsional, permitindo comparar os modos identificados com resultados numéricos ou analíticos e validando o comportamento dinâmico global da estrutura ensaiada.

A listagem integral dos modos identificados encontra-se no Capítulo 7.

7

ANALISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DOS DOIS SISTEMAS UTILIZADOS

7.1 IDENTIFICAÇÃO DE FREQUÊNCIAS E MODOS DE VIBRAÇÃO

A análise comparativa entre os dois sistemas avaliados concentrou-se na identificação das frequências naturais e dos modos de vibração obtidos a partir dos ensaios experimentais. Para o tratamento dos dados e extração dos gráficos, utilizou-se o software ARTEMIS utilizando o método de Decomposição no Domínio da Frequência Melhorada (EFDD) no caso do sistema comercial, enquanto o processamento do sistema customizado foi realizado utilizando o método Peak-Picking usando sub-rotinas em MATLAB. A interpretação dos gráficos e tabelas gerados permitiu verificar uma grande proximidade de resultados em termos de caracterização dinâmica da estrutura. No entanto, refira-se desde já que as diferenças observadas estão relacionadas com os métodos de identificação distintos utilizados, assim como nas diferentes taxas de aquisição de dados, e não na qualidade dos sinais obtidos com o sistema customizado. Nos subcapítulos seguintes, apresentam-se detalhadamente os modos verticais, transversais e de torção identificados ao longo da análise.

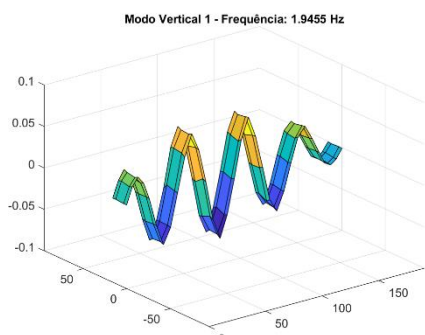


Figura 7.1 – 1ª Forma modal vertical (MATLAB)

$F_1=1,977 \text{ Hz}$; $\xi_1=2,08\%$

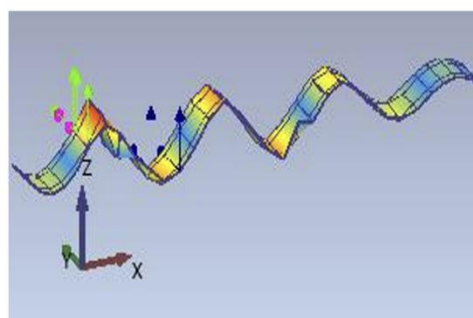


Figura 7.2 - 1ª Forma modal vertical (ARTEMIS)

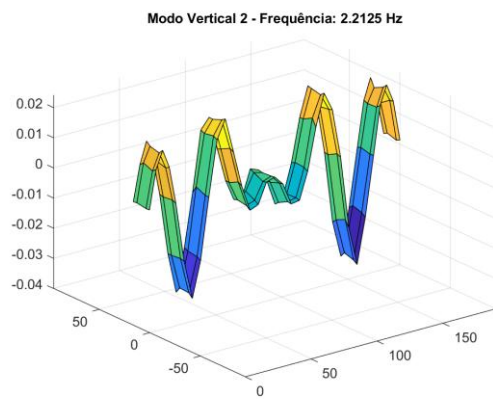


Figura 7.3 - 2ª Forma modal vertical (MATLAB)

$F_2=2,176 \text{ Hz}; \xi_2=1,46\%$

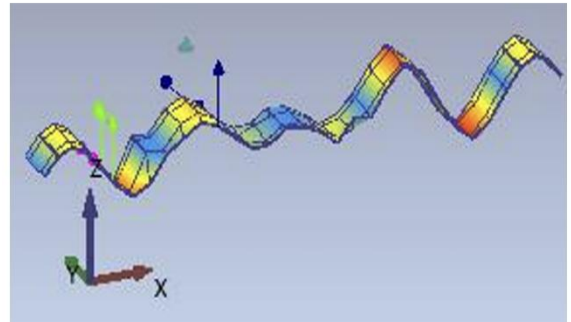


Figura 7.4 - 2ª Forma modal vertical (ARTEMIS)

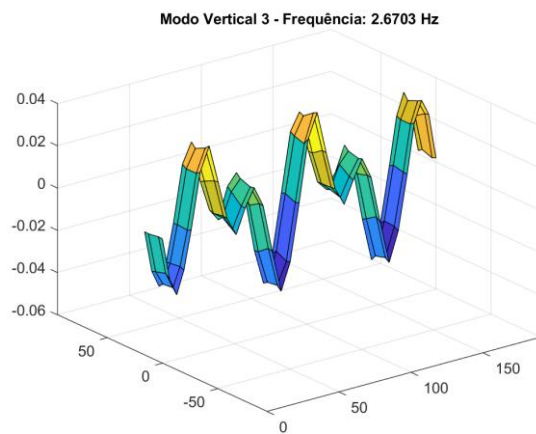


Figura 7.5 - 3ª Forma modal vertical (MATLAB)

$F_3=2,668 \text{ Hz}; \xi_3=1,50\%$

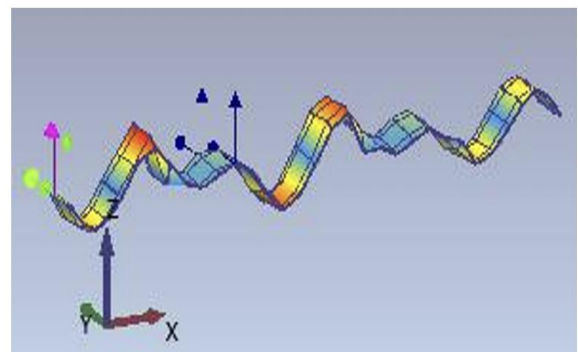


Figura 7.6 - 3ª Forma modal vertical (ARTEMIS)

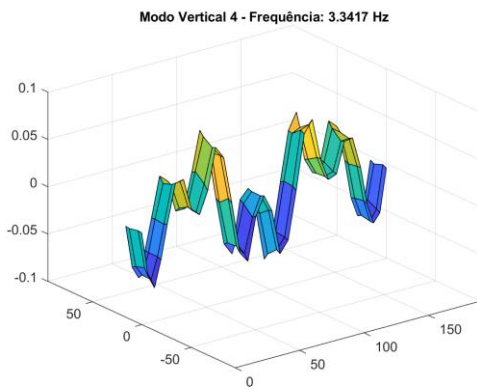


Figura 7.7 - 4ª Forma modal vertical (MATLAB)

$F_4=3,337 \text{ Hz}; \xi_4=1,16\%$

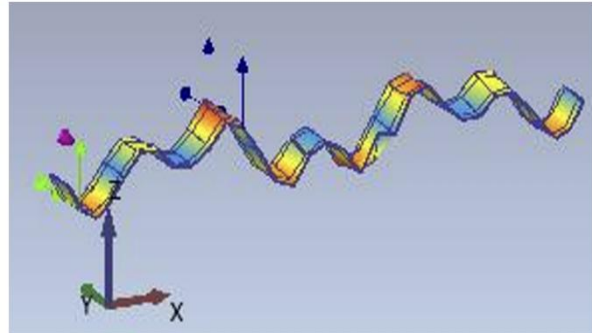


Figura 7.8 - 4ª Forma modal vertical (ARTEMIS)

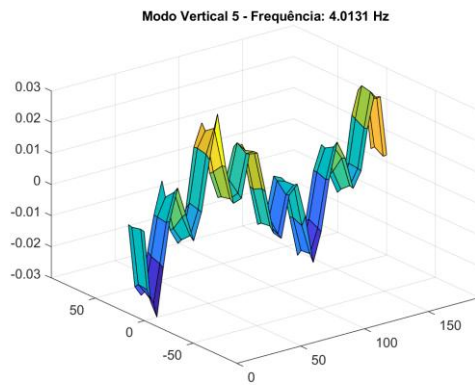


Figura 7.9 - 5ª Forma modal vertical (MATLAB)

$F_5=3,992 \text{ Hz}; \xi_5=1,16\%$

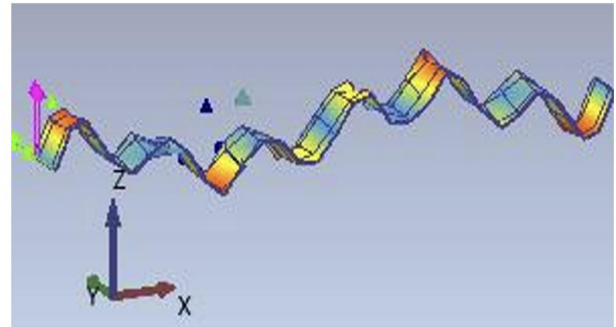


Figura 7.10 - 5ª Forma modal vertical (ARTEMIS)

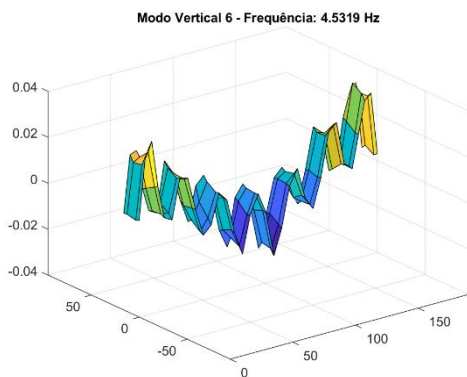


Figura 7.11 - 6ª Forma modal vertical (MATLAB)

$F_6=4.529 \text{ Hz};$

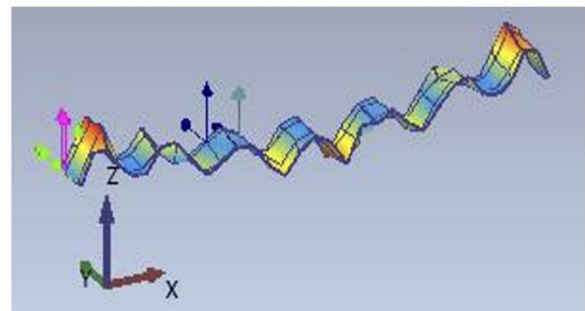


Figura 7.12 - 6ª Forma modal vertical (ARTEMIS)

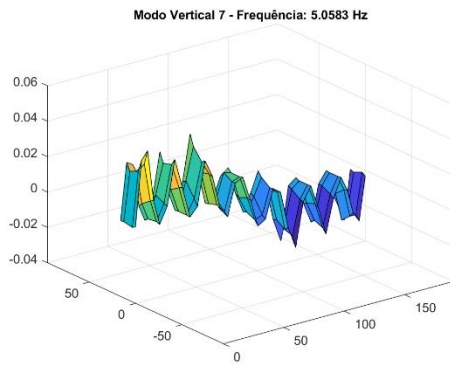


Figura 7.13 - 7ª Forma modal vertical (MATLAB)

$F_9=5,109$ Hz; $\xi_9=1,58\%$

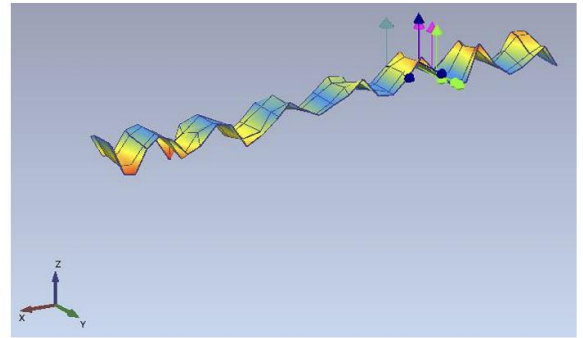


Figura 7.14 - 7ª Forma modal vertical (ARTEMIS)

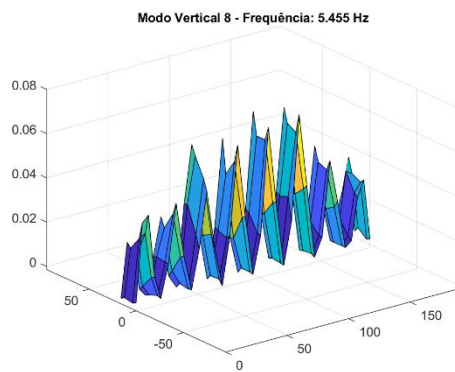


Figura 7.15 - 8ª Forma modal torsional (MATLAB)

$F_{10}=5,341$ Hz; $\xi_{10}=1,46\%$

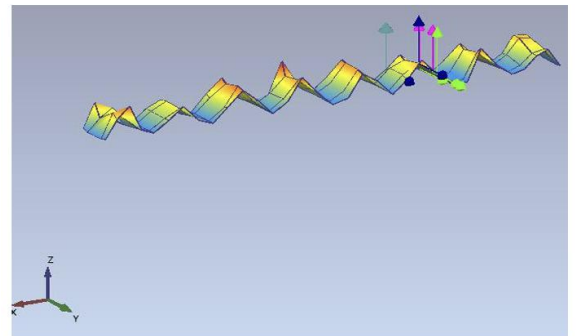


Figura 7.16 - 8ª Forma modal torsional (ARTEMIS)

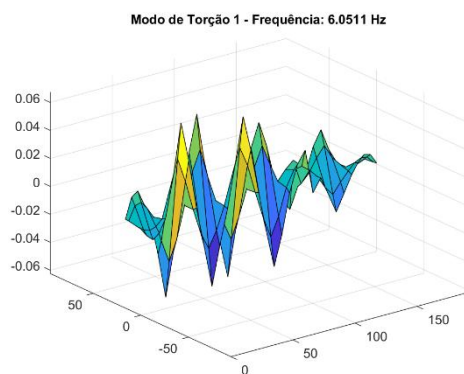


Figura 7.17 - 9ª Forma modal torsional (MATLAB)

$F_{11}=5,994$ Hz

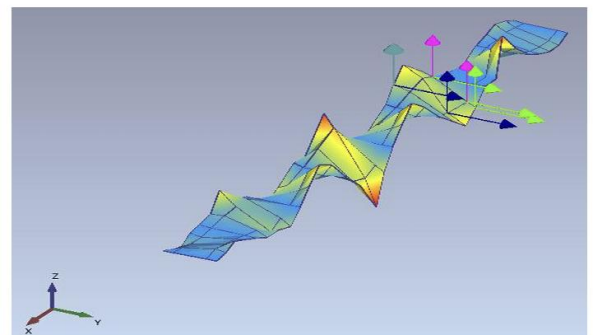


Figura 7.18 - 9ª Forma modal torsional (ARTEMIS)

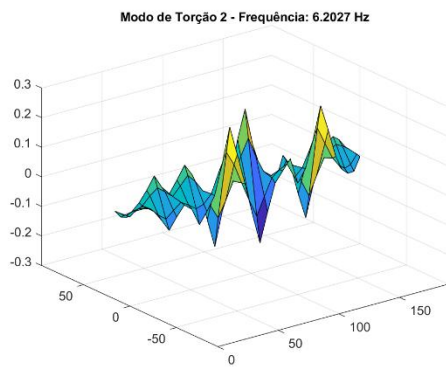


Figura 7.19 - 10ª Forma modal torsional (MATLAB)

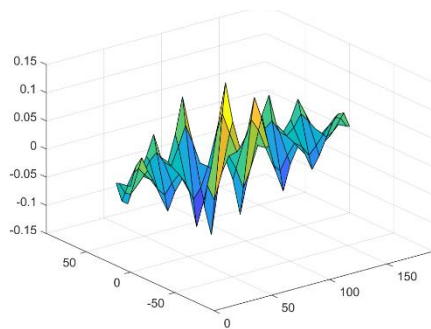


Figura 7.22 - 11ª Forma modal torsional (MATLAB)

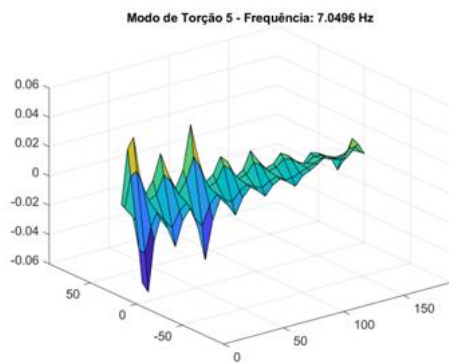


Figura 7.24 - 12ª Forma modal torsional (MATLAB)

$F_{12}=6,213 \text{ Hz}$

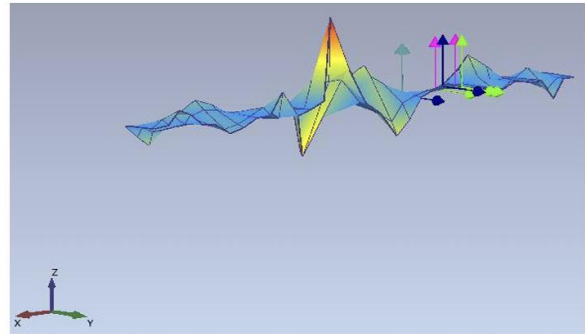


Figura 7.20 - 10ª Forma modal torsional (ARTEMIS)

$F_{13}=6.546\text{Hz}; \xi_{13}=1,16\%$

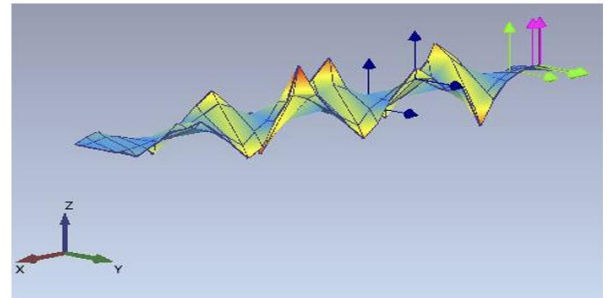


Figura 7.21 - 11ª Forma modal torsional (ARTEMIS)

$F_{14}=7.031\text{Hz}$

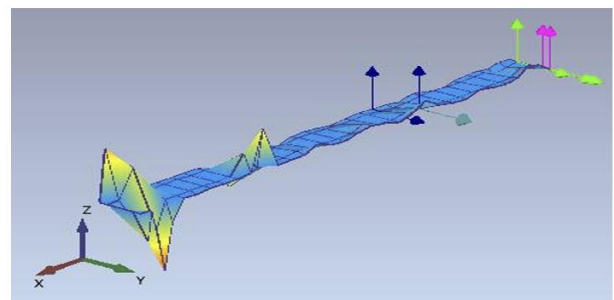


Figura 7.23 - 12ª Forma modal torsional (ARTEMIS)

Tabela 7.1 - Comparação das Frequências Naturais e Características Modais Obtidas por Ensaio Customizado e Ensaio Comercial

Modo	Ensaio customizado Freq.(Hz)	Ensaio comercial Freq. (Hz)	Diferenças	Características
1	1,945	1,977	1,59 %	1ª Flexão vertical
2	2,212	2,176	1,68 %	2ª Flexão vertical
3	2,670	2,668	0,09 %	3ª Flexão vertical
4	3,341	3,337	0,14 %	4ª Flexão vertical
5	4,013	3,992	0,53 %	5ª Flexão vertical
6	4,531	4,529	0,06 %	6ª Flexão vertical
7	5,058	5,109	0,99 %	7ª Flexão vertical
8	5,455	5,341	2,13 %	8ª Flexão vertical
9	6,051	5,994	0,95 %	1ª Torção
10	6,202	6,213	0,17 %	2ª Torção
11	6,469	6,546	1,17 %	Flexão + Torção
12	7,049	7,031	0,26 %	Torção
13	-	3,7	-	1ª Transversal
14	-	4,5	-	2ª Transversal

A comparação entre as frequências naturais obtidas por meio do Ensaio Customizado e do Ensaio Comercial evidencia uma elevada concordância entre os métodos (representada na Tabela 7.1).

Tabela 7.2 - Critério qualitativo

%	Qualidade
$\leq 2 \%$	Excelente concordância
2–5 %	Muito boa concordância
5–10 %	Boa concordância
$> 10 \%$	Concordância reduzida

As diferenças percentuais entre as frequências naturais obtidas através do sistema customizado e do sistema comercial foram inferiores a 2,2 % para todos os modos identificados em ambos os ensaios. Estes resultados evidenciam uma excelente concordância entre os dois sistemas (ver Tabela 7.2), confirmando a capacidade do sistema desenvolvido para reproduzir com elevada precisão as frequências naturais medidas pelo equipamento comercial de referência.

Nos modos de flexão vertical (Modos 1 a 8), as diferenças entre os métodos mantêm-se em níveis bastante baixos, predominantemente inferiores a 0,05 Hz, com exceção do Modo 8. Esse comportamento indica que ambos os ensaios possuem sensibilidade semelhante para a identificação dos modos flexionais, garantindo boa reprodutibilidade dos resultados.

Para os modos de torção (Modos 9, 10 e 12), as divergências permanecem igualmente reduzidas, evidenciando compatibilidade entre as metodologias na detecção das frequências torsionais. O Modo 11, caracterizado por resposta combinada de flexão e torção, também apresenta diferença pouco significativa, reforçando a robustez do ensaio customizado na identificação de modos mistos.

Observa-se, entretanto, que os modos transversais (Modos 13 e 14) foram identificados apenas no ensaio com sensores comerciais. A ausência desses modos no ensaio com sensores customizados sugere uma possível limitação destes equipamentos em direções muito rígidas da estrutura, motivada quer pelo mais elevado nível de ruído destes sensores quer pela menor sensibilidade à vibrações.

Todavia, de modo geral os resultados demonstram que o Ensaio com sensores Customizado apresenta desempenho satisfatório e alinhado ao Ensaio Comercial para a maioria dos modos analisados, especialmente aqueles associados às respostas de flexão e torção. A principal divergência refere-se à não identificação dos modos transversais, aspeto que merece investigação adicional quanto às condições experimentais e ao sistema de aquisição utilizado.

7.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS DE CADA SISTEMA

A análise comparativa entre o Ensaio com sensores Customizado e o Ensaio com sensores Comercial permite identificar características distintas quanto à eficiência, sensibilidade, flexibilidade e tempo de execução de cada metodologia. Os resultados obtidos evidenciam vantagens específicas e limitações inerentes a cada sistema, que são detalhadas a seguir.

7.2.1 Síntese comparativa

Em síntese, os resultados demonstram que ambos os sistemas apresentam desempenhos complementares. O Ensaio Customizado destaca-se pela flexibilidade e baixo custo, embora exija maior intervenção manual e apresente limitações na deteção dos modos transversais. Já o Ensaio Comercial oferece elevada precisão e deteção abrangente de modos, porém com custo mais elevado e tempo total de aquisição mais extenso, apesar da automatização dos procedimentos.

A escolha entre os sistemas deve considerar o equilíbrio entre exigências técnicas, disponibilidade de recursos e objetivos específicos do estudo modal, reconhecendo que cada abordagem oferece benefícios particulares conforme o contexto de aplicação.

A Tabela 7.3 compara o sistema customizado proposto com um sistema comercial de monitorização. O sistema customizado destaca-se pela utilização de um maior número de sensores (36 contra 6) e referências (4 contra 2), proporcionando uma densidade de medição mais elevada e uma cobertura espacial mais abrangente. Apesar de cada ciclo de medição ser mais demorado (40 min face a 15 min), a campanha completa é concluída em aproximadamente 2 h 30 min, enquanto o sistema comercial necessita de cerca de 7 h 9 min devido ao maior número de setups requeridos (33 contra 4).

Além disso, o sistema customizado apresenta elevada autonomia, menor peso dos sensores (< 1 kg), melhor comodidade de transporte e menor custo de aquisição. Em contrapartida, o sistema comercial oferece maior sensibilidade e menor nível de ruído, embora implique maior custo, menor autonomia e uma logística de transporte menos favorável. De forma geral, o sistema customizado revela-se mais eficiente para campanhas de monitorização extensas e em diferentes tipos de estruturas, enquanto o sistema comercial é mais indicado para aplicações que exigem elevada sensibilidade, especialmente em estruturas esbeltas.

Tabela 7.3 - Comparação entre os sistemas customizado e comercial

Critério	Sistema customizado	Sistema comercial
Nº de sensores por setup	36	6
Nº de referências	4	2
Densidade de medição	Elevada – maior cobertura espacial por setup	Reduzida – cobertura segmentada
Duração por setup	30 min + 10 min de pausa (40 min/ciclo)	13 min + 2 min de pausa (15 min/ciclo)
Tempo total aproximado da campanha	2 h 30 min	7 h 9 min
Autonomia dos sensores	Muito elevada	Reduzida (cerca de 8 horas) Obriga a carregamento
Nº total de setups	4	33
Complexidade logística	Elevada (maior número de sensores)	Reduzida (instrumentação simplificada)
Peso de cada sensor	< 1 Kg	10 Kg
Comodidade de transporte	Muito boa	Má (cada caixa pesa 25 Kg- 2 sensor)
Programação no local	Não	Pode ser necessária
Custo dos sensores	Baixo	Elevado
Sensibilidade	Suficiente	Muito boa
Nível de ruído	baixo	muito baixo
Tipo de estrutura	Todas	Estruturas esbeltas

7.2.2 Ensaio com sensores customizados

7.2.2.1 Vantagens

O ensaio recorrendo a sistema customizados apresenta um conjunto de vantagens descritos nos seguintes pontos:

- Maior rapidez do ensaio, devido ao facto de se terem utilizados 36 sensores em aquisição simultânea, quando no ensaio com sismógrafos comerciais apenas se utilizaram 6 unidades. Esta diferença é tanto mais considerável dado que foram utilizados várias referências fixas, sendo que no ensaio com sismógrafos apenas 4 secções foram medidas em cada setup;
- Maior autonomia dos sensores, que apenas necessitam de uma bateria de lítio de reduzida dimensão para funcionarem em contínuo durante vários dias;
- Flexibilidade experimental, possibilitando ajustes específicos no posicionamento dos sensores, na forma de excitação e nos parâmetros de aquisição. Essa adaptabilidade torna o sistema particularmente eficaz na identificação de modos de flexão e torção, que apresentaram elevada concordância com aqueles obtidos pelo sistema comercial.
- Outro ponto favorável é o custo significativamente reduzido. Por se tratar de um sistema desenvolvido em laboratório, sua operação não depende de equipamentos proprietários ou softwares de elevado valor comercial, o que o torna especialmente atrativo em ambientes académicos ou em estudos preliminares de desenvolvimento metodológico.

7.2.2.2 Desvantagens

Apesar das vantagens, o sistema customizado apresenta algumas limitações importantes, listadas a seguir:

- Observou-se uma sensibilidade reduzida para a identificação de modos transversais muito rígidos, que não foram capturados durante os ensaios. Essa limitação pode estar associada tanto ao arranjo instrumental quanto ao método de excitação empregado.

- Além disso, o processo experimental exige uma maior intervenção manual, tanto na calibragem quanto na recolocação dos sensores. De facto, foram necessários 4 setups, cada um com 30 minutos de duração, além de 10 minutos adicionais entre eles para reposicionamento dos sensores, resultando em um tempo total de aproximadamente 2 horas e 30 minutos. Esse tempo inclui ajustes experimentais importantes para garantir a qualidade das medições, mas compromete a eficiência operacional em campanhas de ensaios extensas.

7.2.3 Ensaio comercial

7.2.3.1 *Vantagens*

O ensaio recorrendo a sistema comercial apresenta um conjunto de vantagens descritos nos seguintes pontos:

- O Ensaio Comercial destaca-se pela elevada precisão e confiabilidade, decorrentes do uso de sensores de alta sensibilidade, sistemas de aquisição robustos e algoritmos otimizados para identificação modal. Essa estrutura permite a detecção de uma gama mais ampla de modos, incluindo os modos transversais, que não foram observados no sistema customizado.
- A facilidade de operação constitui outra vantagem relevante. O sistema comercial apresenta interfaces intuitivas e procedimentos padronizados, reduzindo a dependência de ajustes manuais e minimizando a possibilidade de erros operacionais.

7.2.3.2 *Desvantagens*

No entanto, o sistema comercial apresenta algumas limitações importantes, listadas a seguir:

- A principal é o custo elevado associado à aquisição e manutenção dos equipamentos e licenças de software, o que pode restringir seu uso em instituições com recursos limitados.
- Outro aspeto relevante refere-se ao tempo total de ensaio, que, apesar de setups curtos e automatizados, se torna elevado devido à grande quantidade de configurações exigidas para cobrir a malha completa de pontos instrumentados.

- Relativamente ao ensaio comercial, foram realizados 33 setups, cada um com 13 minutos de duração efetiva, o que corresponde a um tempo total de ensaio de 429 minutos, ou seja, aproximadamente 7 h e 9 minutos de medição contínua. Considerando ainda as pausas de 2 minutos entre setups para transição e reposicionamento, o tempo global de campanha experimental é ligeiramente superior, evidenciando uma estratégia baseada em múltiplas aquisições de curta duração.

Embora o processo seja altamente padronizado e dependa pouco de ajustes manuais, o tempo total de aquisição é significativamente superior ao observado no sistema customizado.

8

CONCLUSÕES

8.1 INTRODUÇÃO

Os ensaios de vibração ambiental constituem uma ferramenta essencial na caracterização do comportamento dinâmico de estruturas, permitindo a identificação das suas propriedades modais, nomeadamente frequências naturais, formas modais e coeficientes de amortecimento, sem recurso a excitação artificial. Estes ensaios baseiam-se exclusivamente na resposta estrutural a ações ambientais de baixa intensidade, tais como o vento, o tráfego ou outras perturbações operacionais, possibilitando a avaliação do desempenho estrutural em condições reais de funcionamento.

No caso particular de pontes e estruturas esbeltas, a importância destes ensaios torna-se ainda mais evidente. Devido à sua reduzida rigidez e massa relativamente baixa, estas estruturas são particularmente sensíveis a ações dinâmicas, sendo suscetíveis à ocorrência de fenómenos vibratórios que podem comprometer não só o conforto dos utilizadores, mas também a sua segurança e durabilidade. Assim, a correta identificação das propriedades dinâmicas assume um papel determinante no âmbito do projeto, avaliação e monitorização estrutural.

Neste contexto, a presente tese tem como objetivo principal a avaliação do desempenho de dois sistemas distintos de ensaio de vibração ambiental: um sistema customizado, desenvolvido com enfoque na flexibilidade e eficiência operacional, e um sistema comercial, amplamente validado e utilizado na prática profissional. Pretende-se, assim, proceder a uma análise comparativa entre ambas as abordagens, avaliando a sua capacidade de identificação modal, bem como as respetivas vantagens, limitações e domínios de aplicabilidade.

8.2 SÍNTESE DE RESULTADOS E CONCLUSÕES

A análise dos resultados obtidos no decurso deste trabalho permite concluir que os dois sistemas de ensaio de vibração ambiental apresentam desempenhos diferenciados, embora complementares, no âmbito da identificação das propriedades dinâmicas de estruturas esbeltas.

O sistema customizado evidencia-se como uma solução versátil e economicamente competitiva, apresentando elevada adaptabilidade a diferentes condições experimentais e contextos de aplicação. Adicionalmente, a sua implementação permite, em determinadas circunstâncias, a realização de campanhas experimentais mais céleres, constituindo uma mais-valia relevante em situações onde o tempo disponível para aquisição de dados é limitado. Não obstante, este sistema revela uma maior dependência da intervenção do operador ao longo das várias fases do ensaio, bem como algumas limitações na identificação de modos de vibração mais complexos, em particular no que se refere aos modos transversais.

Por sua vez, o sistema comercial destaca-se pela elevada precisão e robustez na aquisição e processamento de dados, possibilitando uma identificação modal mais abrangente e sistemática. A automatização dos procedimentos contribui significativamente para a consistência e fiabilidade dos resultados obtidos. Contudo, estas vantagens encontram-se associadas a custos de implementação mais elevados e, em certos casos, a períodos de aquisição de dados mais prolongados.

Face ao exposto, a presente tese constitui uma contribuição relevante para a validação do sistema customizado no contexto de ensaios de vibração ambiental aplicados a pontes esbeltas. Os resultados demonstram que este sistema pode representar uma alternativa viável e eficaz, particularmente em situações onde se privilegia a rapidez de execução e a otimização de recursos, sem prejuízo significativo da qualidade dos resultados obtidos.

Em termos gerais, a seleção do sistema mais adequado deverá atender a um compromisso entre os requisitos técnicos da análise, os recursos disponíveis e os objetivos específicos do estudo, reconhecendo-se que cada abordagem apresenta vantagens distintas em função do contexto de aplicação.

8.3 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Com base nas conclusões obtidas e nas limitações identificadas ao longo do presente trabalho, identificam-se diversas linhas de investigação futura que poderão contribuir para o aprofundamento e consolidação dos resultados apresentados.

Em primeiro lugar, propõe-se a realização de uma análise comparativa mais detalhada entre os dois sistemas de ensaio, incidindo especificamente na estimativa dos coeficientes de amortecimento de uma mesma estrutura, de modo a avaliar a consistência, precisão e sensibilidade de cada abordagem relativamente a este parâmetro fundamental.

Adicionalmente, considera-se pertinente o desenvolvimento de estudos direcionados para a avaliação do desempenho de ambos os sistemas na identificação de modos de vibração transversais, com especial enfoque em estruturas esbeltas, onde este tipo de comportamento assume particular relevância.

Sugere-se ainda a introdução de melhorias no sistema customizado, nomeadamente ao nível da automatização dos processos de aquisição e tratamento de dados, com vista à redução da intervenção manual e ao aumento da robustez e reprodutibilidade dos resultados.

Por outro lado, a integração de técnicas avançadas de processamento de sinal e identificação modal, incluindo metodologias baseadas em aprendizagem automática, poderá constituir uma via promissora para a melhoria da deteção de modos de vibração de baixa energia ou de difícil identificação.

Por fim, recomenda-se a aplicação dos sistemas analisados a diferentes tipologias estruturais, tais como passadiços, torres ou edifícios de grande altura, permitindo avaliar a sua versatilidade e desempenho em distintos cenários de engenharia, contribuindo assim para uma validação mais abrangente das metodologias propostas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Carreira A. Transmissão de Vibração e Ruído de baixa Frequência em edifícios de betão armado. 2016;386.
- [2] Caetano E, Cunha A, Magalhães F. Novas perspectivas na análise do comportamento dinâmico de estruturas. 2010;18.
- [3] Crawford R, Ward H. S. Determination of the natural period of buildings, Bulletin of the seismological society of america. 54, 1964.
- [4] MacLamore V. R, Hart G. C, Stubbs I. R. Ambient Vibration of two Suspension Bridges, Journal of the Structural Division, ASCE, 97(ST10), 2567-2582.
- [5] Trifunac M. Comparison between Ambient and Forced Vibration Experiments, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1972, 1, 133-150.
- [6] Abgel-Ghaffar A. M, Housner G. W, Ambient Vibration Tests of Suspension Bridges, Journal of the Engineering Mechanics Division, 1978, ASCE, 104(EM5), 983-999.
- [7] Bendat J, Piersol A, Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis, John Wiley & Sons, USA, 1980.
- [8] Felber A. J, Development of a Hybrid Bridge Evaluation System, PhD Thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1993.
- [9] Felber A. J, Cantieni R, Introduction of a new Ambient Vibration Testing System: Description of the System and Seven Bridges Tests, Relatório Técnico 156'521, EMPA, Dübendorf, Switzerland, 1996.
- [10] Magalhães F, Identificação modal estocástica para validação experimental de modelos numéricos, 2004,
- [11] Lopes V. Identificação Mecânica e Avaliação do Comportamento Sísmico de Chaminés em Alvenaria. Diss Mestr. 2009;
- [12] Minhalma A. Análise Modal de um Edifício de Paredes de Alvenaria Resistente. Diss Mestr. 2015;
- [13] Cunha A, Caetano E, Magalhães F, Moutinho C. Recent perspectives in dynamic testing and monitoring of bridges. 2012;

- [14] NP2074 - Avaliação da influência de vibrações impulsivas em estruturas. Caparica: IPQ; 2015.
- [15] ISO 2631-1: Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration — Part 1: General requirements. ISO; 1997.
- [16] BS 6472-1: Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings - Part 1: Vibration sources other than blasting. BRITISH STANDARD; 2008.
- [17] DIN 4150-2 - Structural vibration - Part 2: Human exposure to vibration in buildings. Technical Committee Schwingungsfragen im Bauwesen; 1992.
- [18] SETRA. Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading. 2006.
- [19] Zhang L, Tamura Y, Yoshida A, Cho K, Nakata S, Naito S. AMBIENT VIBRATION TESTING & MODAL IDENTIFICATION OF AN OFFICE BUILDING. 2002;
- [20] Saidin S, Jamadin A, Kudus S, Amin N, Anuar M. An Overview: The Application of Vibration-Based Techniques in Bridge Structural Health Monitoring. 2022;
- [21] Chang, C. C., Chang, T. Y. P., & Zhang, Q. W. Ambient vibration of long span cable-stayed bridge. 2001;46–53.
- [22] Lemos JHO. MODELAÇÃO NUMÉRICA E CARACTERIZAÇÃO MODAL DA PONTE FERROVIÁRIA DA FERRADOSA. junho de 2016;132.
- [23] Caetano E, Moutinho C. Ensaios de Vibração na Ponte Engenheiro Machado Vaz, Mirandela. Porto: FEUP; 2025 nov p. 24.
- [24] Teensyduino [Internet]. 2025. Disponível em: https://www.pjrc.com/teensy/td_download.html
- [25] Arduino Pro Mini [Internet]. 2025. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/retired/boards/arduino-pro-mini/>
- [26] Teensy 3.2 [Internet]. 2025. Disponível em: <https://www.pjrc.com/store/teensy32.html>
- [27] Teensy 4.0 [Internet]. 2025. Disponível em: <https://www.pjrc.com/store/teensy40.html>
- [28] ADXL355 [Internet]. 2025. Disponível em: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/adxl354_adxl355.pdf

- [29] ADXL357 [Internet]. 2025. Disponível em: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/adxl356-357-357b.pdf>
- [30] XBee3 [Internet]. 2025. Disponível em: <https://docs.digi.com/resources/documentation/digidocs/90001539/>
- [31] Câmara Municipal de Mirandela. (2024, 29 de maio). Câmara Municipal garante junto do Governo apoio nos custos do projeto e da obra de reabilitação da Ponte Eng. Machado Vaz. <https://www.cm-mirandela.pt/municipio/noticias/2024/noticia/camara-municipal-garante-junto-do-governo-apoio-nos-custos-do-projeto-e-da-obra-de-reabilitacao-da-ponte-eng-machado-vaz>
- [32] CAETANO, E., SUN, Z., FERREIRA, P. Ensaios dinâmicos da Ponte Engenheiro José Machado Vaz. BETAR Consultores.; 2021.
- [33] NP EN 1991-2- Eurocódigo 1 - Acções em estruturas - Parte 2: Pontes. Lisboa: IPQ; 2009.

ANEXOS

A.1 DISTRIBUIÇÃO DOS SENSORES POR SETUP DURANTE O ENSAIO DE VIBRAÇÃO AMBIENTAL

Sensor	Setup 1	Setup 2	Setup 3	Setup 4
1	11 A	11 A	11 A	11 A
2	11 D	11 D	11 D	11 D
3	12 A	12 A	12 A	12 A
4	12 D	12 D	12 D	12 D
5	1 A	9 A	18 A	26 A
6	1 B	9 B	18 B	26 B
7	1 C	9 C	18 C	26 C
8	1 D	9 D	18 D	26 D
9	2 A	10 A	19 A	27 A
10	2 B	10 B	19 B	27 B
11	2 C	10 C	19 C	27 C
12	2 D	10 D	19 D	27 D
13	3 A	13 A	20 A	28 A
14	3 B	11 A	20 B	28 A
15	3 C	11 C	20 C	28 C
16	3 D	13 D	20 D	28 D
17	4 A	13 B	21 A	29 A
18	4 B	12 B	21 B	29 B
19	4 C	12 C	21 C	29 C
20	4 D	13 C	21 D	29 D
21	5 A	14 A	22 A	30 A
22	5 B	14 B	22 B	30 B
23	5 C	14 C	22 C	30 C
24	5 D	14 D	22 D	30 D
25	6 A	15 A	23 A	31 A
26	6 B	15 B	23 B	31 B
27	6 C	15 C	23 C	31 C
28	6 D	15 D	23 D	31 D
29	7 A	16 A	24 A	32 A
30	7 B	16 B	24 B	32 B
31	7 C	16 C	24 C	32 C
32	7 D	16 D	24 D	32 D
33	8 A	17 A	25 A	33 A
34	8 B	17 B	25 B	33 B
35	8 C	17 C	25 C	33 C
36	8 D	17 D	25 D	33 D
37				
38				