



UNIVERSIDADE
LUSÓFONA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE LISBOA
FACULDADE DE ENGENHARIA
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

DETERMINAÇÃO DE FORÇAS EM TIRANTES DE PONTES COM RECURSO A TELEMÓVEIS

Dissertação apresentada a provas públicas para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Civil, orientada por Professor Doutor Nuno Rafael da Silva Peres e Professor
Doutor Elói João Faria Figueiredo

Eliane Cristina Semedo Barbosa Borges, n.º 22001294

2024

www.ulusofona.pt



UNIVERSIDADE
LUSÓFONA

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE LISBOA

**FACULDADE DE ENGENHARIA
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL**

DETERMINAÇÃO DE FORÇAS EM TIRANTES DE PONTES COM RECURSO A TELEMÓVEIS

VERSÃO FINAL

Dissertação defendida em provas públicas na Universidade Lusófona, Centro Universitário de Lisboa, no dia 05/11/2024, perante o júri, nomeado pelo Despacho de Nomeação n.º: 931/2024, de 29 de julho de 2024, com a seguinte composição:

Presidente: Prof. Doutor Vítor Filipe Silva Antunes
Vogais: Prof. Doutor Filipe Pimentel Amarante dos Santos (Arguente)
Orientador: Prof. Doutor Nuno Rafael da Silva Peres

Este trabalho foi também orientado por Prof. Doutor Elói João Faria Figueiredo

Eliane Cristina Semedo Barbosa Borges, n.º 22001294

2024

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de expressar meu profundo agradecimento ao meu orientador, Professor Nuno Peres, e ao meu coorientador, Professor Elói Figueiredo, pelas suas orientações incansáveis, paciência e vasto conhecimento. A vossa orientação foi fundamental em todas as etapas deste trabalho, desde a formulação da ideia inicial até a redação final. A sua perspicácia e sugestões foram cruciais para o desenvolvimento e a concretização deste trabalho. Agradeço pela disponibilidade constante para discutir ideias e pela prontidão em fornecer feedbacks construtivos.

Agradeço também à IP – Infraestruturas de Portugal pela oportunidade de realizar as medições com o telemóvel e a App4SHM na Ponte Edgar Cardoso.

Agradeço profundamente à minha mãe, pelo amor incondicional e por todos os sacrifícios que fez para que eu pudesse estar onde estou hoje. Ao meu pai, pelo apoio constante e incentivo em todos os momentos. Ao meu namorado, pela compreensão, apoio emocional e moral, que foram essenciais para manter-me motivada e focada. À minha sogra, pela assistência académica e moral que tanto me ajudaram ao longo deste percurso.

Um agradecimento especial aos meus amigos mais próximos, que me apoiaram nos momentos difíceis e celebraram comigo cada pequena conquista. A sua amizade e encorajamento foram indispensáveis para a conclusão deste trabalho

Resumo

As ações dinâmicas podem induzir vibrações nas estruturas, podendo comprometer a segurança e o conforto dos utilizadores. Esta dissertação tem como objetivo investigar a utilização de telemóveis na monitorização da integridade estrutural da Ponte Edgar Cardoso, na Figueira da Foz. O estudo foca na determinação das frequências naturais dos cabos da ponte utilizando a aplicação App4SHM e na comparação dos resultados com os obtidos com sistemas de monitorização tradicionais.

A Ponte Edgar Cardoso foi a primeira ponte de tirantes construída em Portugal. Dada a sua importância histórica e conceção única, os esforços contínuos para a sua manutenção e preservação são cruciais. Inspeções recentes revelaram um número crescente de fios lassos e partidos nas zonas de ancoragem dos tirantes, sendo assim necessária a substituição integral dos cabos para garantir segurança acrescida e facilitar manutenções futuras.

Neste trabalho utilizam-se telemóveis para detetar anomalias estruturais, demonstrando o uso prático e eficiência das tecnologias móveis para monitorização contínua de infraestruturas. A aplicação App4SHM foi utilizada para medir as frequências naturais dos cabos, permitindo posteriormente o cálculo das forças instaladas nos cabos. Os resultados sugerem que os telemóveis podem expandir significativamente as práticas de monitorização estrutural, com custos reduzidos e maior acessibilidade.

Comparando com os métodos tradicionais, verifica-se que os telemóveis fornecem resultados precisos e eficientes, destacando o seu potencial como uma ferramenta valiosa na monitorização da integridade estrutural. Esta dissertação contribui para os esforços contínuos de manutenção da Ponte Edgar Cardoso e para o aumento do conhecimento no uso inovador de telemóveis na monitorização estrutural.

Os resultados desta dissertação sublinham a importância de integrar tecnologias modernas e avançadas nas práticas de monitorização para garantir a longevidade e segurança de infraestruturas importantes.

Palavras-chave: Monitorização da integridade estrutural, aplicação de telemóvel, App4SHM, tirantes

Abstract

Dynamic actions can induce vibrations in structures, potentially compromising safety and user comfort. This dissertation aims at investigating the use of mobile technology for structural health monitoring of the Edgar Cardoso Bridge in Figueira da Foz. The study focuses on obtaining the natural frequencies of the bridge's cables using the App4SHM application and comparing the results with traditional monitoring systems.

The Edgar Cardoso Bridge was the first cable-stayed bridge build in Portugal. Given its historical significance and unique design, ongoing preservation and maintenance efforts are critical. Recent inspections revealed an increasing number of loose and broken wires in the cable anchorages, hence necessitating the replacement of the entire cables to ensure enhanced safety and facilitate future maintenance.

This research employs smartphones to detect structural anomalies, demonstrating the practicality and efficiency of mobile technologies for continuous infrastructure monitoring. The App4SHM application was utilized to measure the natural frequencies of the cables, enabling the calculation of the tension forces in the cables. The findings suggest that mobile technology can significantly expand SHM practices with reduced costs and improved accessibility.

Comparisons with traditional methods indicate that mobile technology provide accurate and efficient results, highlighting its potential as a valuable tool for structural health monitoring. This dissertation contributes to the ongoing efforts to maintain the structural integrity of the Edgar Cardoso Bridge, offering insights into the use of innovative mobile solutions for structural monitoring.

The outcomes of this dissertation underscore the importance of integrating advanced technologies into monitoring practices to ensure the longevity and safety of critical infrastructure.

Keywords: Structural Health Monitoring, smartphone app, App4SHM, stay-cables

Abreviaturas, siglas e símbolos

BMS	<i>Bridge Management System</i> (Sistema de Gestão de Pontes)
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i> (Administração Federal de Autoestradas)
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformers</i> (Transformadores Diferenciais Variáveis Lineares)
NBIS	<i>National Bridges Inspection Standards</i> (Normas Nacionais de Inspeção de Pontes)
SHM	<i>Structural Health Monitoring</i> (Monitorização da Integridade Estrutural)
VIBEST	Laboratório de Vibrações e Monitorização da Estruturas
L	Tirante longo
M	Tirante médio
N	Lado Sul da ponte
S	Lado Norte da ponte
L	Comprimento da corda, cabo ou tirante
T	Força de tração instalada na corda, cabo ou tirante
T_n	Força instalada no cabo associada à n -ésima frequência de vibração
f_n	n -ésima frequência de vibração
$\bar{f}_n$	Valor médio da n -ésima frequência de vibração
k	Número de observações
m	Massa da corda ou cabo, por unidade de comprimento
n	Número da frequência de vibração
s_n	Desvio-padrão da n -ésima frequência de vibração
t	Tempo
v	Velocidade de propagação da onda ao longo da corda ou cabo
x	Coordenada da posição ao longo do comprimento da corda ou cabo
y	Deslocamentos transversais da corda ou cabo
z_{lim}	Valor limite para identificação de <i>outliers</i>
z_n	Valor normalizado da frequência n
δ	Diferença relativa

ω_n Frequência angular de vibração

Índice Geral

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos.....	3
1.3	Organização	3
2	Estado da Arte.....	5
2.1	Obras de arte	5
2.1.1	Elementos de uma ponte.....	7
2.1.2	Sistemas estruturais das pontes.....	9
2.1.3	Cabos de pontes	13
2.2	Teoria das cordas vibrantes	15
3	Monitorização de Estruturas	19
3.1	Monitorização da integridade estrutural	21
3.1.1	Avaliação do comportamento estrutural de pontes.....	23
3.1.2	Equipamento utilizado na monitorização de pontes	25
3.2	Aplicação de telemóvel para monitorização de pontes	27
3.2.1	App4SHM.....	27
4	Caso de Estudo: Ponte Edgar Cardoso	31
4.1	Descrição da ponte.....	31
4.2	Estudos e intervenções realizados	33
4.3	Medição das frequências dos tirantes	37
4.4	Cálculo das forças nos tirantes	39
4.4.1	Análise dos resultados	41
5	Considerações finais	47
5.1	Conclusões.....	47
5.2	Desenvolvimentos futuros	48
	Bibliografia.....	51
A	Frequências medidas e normalizadas	55

Índice de Quadros

Quadro 4.1 – Características mecânicas dos tirantes (Costa et al., 1997).	33
Quadro 4.2 – Frequências médias e forças no tirante Longo Norte.	43
Quadro 4.3 – Frequências médias e forças no tirante Longo Sul.	44
Quadro 4.4 – Frequências médias e forças no tirante Médio Norte.	45
Quadro 4.5 – Frequências médias e forças no tirante Médio Sul.	46

Índice de Figuras

Figura 2.1. Ponte <i>Caravan</i> , Turquia (Andress, 2017).	5
Figura 2.2. Ponte de Trajano, Portugal (Rolão, 2021).	6
Figura 2.3. Ponte pedonal em Jonava, Lituânia (Tukaj, 2021).	6
Figura 2.4 - Ponte Rodoviária – Ponte Vasco da Gama (Mira, 2004).	7
Figura 2.5. Ponte 25 de Abril (Castanheira, 2012).	7
Figura 2.6 – Elementos de uma ponte (Amorim et al., 2012).	8
Figura 2.7– Esquema dos componentes da ponte (Pinheiro, 2019).	8
Figura 2.8– Exemplo de ponte com tabuleiro vigado: Ponte Vasco da Gama (Junceiro, 2018).	10
Figura 2.9– Exemplo de ponte em arco – Ponte do Rio Zhijinghe, na China (Prandi, 2012).	11
Figura 2.10 - Ponte 25 de Abril (Castro, 2022).	11
Figura 2.11 – Viaduto <i>Millau</i> (Karasinski, 2011).	12
Figura 2.12 – Ponte <i>Forth</i> (Oglethorpe, 2023).	12
Figura 2.13 – Cordão de sete arames (Martins, 2009).	13
Figura 2.14 – Cordão em espiral (Martins, 2009).	13
Figura 2.15 – Parallel-Wire Strand (Martins, 2009).	14
Figura 2.16- Structural Wire Ropes (Martins, 2009).	14
Figura 3.1. Colapso da ponte Silver Bridge em 1967 (thestructuralengineer.info, 2015).	20
Figura 3.2. Colapso da ponte Hintze Ribeiro em 2001 (Agência Lusa, 2021).	20
Figura 3.3– Inspeção subaquática da Ponte 25 de Abril (Saramago, 2019).	22
Figura 3.4 – App4SHM.	28
Figura 3.5 - Procedimento das medições de Frequências Naturais na App4SHM.	28
Figura 3.6 – Arquitetura do Software (Figueiredo et al., 2022).	30
Figura 4.1- Ponte Edgar Cardoso (RPS EDIÇÃO, 2022).	31
Figura 4.2 – Inferior do tabuleiro da ponte de Edgar Cardoso (Afonso, 2015).	32
Figura 4.3 - Ilustração da Ponte Edgar Cardoso em alçado longitudinal (Costa et al., 1997).	32
Figura 4.4 – Fundações das torres da Ponte Edgar Cardoso (Afonso, 2015).	33

Figura 4.5– Elementos estruturais metálicos com ocorrência de ferrugem (Costa et al., 1997).....	34
Figura 4.6 – Reabilitação da ponte até 2006 (Ulma, 2018).....	34
Figura 4.7 – Modelo reduzido de uma parte do tabuleiro da ponte Edgar Cardoso (Silva, 2020).....	35
Figura 4.8 – Condição dos tirantes em 2024.	36
Figura 4.9 - Ancoragem das pontes protegidas por uma manga plástica.	36
Figura 4.10 – Plano de monitorização (alçado longitudinal visto de montante para jusante).	38
Figura 4.11 – Posicionamento do telemóvel no tirante para medição das frequências (Figueiredo et al., 2024).	38
Figura 4.12 – Medição das frequências do tabuleiro da ponte.	39
Figura 4.13 – Gráficos das frequências medidas no tirante Longo Norte.	43
Figura 4.14 – Gráficos das frequências medidas no tirante Longo Sul.	44
Figura 4.15 – Gráficos das frequências medidas no tirante Médio Norte.	45
Figura 4.16 – Gráficos das frequências medidas no tirante Médio Sul.	46

1 Introdução

1.1 Motivação

As pontes são estruturas fundamentais na sociedade moderna, permitindo a passagem contínua de transportes e comércio através de obstáculos naturais ou artificiais. A garantia da segurança, fiabilidade e longevidade destas estruturas é de extrema importância, uma vez que o seu colapso pode conduzir a consequências catastróficas, tais como a perda de vidas humanas, instabilidade económica e danos ambientais. Embora as técnicas de manutenção tradicionais envolvam campanhas periódicas de inspeção e trabalhos de reparação, muitas das vezes não são suficientes para identificar e corrigir de forma atempada os danos que possam existir na estrutura. Deste modo, registou-se um crescimento no interesse e na adoção de sistemas de Monitorização da Integridade Estrutural (ou SHM, da designação em língua inglesa, *Structural Health Monitoring*), que fornecem informação em tempo real e de forma contínua sobre as condições da estrutura.

A Monitorização da Integridade Estrutural envolve a utilização de equipamentos avançados de sensorização, sistemas de aquisição de dados e técnicas de análise para deteção e diagnóstico do dano ou deterioração das estruturas de pontes. Ao permitir que potenciais problemas na estrutura sejam detetados na sua fase inicial, a SHM torna possível uma manutenção e reparação proativas, garantindo uma maior segurança e aumentando a vida útil da estrutura. Os sistemas de monitorização podem envolver vários tipos diferentes de sensores, tais como acelerómetros, extensómetros, transdutores de deslocamentos e sensores de temperatura, entre outros. Cada um destes sensores fornece diferentes tipos de dados que, quando combinados, permitem uma melhor compreensão da integridade da estrutura.

No entanto, a implementação de sistemas de SHM apresenta vários desafios. Uma das dificuldades principais é a integração dos vários tipos de sensores num sistema coeso. As pontes são estruturas complexas constituídas por vários componentes diferentes e que requerem sensores específicos para aquisição dos dados. Logo, garantir que os fluxos de dados estão sincronizados e interpretados de forma adequada constitui um desafio significativo. Adicionalmente, as pontes estão sujeitas a condições severas (e.g., temperaturas extremas, humidade, chuva) que podem afetar a fiabilidade e durabilidade dos sensores e dos sistemas de aquisição de dados.

Outro desafio que surge na implementação de sistemas de SHM é o desenvolvimento de algoritmos de análise de dados que sejam capazes de distinguir entre variações típicas do comportamento estrutural e que representam efetivamente condições de dano. Os dados adquiridos pelos sistemas de SHM são tipicamente vastos e complexos, sendo necessário recorrer a técnicas de análise mais sofisticadas para processamento e interpretação, tais como algoritmos de aprendizagem automática (*machine learning*, na designação em língua inglesa) e inteligência artificial. Estes algoritmos devem ser treinados com um grande volume de dados para serem capazes de identificar com precisão padrões e anomalias, podendo tornar-se computacionalmente dispendiosos. Para além disso, a implementação de sistemas de SHM envolve custos iniciais significativos, tais como a instalação de sensores, equipamento para aquisição de dados e software. Estes custos podem resultar numa menor adesão à adoção destes sistemas, principalmente no caso de pontes mais antigas com financiamento limitado para a sua manutenção. Por outro lado, os benefícios a longo prazo da SHM, como a manutenção reduzida e o aumento da segurança, justificam o investimento inicial.

Os avanços mais recentes no fabrico de telemóveis permitiu estabelecer uma alternativa inovadora e acessível às técnicas habituais de SHM: o uso de aplicações para medir as frequências naturais da estrutura, tirando partido dos sensores internos de cada telemóvel (e.g., acelerómetros, giroscópios, GPS). A combinação destes sensores com técnicas avançadas de análise de dados existentes na aplicação (e.g., aprendizagem automática, inteligência artificial), podem melhorar significativamente a precisão das medições e a capacidade de previsão do sistema de monitorização. Os telemóveis são ferramentas universais, acessíveis e intuitivas, estando disponíveis a qualquer utilizador sem treino prévio, permitindo assim um uso alargado e mais frequente de operações de monitorização com redução dos custos iniciais e das despesas correntes associadas à manutenção e calibração do equipamento. A sua portabilidade é uma vantagem relativamente aos sistemas tradicionais de SHM, sendo possível realizar medições em qualquer local da estrutura, de forma não invasiva ou destrutiva, sem ser necessário instalar equipamento mais pesado e sensível.

A monitorização de estruturas com recurso a telemóveis apresenta vantagens tanto a nível do uso físico do telemóvel, conforme referido anteriormente, como ao nível das aplicações. Um dos benefícios mais significativos é a capacidade de as aplicações serem capazes de processar e analisar os dados de forma quase imediata, fornecendo informação instantânea acerca da integridade da estrutura. As medições podem ser armazenadas localmente no telemóvel ou em bases de dados centralizadas, permitindo a sua partilha com outros

utilizadores. Em contraste, os sistemas tradicionais envolvem um processo mais complexo de aquisição e tratamento dos dados. Para além disso, as aplicações (i) são atualizadas facilmente para incluir novos algoritmos e garantir que a monitorização é realizada de acordo com os últimos avanços tecnológicos e (ii) podem ser instaladas em vários dispositivos, permitindo assim uma monitorização simultânea em larga escala sem os constrangimentos logísticos e financeiros associados aos sistemas tradicionais de SHM.

Em nota final, salienta-se que embora os sistemas tradicionais de SHM se mantenham essenciais para uma monitorização mais exigente, a integração de medições realizadas com aplicações de telemóvel pode impulsionar significativamente os programas de manutenção de pontes, garantindo assim a sua segurança e longevidade com custos e encargos reduzidos.

1.2 Objetivos

No caso das pontes de tirantes e das pontes suspensas, um dos aspetos críticos da SHM assenta na medição das frequências dos cabos, dado que as frequências naturais de cada cabo estão diretamente relacionadas com as forças de tração que nele se desenvolvem. A alteração significativa das frequências pode indicar potenciais problemas, tais como relaxação, aumento da tensão ou dano. A monitorização contínua das frequências permite que estes problemas possam ser detetados e corrigidos antes que ocorram falhas estruturais significativas.

Deste modo, o objetivo principal da dissertação é avaliar a utilização de uma aplicação de telemóvel como sistema de SHM para medir as frequências dos cabos de uma ponte e estimar as forças instaladas nos cabos. Em particular, é utilizada a aplicação App4SHM (Figueiredo et al., 2022) para medir as frequências dos cabos da ponte Edgar Cardoso, na Figueira da Foz, que são comparadas com as obtidas através de sistemas tradicionais de SHM. A utilização do telemóvel num caso prático permite determinar a aplicabilidade e validade da metodologia proposta em situações reais. Assim, com esta dissertação pretende-se demonstrar a viabilidade e os benefícios da utilização de uma aplicação de telemóvel na medição das frequências dos cabos de uma ponte, contribuindo para o alargamento das práticas de SHM.

1.3 Organização

A dissertação desenvolve-se ao longo de cinco Capítulos, sendo o primeiro a presente Introdução, onde se apresentam a motivação e objetivos, destacando o tema da monitorização

da integridade estrutural e a utilização de novas tecnologias, nomeadamente telemóveis, como sistemas de monitorização.

No segundo Capítulo apresentam-se os conceitos fundamentais relacionados com obras de arte e com a teoria das cordas vibrantes. Em primeiro lugar, é feita uma descrição geral dos vários tipos de pontes e os seus elementos estruturais, em particular os cabos utilizados em pontes de tirantes. Posteriormente, é introduzida a teoria das cordas vibrantes, que constitui uma base teórica essencial para a compreensão do comportamento dinâmico dos cabos de pontes. É apresentada a formulação matemática da teoria, incluindo o cálculo das frequências e das forças instaladas nos cabos.

O terceiro Capítulo foca nas metodologias e tecnologias utilizadas em monitorização estrutural. É apresentada uma visão geral das técnicas tradicionais de SHM, tal como o tipo de testes realizados na avaliação do comportamento de estruturas e o equipamento utilizado. Em seguida é abordado o tema da utilização de telemóveis na monitorização de estruturas. Em particular, introduz-se a App4SHM, uma aplicação de telemóvel desenvolvida para monitorização de estruturas, cujas funcionalidades são descritas em detalhe.

No quarto Capítulo é apresentado o caso de estudo para ilustrar a aplicação prática da aplicação de telemóvel na determinação das frequências dos cabos de pontes. O caso de estudo é focado na Ponte Edgar Cardoso, situada na Figueira da Foz, cujo sistema de tirantes está atualmente a ser substituído integralmente. É feita uma descrição da ponte, detalhando os vários estudos e intervenções a que esta tem sido sujeita desde a sua abertura ao público. Em seguida discute-se descreve-se o procedimento utilizado na medição das frequências dos cabos da ponte com a App4SHM e o tratamento posterior dos dados, em particular a identificação de *outliers* e o cálculo das forças nos tirantes com base nas frequências observadas.

No quinto e último Capítulo apresentam-se as conclusões do trabalho efetuado, sintetizando os resultados obtidos. É feito um resumo das contribuições principais da dissertação, com foco na utilização de telemóveis para monitorização de estruturas. Por fim, sugerem-se alguns desenvolvimentos futuros e melhorias na App4SHM, com base nas limitações identificadas ao longo do estudo realizado.

2 Estado da Arte

2.1 Obras de arte

As pontes e os viadutos são estruturas fundamentais da engenharia civil que permitem e facilitam a ligação e transporte entre dois lugares distintos. A sua origem não é atribuída a um único inventor, tendo surgido de forma orgânica devido a fenómenos naturais, tais como árvores caídas, criando assim passagens sobre obstáculos como rios, lagos, mares, valas, ribeiras e precipícios. Os métodos de construção de pontes foram evoluindo ao longo do tempo, desde a utilização de materiais como a madeira, pedra e cordas, até ao advento de novas tecnologias permitir que as pontes e viadutos contemporâneos fossem construídos utilizando aço e betão.

Durante este processo evolutivo, o avanço nas técnicas de construção permitiu que, para além da funcionalidade das pontes e viadutos, estes tivessem também algum valor artístico, tornando-se em *obras de arte*. A construção de pontes tem um papel crucial no desenvolvimento económico de um país, dado que a redução da distância e o tempo de viagem permite melhorar as comunicações e aumentar o número de interações entre duas regiões distintas.

Segundo Andress (2017), a ponte mais antiga ainda em utilização nos dias de hoje, é a Ponte *Caravan*, sobre o rio Melos na Turquia, tendo sido construída em 850 a.C. (Figura 2.1). Em Portugal, a ponte mais antiga é a Ponte de Trajano (Rolão, 2021), construída em Chaves no início do século II (Figura 2.2), tendo recebido tráfego automóvel até 2008, ano em que se tornou numa ponte pedonal.



Figura 2.1. Ponte *Caravan*, Turquia (Andress, 2017).



Figura 2.2. Ponte de Trajano, Portugal (Rolão, 2021).

As pontes e viadutos podem ser classificados consoante a sua utilização:

- Pontes pedonais: são pontes cuja construção se destina exclusivamente ao tráfego pedonal. Muitas das pontes pedonais passam por cima de estradas (Figura 2.3) e caminhos ferroviários, tendo como objetivo assegurar a travessia da via com maior segurança, evitando interromper o tráfego de veículos e aumentar o tempo de espera.



Figura 2.3. Ponte pedonal em Jonava, Lituânia (Tukaj, 2021).

- Pontes rodoviárias: são pontes destinadas ao tráfego de veículos rodoviários, sendo o tipo de obra de arte mais comum (Figura 2.4).



Figura 2.4 - Ponte Rodoviária – Ponte Vasco da Gama (Mira, 2004).

- Pontes ferroviárias: são estruturas que permitem a passagem de veículos ferroviários. Em alguns casos, uma ponte pode ser simultaneamente rodoviária e ferroviária, tendo tabuleiros diferentes para cada uma das tipologias. Por exemplo, a Ponte 25 de Abril, em Lisboa, possui um tabuleiro superior para o tráfego rodoviário e um tabuleiro inferior para tráfego ferroviário (Figura 2.5).

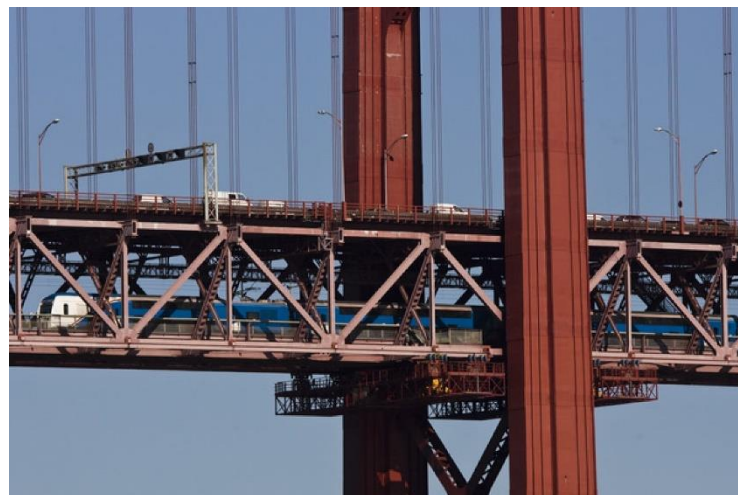


Figura 2.5. Ponte 25 de Abril (Castanheira, 2012).

2.1.1 Elementos de uma ponte

A estrutura de uma ponte é composta por três sistemas, cada um com uma função diferente para o comportamento da estrutura, que interagem entre si: a superestrutura, a mesoestrutura e a infraestrutura (ver Figura 2.6 e Figura 2.7).

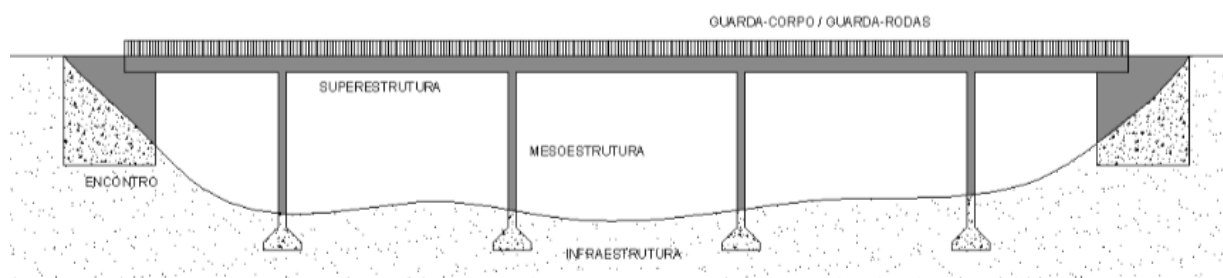


Figura 2.6 – Elementos de uma ponte (Amorim et al., 2012).

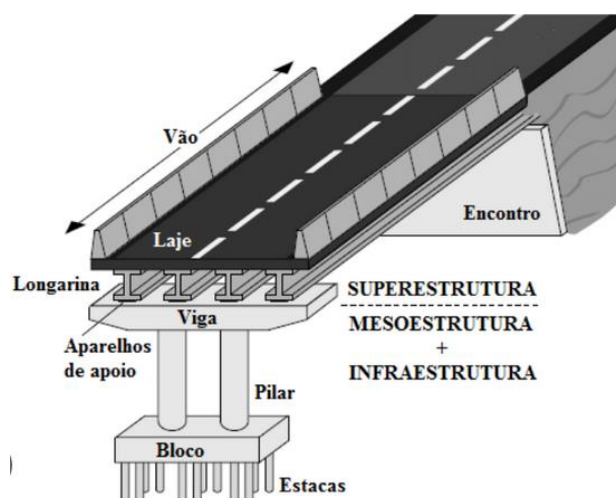


Figura 2.7– Esquema dos componentes da ponte (Pinheiro, 2019).

A superestrutura é o sistema estrutural localizado na zona superior da ponte, constituído pelos elementos cujo comportamento é diretamente influenciado pelas ações atuantes. A superestrutura é, em geral, constituída pelos seguintes elementos estruturais: o tabuleiro, as longarinas ou vigas longitudinais, e as carlingas ou vigas transversais (Amorim et al., 2012).

O tabuleiro é um dos elementos estruturais fundamentais da ponte, recebendo as cargas móveis diretas (e.g., ações dos veículos ou ações pedonais), podendo ser em betão, aço ou madeira. O tabuleiro da ponte descarrega as forças sobre as vigas, que por sua vez transferem as cargas para os pilares ou outros componentes da mesoestrutura.

No dimensionamento do tabuleiro devem ser consideradas não só as cargas atuantes na direção vertical (e.g., peso próprio, cargas permanentes e sobrecargas), mas também as cargas que atuam na direção horizontal (e.g., ação do vento, ação sísmica, frenagem de

veículos) e as ações da temperatura (Campos, 2018). As variações de temperatura afetam não só o tabuleiro como outros componentes da estrutura, sendo de extrema importância que sejam consideradas na análise, de forma a garantir a durabilidade e a segurança da estrutura durante a sua vida útil. Deve-se salientar que os efeitos das alterações climáticas (e.g., variações de temperatura com maior amplitude e rajadas de vento com maior intensidade) podem ter efeitos ainda mais adversos sobre as pontes e viadutos, sendo imperativo um dimensionamento e análise adequados.

A mesoestrutura está localizada na parte central da ponte e compreende os elementos de suporte, expostos regularmente a ações dinâmicas (e.g., impacto de ondas, ações do vento). A mesoestrutura inclui vários elementos que garantem a estabilidade e a capacidade de carga da ponte: pilares, encontros e aparelhos de apoio (Amorim et al., 2012). Os pilares são elementos essenciais da mesoestrutura, tendo a função de receber as cargas do tabuleiro e/ou das vigas e transferi-las para as fundações, e de garantir a estabilidade da estrutura.

A infraestrutura está localizada na zona inferior da ponte e é constituída pelas fundações (e.g., sapatas, estacas, pegões) que transmitem as cargas dos pilares para o solo (Amorim et al., 2012).

2.1.2 Sistemas estruturais das pontes

A decisão relativa ao sistema estrutural a ser utilizado na construção de uma ponte envolve uma análise detalhada de vários fatores críticos, tais como a funcionalidade da estrutura, as ações que devem ser suportadas e a sua localização geográfica (Gorges, 2005). Adicionalmente, a harmonia estética com o ambiente envolvente, as variações climáticas e o contexto cultural local também devem ser considerados. O conhecimento dos regulamentos e normas a adotar no dimensionamento, os constrangimentos orçamentais e a capacidade de adotar soluções criativas são também componentes essenciais do processo de decisão.

Os principais sistemas estruturais utilizados em pontes são (i) pontes com tabuleiro vigado, (ii) pontes em arco, (iii) pontes suspensas, (iv) pontes de tirantes e (v) pontes em treliça. Estes sistemas são descritos sucintamente de seguida. Para uma descrição em maior detalhe dos vários sistemas estruturais de pontes, recomenda-se a consulta das Dissertações de Botelho (2008) e Martins (2009), sendo este último focado particularmente em pontes suspensas.

A ponte com tabuleiro vigado é o sistema estrutural mais simples utilizado em pontes e viadutos, e consiste essencialmente num tabuleiro assente em vigas (longitudinais e

transversais) que são apoiadas em pilares ou diretamente no terreno (Botelho, 2008). A geometria das vigas pode assumir várias formas distintas (e.g., viga com secção em caixão, viga com secção de alma cheia, viga em treliça, viga alveolada) e pode ser ou não pré-esforçada. A Figura 2.8 mostra a Ponte Vasco da Gama, que possui um tabuleiro vigado cujas vigas têm secção transversal em caixão.



Figura 2.8– Exemplo de ponte com tabuleiro vigado: Ponte Vasco da Gama (Junceiro, 2018).

As pontes em arco, conhecidas pela sua forma elegante e eficiência estrutural possuem uma história rica que remonta às civilizações antigas, particularmente os Romanos, que construíram estas estruturas com blocos de pedra. A particularidade deste sistema estrutural é o arco, que transfere de forma muito eficiente as forças através de compressão ao longo da curva até aos apoios. Este sistema é caracterizado pela sua elevada resistência e estabilidade, apresentando momentos fletores reduzidos face aos sistemas com vigas horizontais. As pontes em arco modernas têm estruturas em betão armado ou em aço, aumentando assim a sua capacidade resistente e durabilidade. A forma em arco serve não só um propósito funcional, mas também estético, permitindo a fácil integração com envolventes diferentes. Deste modo, as pontes em arco continuam a ser a escolha preferida para vencer grandes vãos (e.g., rios e vales – ver Figura 2.9).



Figura 2.9– Exemplo de ponte em arco – Ponte do Rio Zhijinghe, na China (Prandi, 2012).

As pontes suspensas e as pontes de tirantes são os dois tipos proeminentes de pontes cujo tabuleiro é suportado por cabos, sendo vistas como a solução mais económica para vencer grandes vãos (Martins, 2009).

As pontes suspensas (e.g., Ponte 25 de Abril – Figura 2.10) possuem cabos principais que estão suspensos entre torres e ancorados nas extremidades. A ligação entre os cabos principais e o tabuleiro é feita através de pendurais, que distribuem as forças uniformemente. Por outro lado, as pontes de tirantes (e.g., Viaduto Millau, França – Figura 2.11) são constituídas por uma série de cabos que estão ancorados diretamente nas torres e ligam a vários pontos no tabuleiro. O sistema de pontes de tirantes possui uma estrutura rígida e eficiente, capaz de suportar pesos substanciais com menos cabos e uma flecha menor, face ao sistema de pontes suspensas.



Figura 2.10 - Ponte 25 de Abril (Castro, 2022).



Figura 2.11 – Viaduto *Millau* (Karasinski, 2011).

As pontes em treliça são conhecidas pela sua robustez e forma estrutural eficiente. Estas pontes são compostas por vários elementos ligados entre si, geralmente em aço, formando uma estrutura triangulada que distribui as cargas ao longo da estrutura por esforço axial. A estrutura em treliça tira partido da estabilidade geométrica dos triângulos, permitindo assim que a ponte seja capaz de suportar pesos elevados e vencer grandes vãos sem comprometer a sua integridade. Isto faz com que as pontes em treliça sejam particularmente adequadas para tráfego de pesados e ferroviário. Adicionalmente, a sua natureza modular permite a pré-fabricação e montagem simples. Um exemplo claro que ilustra a adaptabilidade deste tipo de pontes é a Ponte *Forth* na Escócia (Figura 2.12).



Figura 2.12 – Ponte *Forth* (Oglethorpe, 2023).

2.1.3 Cabos de pontes

Os cabos de tirantes são tipicamente fabricados com aços de alta resistência devido às suas propriedades, incluindo a elevada resistência à tração, rigidez, soldabilidade, flexibilidade e resistência à corrosão. Estes cabos são formados por vários fios ou arames entrelaçados entre si para formar uma estrutura robusta e flexível, capaz de resistir a tensões elevadas. Existem vários tipos de cabos e cordões, cada um com propriedades mecânicas distintas, dos quais se destacam alguns em seguida (Martins, 2009):

- Um dos tipos de cordão mais comum é o cordão de sete arames (Figura 2.13), composto por um arame central envolvido por outros seis arames dispostos em espiral. Este tipo de cabo tem aplicação generalizada na construção, principalmente em cordões de pré-esforço para betão e em pontes suspensas, devido à sua capacidade de resistir a cargas elevadas.



Figura 2.13 – Cordão de sete arames (Martins, 2009).

- Os cordões em espiral (Figura 2.14) são fabricados por se envolver um arame central (núcleo) com várias camadas de arames. Estes cabos possuem elevada resistência à tração e durabilidade, sendo assim adequados para estruturas que necessitem de estabilidade e resistência a longo prazo.

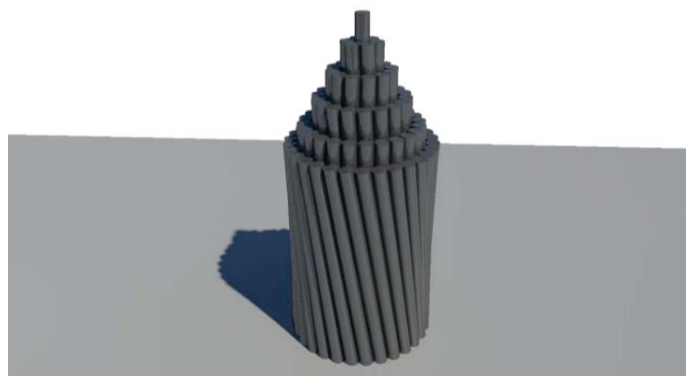


Figura 2.14 – Cordão em espiral (Martins, 2009).

- Os cordões de arames paralelos (Figura 2.15) são constituídos por arames dispostos em paralelo e ligados por uma matriz de resina ou outro material de ligação. Este tipo de cordão proporciona uma alta eficiência no uso de material, resultando numa excelente relação entre resistência e peso, sendo muito vantajoso em estruturas que necessitem de peso reduzido sem que a resistência seja comprometida.

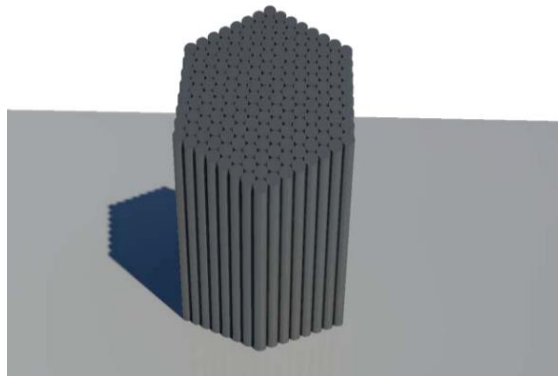


Figura 2.15 – Parallel-Wire Strand (Martins, 2009).

- As cordas de cabos estruturais (Figura 2.16) são formados por um cordão central rodeado por outros seis cordões idênticos, enrolados em forma de hélice. Por sua vez, cada um destes cordões é formado por cordões de arames, apresentados anteriormente. Em geral, estas cordas são utilizadas em casos que necessitem de elevada flexibilidade.

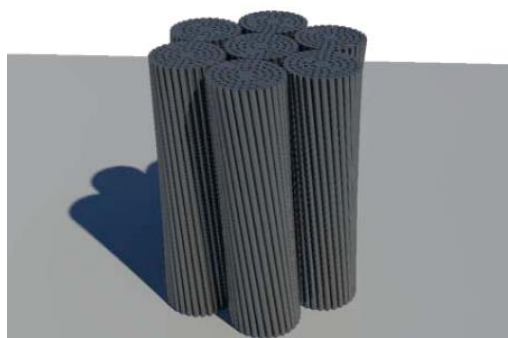


Figura 2.16- Structural Wire Ropes (Martins, 2009).

A escolha do tipo de cabo depende das exigências específicas da sua aplicação, tendo em conta fatores tais como a resistência à tração, a durabilidade, a flexibilidade e a resistência à fadiga. Cada tipo de cabo oferece vantagens distintas das quais se pode tirar partido para otimizar o desempenho estrutural e garantir a segurança e a longevidade da construção.

2.2 Teoria das cordas vibrantes

A teoria das cordas vibrantes descreve o comportamento de cabos ou cordas sob tensão. De acordo com esta teoria, as cordas fixas nas duas extremidades podem oscilar segundo vários modos, cada um caracterizado por uma frequência específica. Esta frequência é determinada pelas propriedades físicas e geométricas da corda: o comprimento, a massa distribuída por unidade de comprimento e a tensão aplicada. Por outro lado, considera-se que as dimensões da secção transversal são desprezáveis.

Considere-se uma corda horizontal fixa nas extremidades, sem quaisquer forças a atuar sobre si e desprezem-se as forças da gravidade. Nestas condições, a posição de equilíbrio da corda é uma linha reta. A aplicação de uma perturbação transversal na corda traduz-se numa propagação desta ao longo do comprimento. Se a perturbação tiver uma amplitude pequena, a equação diferencial que rege o movimento da corda é

$$\frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2}, \quad (2.1)$$

em que $y(x, t)$ são os deslocamentos transversais da corda para uma posição x ao longo do comprimento da corda e num determinado instante de tempo t , e v é a velocidade de propagação da onda na corda. No caso de uma corda com massa uniformemente distribuída m sujeita a uma força de tração T , a velocidade é dada por

$$v = \sqrt{\frac{T}{m}}. \quad (2.2)$$

Sendo L o comprimento da corda e considerando as condições de fronteira relativas às extremidades fixas, $y(0, t) = y(L, t) = 0$, a solução da Eq. (2.1) é dada pela sobreposição de soluções da forma, com $n = 1, 2, \dots$,

$$y_n(x, t) = \sin(k_n x) [A_n \cos(\omega_n t) + B_n \sin(\omega_n t)], \quad (2.3)$$

em que $\omega_n = n\pi v/L$ é a frequência angular, $k_n = \omega_n/v$ é o número de onda e os coeficientes A_n e B_n são determinados com base nas condições iniciais $y(x, 0) = f(x)$ e $\dot{y}(x, 0) = g(x)$ – neste contexto, a notação $\dot{y}(x, t)$ representa a derivada de $y(x, t)$ em ordem à variável t . Em alternativa, a Eq. (2.3) pode ser escrita na forma

$$y_n(x, t) = C_n \sin(k_n x) \cos(\omega_n t - \phi_n), \quad (2.4)$$

onde $C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$ é a amplitude do movimento e $\phi_n = \arctan\left(\frac{A_n}{B_n}\right)$ é o ângulo de fase. A representação da solução nesta forma tem a vantagem de ser possível identificar claramente a amplitude do movimento oscilatório.

Atendendo à Eq. (2.4), é possível verificar que para um dado valor de n , o movimento da corda é dado pelo produto de duas parcelas: (i) uma que caracteriza a forma da configuração deformada no espaço, $\phi_n(x) = \sin(k_n x)$, também designado por “modo de vibração n ”, e (ii) outra que define a variação da amplitude do movimento ao longo do tempo.

Deste modo, a vibração da corda é caracterizada por ondas estacionárias: a amplitude do movimento varia no tempo, mas a forma da configuração deformada mantém-se inalterada – a localização dos pontos de amplitude nula e máxima (em valor absoluto) é fixa, sendo estes pontos designados, respetivamente, por nodos e antinodos. De facto, os zeros e os extremos do modo de vibração n coincidem com os da função $y_n(x, t)$, sendo igualmente espaçados ao longo do comprimento. Em particular, os zeros são dados por

$$y_n(x, t) = 0 \Leftrightarrow \sin(k_n x) = 0 \Leftrightarrow k_n x = i\pi \Leftrightarrow x = \frac{i}{n}L, \quad (2.5)$$

em que $i = 0, 1, \dots, n$ (a determinação dos pontos de extremo podia ser feita de forma análoga, utilizando a primeira derivada da função y_n em ordem à variável x).

Atendendo às relações definidas anteriormente, a frequência natural do modo de vibração n é dada por

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{m}}, \quad (2.6)$$

sendo então possível relacionar a frequência de vibração de uma corda com a tensão instalada na corda. A frequência fundamental, também designada por primeira harmónica, é dada para $n = 1$ e corresponde à menor frequência segundo a qual ocorre vibração da corda. As harmónicas superiores correspondem a múltiplos inteiros da frequência fundamental, i.e.,

$$f_n = n \times \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{m}} = n \times f_1, \quad (2.7)$$

e estão associadas a modos de vibração mais complexos que envolvem mais nodos e antinodos, tal como evidenciado pela Eq. (2.5).

Na prática, a aplicação da teoria das cordas vibrantes aos cabos utilizados em estruturas de engenharia civil nem sempre conduz a resultados aceitáveis, uma vez que as

simplificações adotadas na sua formulação podem não ser válidas. Em particular, a rigidez de flexão da secção transversal e a influência do peso próprio na curvatura inicial do cabo podem ter uma influência significativa nas frequências de vibração e, consequentemente, no cálculo das tensões.

A aplicabilidade da fórmula das cordas vibrantes (2.6) a vários cabos de estruturas de engenharia civil foi estudada por (Robert et al., 1991), tendo verificado que na grande maioria dos casos, particularmente em tirantes de pontes, a expressão (2.6) fornece estimativas precisas das forças instaladas nos cabos. Os casos mais complexos, tais como cabos longos com flechas elevadas, cabos curtos rígidos, cabos com tensão baixa ou cabos com ancoragens flexíveis, podem ser analisados com base na expressão (2.6), introduzindo correções obtidas por via analítica ou numérica (Caetano & Cunha, 2015).

3 Monitorização de Estruturas

A manutenção das estruturas de pontes em condições ótimas apresenta desafios significativos devido à diversidade dos sistemas estruturais. Muito embora as pontes modernas sejam frequentemente construídas em betão armado ou pré-esforçado, existe também uma grande variedade de pontes de aço, pontes mistas, pontes de tirantes, pontes suspensas e pontes em arco de alvenaria. Cada tipo de estrutura tem um comportamento distinto e está sujeito a diferentes formas de deterioração, tais como a mudança drástica de temperatura, o aumento de cargas de tráfego de veículos, a utilização de materiais de baixa qualidade, e outras condições ambientais que podem provocar danos e defeitos, sendo necessário adotar diferentes medidas de manutenção. Adicionalmente, o aumento do volume de tráfego e os pesos máximos dos veículos individuais resultam em cargas que podem exceder as estimativas feitas durante o dimensionamento da estrutura, acelerando assim o processo de deterioração. Isto é particularmente evidente em estruturas modernas, particularmente em pontes de betão armado, que estão expostas a ambientes mais agressivos face a outras estruturas mais antigas (Botelho, 2008)

O colapso da ponte *Silver Bridge* nos Estados Unidos em 1967 (Figura 3.1) marcou um momento crucial na engenharia de pontes, destacando a necessidade crítica de se realizarem inspeções regulares para garantir a integridade estrutural de pontes. Este desastre levou a que a *Federal Highway Administration* (FHWA) criasse as Normas Nacionais de Inspeção de Pontes (NBIS, da designação em língua inglesa *National Bridges Inspection Standards*). As NIBS introduziram uma série de normas para inspeções da segurança, tal como a frequência das inspeções com base nos sistemas estruturais e as qualificações necessárias para os engenheiros realizarem as inspeções, etc. (Campos, 2018).

Em Portugal, a importância na inspeção da integridade estrutural das pontes tornou-se evidente com o colapso da ponte Hintze Ribeiro em 2001. Este incidente conduziu à inspeção de 350 pontes, das quais três foram desativadas para qualquer tipo de tráfego e 56 sofreram novas restrições de circulação (Campos, 2018). Analogamente às NBIS, a Infraestruturas de Portugal desenvolveu normas para a inspeção da segurança, definindo a frequência de inspeção com base nas condições das pontes (Figueiredo et al., 2013).



Figura 3.1. Colapso da ponte Silver Bridge em 1967 (thestructuralengineer.info, 2015).



Figura 3.2. Colapso da ponte Hintze Ribeiro em 2001 (Agência Lusa, 2021).

Embora tenham excedido a sua vida útil, algumas pontes metálicas antigas mantêm-se ativas nos dias de hoje. No entanto, exigem uma manutenção frequente devido à ocorrência de corrosão nos seus elementos metálicos. Outras, por serem consideradas pontes de baixa segurança, foram desativadas ou sujeitas à redução das cargas de tráfego (e.g., restrições do acesso a veículos, permitindo apenas a passagem de peões).

O Sistema de Gestão de Pontes (BMS, da designação em língua inglesa Bridge Management System) é um sistema desenvolvido para aumentar a frequência das inspeções e determinar a vida útil restante das pontes, tendo em conta as restrições financeiras das entidades governativas, a rede de transportes e a segurança pública. O objetivo principal do BMS é a otimização do desempenho estrutural, garantindo também a segurança. Embora o BMS não

tenha uma definição específica, pode ser definido como um mecanismo de ajuda baseado em inspeções visuais que integrem os fatores económicos e de engenharia para dar apoio às autoridades na decisão da melhor ocasião e dos métodos para a manutenção das pontes. No entanto, a dependência do BMS em inspeções visuais pode dificultar a correta avaliação da integridade estrutural, uma vez que os inspetores podem ignorar problemas estruturais situados em locais de difícil acesso (Figueiredo et al., 2013).

3.1 Monitorização da integridade estrutural

A Monitorização da Integridade Estrutural, ou SHM, é o ramo da engenharia onde se utiliza equipamento técnico avançado para recolher dados com o objetivo de detetar dano, anomalias, fadiga e deformações, permitindo assim avaliar a durabilidade estrutural das pontes. A SHM utiliza sensores, tais como acelerómetros, instalados de forma estratégica nos pontos críticos da estrutura. Esta instalação deve ter em conta uma série de fatores, tais como as variações de temperatura, forças de impacto e vibrações, de forma a ser possível a recolha de dados em tempo real. Esta monitorização contínua permite detetar precocemente possíveis problemas estruturais, facilitando a manutenção imediata e garantindo a longevidade e segurança da ponte.

O desenvolvimento de estratégias de manutenção envolve a seleção do tipo de inspeção a realizar, de acordo com o ambiente de exposição, as variações de temperatura, e outras características específicas da ponte. Os tipos de inspeções incluem inspeção de inventário, de rotina, subaquática, principal e especial, que são descritos em seguida.

A inspeção de inventário consiste na avaliação detalhada das características estruturais e físicas, bem como o historial da ponte. Durante estas inspeções é realizada a inspeção visual de forma a avaliar as condições da ponte e é feita a recolha de documentos relativos ao historial da ponte, tais como o projeto de execução, projeto de alteração, relatórios, e avaliações da capacidade de carga da ponte (Campos, 2018).

As inspeções de rotina consistem principalmente em inspeção visual e documentação fotográfica, tendo como objetivo a identificação pequenos detalhes que requeiram manutenção. Tipicamente é realizada de quinze em quinze meses para ser possível avaliar diferentes condições de temperatura e os efeitos das estações do ano no comportamento da estrutura. As inspeções visuais são realizadas por técnicos com experiência técnica e devidamente treinados

e consistem no método de avaliação mais económico e fundamental, fornecendo rapidamente uma visão abrangente do estado da estrutura (Graça, 2017).

A inspeção subaquática (Figura 3.3) é aplicável a pontes que atravessam corpos de água (e.g., rios, mares, lagos). Consistem numa inspeção visual realizada debaixo de água, tanto por mergulhadores com experiência técnica ou por equipamento operado remotamente. Esta inspeção inclui registos fotográficos e em vídeo, bem como levantamentos topográficos, com o objetivo de analisar a condição estrutural das fundações e de outros elementos estruturais submersos.

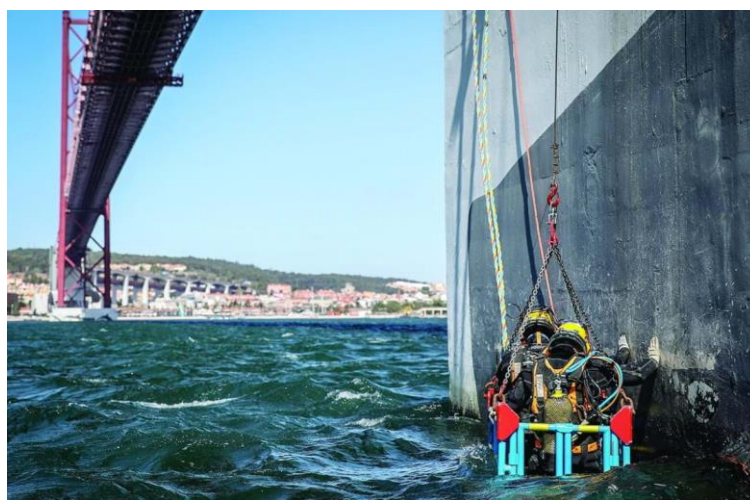


Figura 3.3— Inspeção subaquática da Ponte 25 de Abril (Saramago, 2019).

As inspeções principais ocorrem tipicamente a cada cinco anos, embora possam ser realizadas com maior frequência, dependendo das características específicas de cada ponte. Estas inspeções envolvem uma avaliação e investigação detalhada realizada por inspetores qualificados e especialistas em pontes. Ao longo dos anos, as anomalias, potenciais causas e atividades de manutenção são documentadas meticulosamente por inspetores diferentes. Este registo detalhado é crucial na identificação de problemas mais graves e no planeamento de inspeções especiais, caso seja necessário (Campos, 2018).

Em geral, as inspeções especiais ocorrem após uma inspeção principal, não tendo assim um calendário fixo para serem realizadas. Estas são realizadas para identificar e analisar as causas e impactos de deterioração e anomalias detetadas, tendo como objetivo a previsão e prevenção do agravamento das condições da ponte, garantindo assim a segurança e a durabilidade. Os estudos realizados nestas inspeções envolvem uma análise detalhada com base numa série de ensaios, tais como testes de carga, recolha de amostras de material para estudos

químicos e físicos, medição de deformações e vibrações, e avaliação da corrosão das armaduras (Graça, 2017).

3.1.1 Avaliação do comportamento estrutural de pontes

É fundamental reconhecer que não é viável basear-se apenas em métodos precisos e determinísticos para realizar a análise estrutural de pontes. Isto deve-se às incertezas inerentes nos dados indicadas abaixo, associadas as determinadas variáveis, tais como as cargas e as propriedades dos materiais, que dificultam a definição dos seus valores exatos (Figueiredo, 2006):

- (i) Variações nas cargas: as forças atuantes numa ponte (e.g., devido à carga dos veículos) podem mudar de forma imprevisível, modificando as propriedades da estrutura.
- (ii) Propriedades dos materiais: as características dos materiais, tais como a resistência do betão e do aço, podem variar dependendo do ambiente de exposição.
- (iii) Condições ambientais: a variação de fatores como o vento, a chuva, a temperatura e a humidade pode afetar significativamente o desempenho da estrutura.
- (iv) Erros humanos: os erros durante o dimensionamento, a construção, a manutenção e na recolha de dados podem afetar a precisão das avaliações do comportamento da estrutura.
- (v) Degradação: o desgaste natural e envelhecimento dos materiais podem influenciar de forma imprevisível o desempenho da ponte.

Estas incertezas dificultam a previsão com precisão do comportamento da estrutura, exigindo métodos de análise que tenham em conta estas variações. As avaliações do comportamento estrutural dividem-se em subsistemas de monitorização, sendo os mais comuns os testes estáticos e os testes dinâmicos (Figueiredo, 2006).

A análise estática consiste em procedimentos como a medição de deslocamentos, tensões, deformações e temperatura ambiente dos diferentes elementos da ponte, de forma a avaliar a capacidade de carga da ponte sem a influência das cargas móveis, i.e., com veículos estacionários sobre a ponte. Os testes estáticos dividem-se em três categorias (Figueiredo, 2006):

- Testes de comportamento: estes testes focam-se no comportamento mecânico da ponte, com o objetivo de examinar a distribuição das forças ao longo dos diferentes elementos da ponte.
- Testes de diagnóstico: o objetivo dos testes de diagnóstico é a identificação das causas do comportamento estrutural que não foram previstas durante a fase de projeto.
- Testes de carga: estes testes analisam a capacidade de carga da ponte enquanto atuam forças estáticas sobre a estrutura.

Os testes dinâmicos consistem na análise do comportamento estrutural da ponte, medindo deslocamentos, tensões, deformações e vibrações, entre outros, sob a ação de cargas móveis. Este tipo de análise é realizado para as condições normais de tráfego da ponte, permitindo avaliar a integridade estrutural e o seu desempenho em serviço. Os testes dinâmicos podem ser classificados em dois tipos: testes de identificação modal e testes de determinação do fator de ampliação dinâmica (Figueiredo, 2006).

Os testes de identificação modal consistem na aplicação de cargas móveis sobre a estrutura, tipicamente durante os períodos de maior tráfego de veículos, para maximizar a recolha de vibrações, frequências naturais e coeficientes de amortecimento para a deteção de dano. Existem três tipos de testes de identificação modal: testes em vibração forçada, testes em vibração livre e testes em vibração ambiental (Figueiredo, 2006):

- Os testes em vibração forçada consistem na aplicação de cargas controladas na ponte para induzir vibrações. Estes testes apresentam várias vantagens, pois recorrem a uma fonte de excitação bem definida, permitindo ao operador escolher os parâmetros que pretende (localização, frequência, amplitude, duração e hora do dia). Isto ajuda a revelar aspetos desejados do comportamento estrutural e isolar as alterações estruturais do ruído ambiente e eletrónico.
- Os testes de vibração livre são realizados em estruturas flexíveis, onde uma massa é libertada de uma posição de repouso, permitindo que a estrutura vibre com decaimento devido à dissipação de energia. Esta análise permite determinar as propriedades dinâmicas da estrutura.

- Os testes em vibração ambiental utilizam as vibrações provocadas por fontes naturais ou operacionais, tais como o vento, tráfego pedestre ou de veículos, ou ação sísmica, sem a necessidade de excitações externas. Assim, são testes de baixo custo, sem interrupção do tráfego e com excitação contínua. No entanto, apresentam algumas desvantagens, como a variabilidade da amplitude, duração, direção, conteúdo de frequências e dificuldade de medições com precisão. Estes testes são geralmente adequados para sistemas de monitorização (Figueiredo, 2006).

Os testes de determinação do fator de amplificação dinâmica são testes estático-dinâmicos realizados durante os testes de carga para caracterizar dinamicamente a estrutura. Medem-se grandezas globais ou locais enquanto a estrutura é atravessada por um veículo com peso e velocidade conhecidos. Ao variar a velocidade do veículo torna-se possível analisar os efeitos dinâmicos nas grandezas medidas (Figueiredo, 2006).

3.1.2 Equipamento utilizado na monitorização de pontes

A monitorização de pontes é crucial para garantir a sua segurança, identificar potenciais problemas estruturais e tomar medidas preventivas para evitar falhas catastróficas. Existe uma série de equipamentos e tecnologias que são utilizados para realizar a monitorização de forma eficaz, dos quais se destacam (Campos, 2018):

- Extensómetros de resistência (*Strain Gauges*): utilizados para medir a deformação em elementos estruturais, os extensómetros são essenciais para monitorizar alterações no comportamento da estrutura quando esta se encontra sujeita a ações variáveis. Tipicamente são utilizados para medir deformações específicas em diferentes componentes da ponte.
- Transformadores Diferenciais Variáveis Lineares (LVDTs, da designação em língua inglesa *Linear Variable Differential Transformers*): estes sensores medem deslocamentos lineares com alta precisão e são utilizados para monitorizar deslocamentos entre diferentes partes da estrutura, permitindo detetar movimentos anómalos ou evidência de falhas estruturais.

- Sensores de corda vibrante: medem a tensão em componentes estruturais através da frequência de vibração de uma corda tracionada. Utilizam-se em estruturas de pontes para monitorizar tensões e deformações, especialmente em cabos de pontes suspensas.
- Termopares: são sensores de temperatura que medem a diferença de potencial gerada entre dois metais diferentes quando aquecidos e são utilizados para monitorizar a temperatura ambiente e as deformações térmicas que podem afetar a estrutura da ponte.
- Potenciómetros Lineares: medem deslocamentos lineares através da variação de resistência num potenciómetro. São utilizados para monitorizar movimentos em juntas de dilatação, fornecendo dados críticos sobre a mobilidade e ajustes estruturais da ponte.
- Acelerómetros: São sensores que medem acelerações em várias direções, instalados para monitorizar as vibrações induzidas pelo tráfego e determinar as frequências modais da estrutura. Assim, são essenciais para a análise dinâmica.
- Sensores de corrosão: medem a resistividade e a taxa de corrosão em componentes metálicos, sendo essenciais para monitorizar a durabilidade e a integridade de elementos de aço, prevenindo as falhas devidas à corrosão.
- Sensores de fibra ótica: estes sensores utilizam a alteração nas propriedades da luz para medir várias grandezas físicas, tais como deformações, temperaturas e vibrações. São muito utilizados para uma vasta gama de medições, incluindo distribuição de deformações, curvaturas médias, configurações deformadas dinâmicas e modos de vibração.

Estes aparelhos representam apenas um subconjunto do equipamento utilizado na monitorização de pontes. A integração destas tecnologias permite que os engenheiros adquiram uma visão abrangente da integridade estrutural da ponte e tomem medidas proativas para garantir a segurança e a durabilidade durante a vida útil da estrutura.

3.2 Aplicação de telemóvel para monitorização de pontes

A utilização de telemóveis para monitorizar estruturas é uma alternativa economicamente acessível, face aos equipamentos tradicionais de monitorização, que têm custos mais elevados. Os telemóveis atuais estão equipados com vários tipos de sensores, tais como acelerómetros, giroscópios, termómetros e GPS, sendo capazes de registar vários dados essenciais na análise da integridade de pontes. Com os constantes avanços nas tecnologias de telemóveis, estes dispositivos incluem ferramentas sofisticadas que permitem a recolha dos dados necessários para o diagnóstico da condição estrutural. Para um resumo da tecnologia dos sensores de telemóveis e a sua aplicação em SHM recomenda-se a consulta de Malekloo et al. (2022). A dimensão compacta dos telemóveis permite a sua fácil instalação em diferentes locais da ponte, enquanto a sua acessibilidade devido ao seu custo reduzido torna possível a utilização de vários dispositivos a realizar medições em locais diferentes e em simultâneo. A conectividade dos telemóveis a redes móveis ou Wi-Fi permite a transmissão dos dados em tempo real para servidores remotos para análise e deteção automática de anomalias. Adicionalmente, a câmara do dispositivo pode ser utilizada para capturar fotos ou vídeos de fendas, corrosão, deterioração ou outras irregularidades, e os *drones* podem auxiliar a alcançar locais de difícil acesso. O telemóvel pode ser colocado, por exemplo, na superfície do tabuleiro ou sobre um cabo e, através do seu acelerómetro, medir as vibrações (Figueiredo et al., 2022). Os estudos conduzidos em laboratório e na ponte XingHai Bay Bridge na China (Zhao et al., 2015) demonstraram a viabilidade do uso de telemóveis na medição das forças internas dos cabos após um sismo, tendo sido comparados favoravelmente com medições realizadas com acelerómetros tradicionais.

De forma a realizar medições com telemóveis, é necessário instalar aplicações de criadas especificamente para SHM. Alguns exemplos incluem as aplicações CS4SHM e Orion-CC para dispositivos com sistema operativo iOS, e a App4SHM (Figueiredo et al., 2022), que foi utilizada na realização das medições apresentadas no Capítulo 4, e está disponível tanto para dispositivos com sistema operativo Android como para iOS.

3.2.1 App4SHM

A App4SHM (Figura 3.4) é uma aplicação de telemóveis desenvolvida para SHM na Universidade Lusófona – Centro Universitário de Lisboa, sendo compatível com os sistemas operativos iOS 11 e Android 10 (ou versões posteriores). Desenvolvida com a linguagem de

programação Kotlin, a arquitetura da aplicação divide-se em dois componentes principais: a aplicação móvel e uma plataforma computacional hospedada num servidor externo ao dispositivo móvel. Esta aplicação utiliza o acelerómetro do telemóvel para medir as vibrações da estrutura onde este é colocado e estimar as frequências naturais. Estas medições são depois comparadas com um conjunto de dados de referência utilizando um algoritmo de aprendizagem automática. Através da realização de várias medições, fica armazenada uma base de dados de referência, treinada para reconhecer dano em tempo quase real (Figueiredo et al., 2022). Devido às limitações do acelerómetro do telemóvel, a aplicação não consegue medir frequências superiores a 20 Hz.

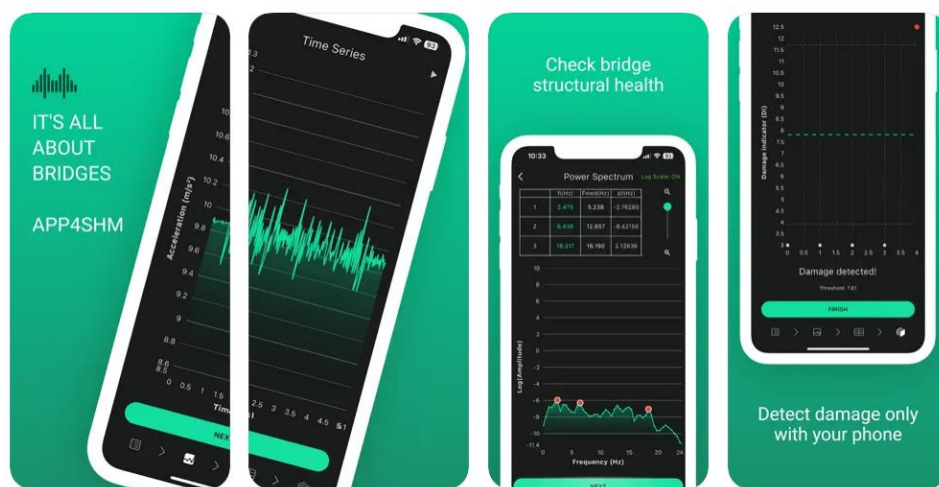


Figura 3.4 – App4SHM.

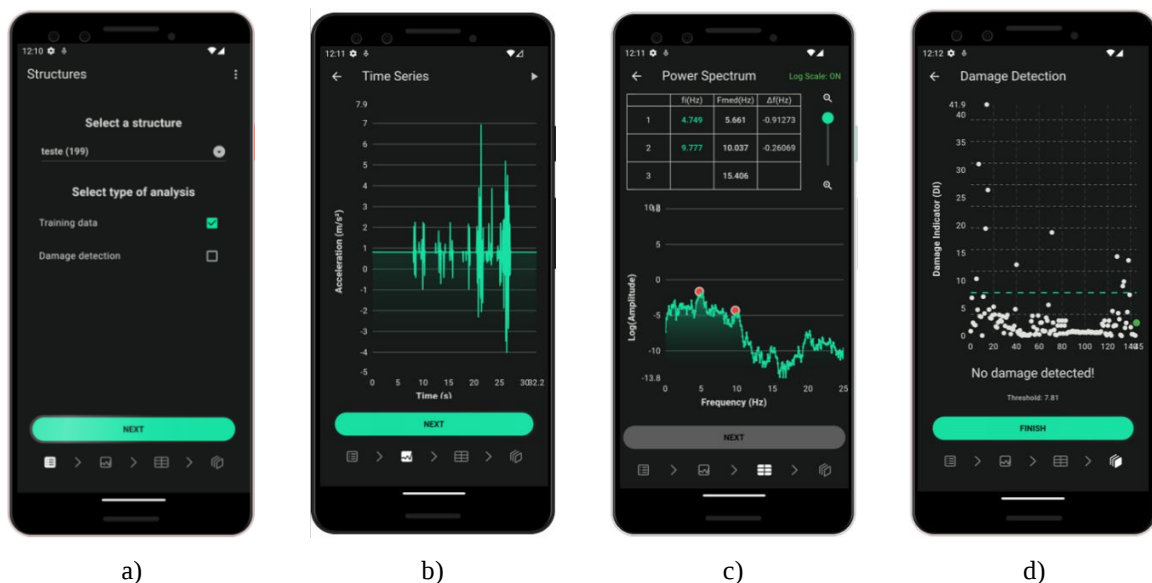


Figura 3.5 - Procedimento das medições de Frequências Naturais na App4SHM.

A navegação na aplicação está organizada em quatro separadores que representam as etapas 2 a 5 do processo de deteção de danos: Identificação da estrutura, Aquisição de dados, Extração de características e Deteção de dano (Figura 3.5). Em particular:

1. Definição do local: definir e posicionar o dispositivo no local onde pretende realizar as medições.
2. Identificação da estrutura: atribuir uma designação à estrutura para construção da base de dados, ou escolher uma pré-existente (Figura 3.5a).
3. Aquisição de dados: no tipo de análise (*Select type of analysis*), escolher a opção *Training data* (treinar dados) e realizar uma série de medições no local escolhido que serão utilizados para treinar a base de dados para a estrutura (Figura 3.5a,b).
4. Extração de características: após cada medição realizada, é exibido um espectro de potências gerado a partir da série temporal medida. Neste, selecionam-se as três primeiras frequências naturais de vibração da estrutura, correspondendo em geral aos picos do espectro (Figura 3.5c).
5. Deteção de dano: depois de a base de dados estar treinada com base nas medições realizadas, é possível realizar deteção de dano (opção *Damage detection* na Figura 3.5a). No modo de deteção de dano, realiza-se uma nova medição no mesmo local e o sistema compara com os dados registados anteriormente se existem diferenças significativas (acima de 5%) que possam ser indicativas de dano da estrutura. A aplicação apresenta um gráfico com todas as medições (Figura 3.5d) e uma linha horizontal que indica a separação entre dados com e sem dano. Se for detetado dano, a medição encontra-se acima da linha e é representada com cor vermelha; caso contrário, a medição situa-se abaixo da linha e é representada com cor verde.

A Figura 3.6 ilustra a arquitetura do sistema da App4SHM, que inclui a aplicação móvel e o servidor. Na parte superior estão representados os quatro separadores da aplicação: Identificação da estrutura, Aquisição de dados, Extração de características e Deteção de dano. Cada um destes separadores corresponde a uma etapa específica no processo de monitorização da integridade estrutural. O servidor, representado na parte de baixo da figura, é responsável por realizar as operações computacionais intensivas e armazenar os conjuntos de dados

relevantes. A comunicação entre a aplicação móvel e o servidor é essencial para a execução das operações de análise e armazenamento de dados, garantindo que o processamento destes e a deteção de dano possam ser realizados de modo eficiente e em tempo útil.

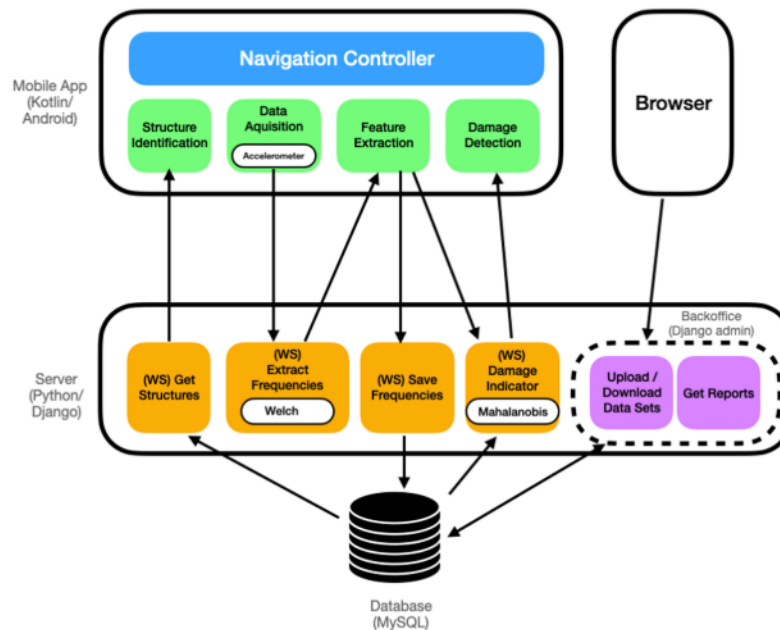


Figura 3.6 – Arquitetura do Software (Figueiredo et al., 2022).

A App4SHM foi idealizada para ser uma solução de baixo custo e acessível para a monitorização periódica de pontes sob condições operacionais e ambientais, podendo ser utilizada tanto em inspeções periódicas como em avaliações do estado da estrutura após a ocorrência de eventos catastróficos. A integração com o servidor permite que a aplicação beneficie de capacidades computacionais avançadas sem sobrecarregar o dispositivo móvel, mantendo a eficiência e a precisão necessárias para a deteção de dano na estrutura (Figueiredo et al., 2022).

4 Caso de Estudo: Ponte Edgar Cardoso

4.1 Descrição da ponte

A Ponte Edgar Cardoso (Figura 4.1), antigamente conhecida como Ponte da Figueira da Foz, está localizada no município da Figueira da Foz, sobre o rio Mondego, e liga a freguesia de Buarcos e São Julião à freguesia de São Pedro. Inaugurada em 1982 e projetada pelo engenheiro Edgar Cardoso, tem a particularidade de ser a primeira ponte de tirantes construída em Portugal.



Figura 4.1- Ponte Edgar Cardoso (RPS EDIÇÃO, 2022).

A ponte de Edgar Cardoso consiste numa estrutura mista de aço e betão, com um comprimento total de 1421 m. É constituída pelo encontro de dois viadutos e uma ponte principal. A ponte principal tem 405 m de comprimento, estando dividida num tabuleiro central com um vão de 225 m e dois tabuleiros laterais com 90 m (Figura 4.3). A laje do tabuleiro é de betão armado, com 20,6 m de largura e espessura variável (entre 0,13 m e 0,20 m), e inclui as faixas de rodagem, os passeios e as cornijas (Silva, 2020). O tabuleiro assenta sobre uma estrutura metálica composta por vigas principais, carlingas e longarinas (Figura 4.2). As vigas principais são compostas por duas vigas de alma cheia com 2,0 m de altura e com 1,0 m de espaçamento entre eixos. As vigas principais estão ligadas entre si por carlingas, cuja secção transversal é também de alma cheia e tem a mesma altura que as vigas principais. As quatro longarinas apoiam sobre as carlingas, sendo constituídas por perfis HE 600A com um afastamento de 3,2 m entre si. O tabuleiro é suportado por seis pares de tirantes contínuos, que divergem a partir do topo de duas torres (com 85 m de altura) e estão ancorados nas vigas

principais em secções espaçadas de 30 m. O vão central da ponte possui um tramo isostático com 30 m de comprimento que faz a ligação entre os tramos suspensos pelos tirantes (Silva, 2020).

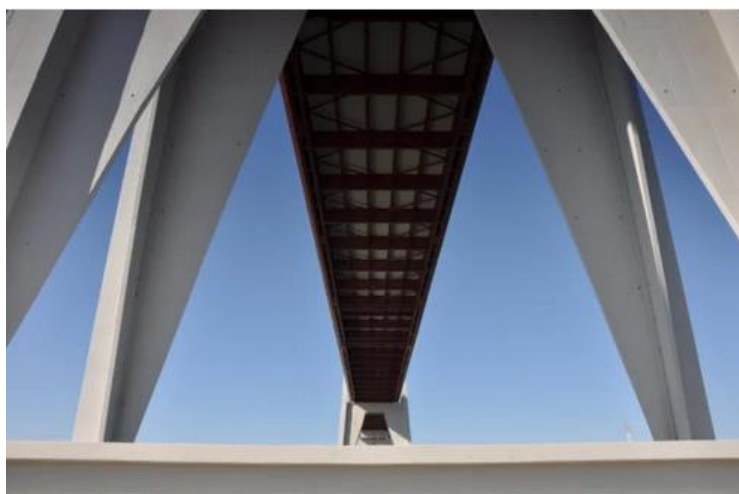


Figura 4.2 – Inferior do tabuleiro da ponte de Edgar Cardoso (Afonso, 2015).

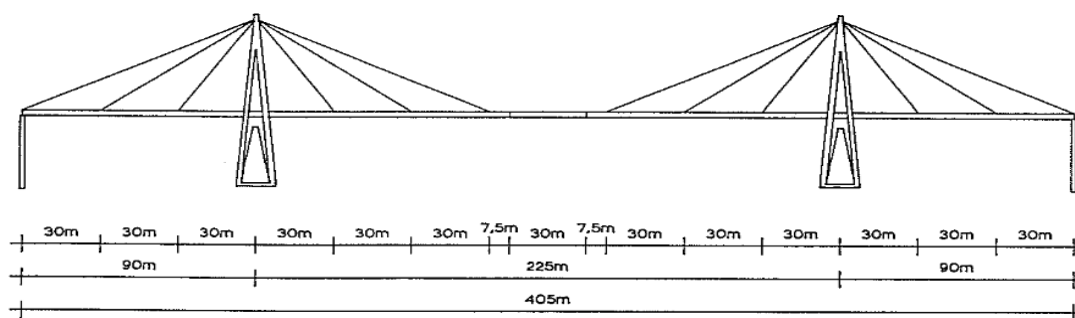


Figura 4.3 - Ilustração da Ponte Edgar Cardoso em alçado longitudinal (Costa et al., 1997).

As torres encontram-se apoiadas sob estacas moldadas *in situ*, com 4,2 m de diâmetro e um alargamento de 5 m na base, atingindo uma profundidade máxima de aproximadamente 45 m. As estacas estão dispostas numa configuração retangular e estão ligadas entre si por vigas de betão armado, conferindo estabilidade à fundação (Figura 4.4).

Os tirantes são formados por fios de aço de alta resistência com 5 mm de diâmetro, com uma tensão de rotura estimada entre 1600 e 1800 MPa. Os fios de aço estão protegidos por uma camada de fio de enrolamento e pintura (FEUP, 2021). Cada par de tirantes tem comprimentos diferentes, tendo-se atribuído a designação consoante o seu comprimento: L para os tirantes longos, M para os tirantes intermédios e C para os tirantes curtos. No Quadro 4.1 são apresentadas as características geométricas e físicas dos tirantes.



Figura 4.4 – Fundações das torres da Ponte Edgar Cardoso (Afonso, 2015).

Quadro 4.1 – Características mecânicas dos tirantes (Costa et al., 1997).

Tirantes	Comprimento (m)	N.º de fios de aço de 5 mm	Área (m ²)	Massa da secção transversal (kg/m)	Massa estimada do revestimento (kg/m)	Massa total (kg/m)
L	100,62	900	176,72	138,7	9,4	148,1
M	75,00	540	106,03	83,2	8,2	91,4
C	54,08	390	76,58	60,1	7,1	67,2

4.2 Estudos e intervenções realizados

A importância histórica da ponte Edgar Cardoso no contexto da engenharia de estruturas em Portugal justifica a importância crítica da sua manutenção e preservação. Esta necessidade reflete-se nos diversos estudos, ensaios e intervenções a que a ponte foi submetida ao longo dos últimos 20 anos (Rito et al., 2021).

Os primeiros estudos e ensaios realizados na ponte Edgar Cardoso foram executados *in situ* pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) em 1997, 15 anos após a abertura da ponte ao tráfego. Estes estudos consistiram na medição das vibrações provocadas pelas ações do tráfego e do vento para determinação das características dinâmicas da ponte (Costa et al., 1997). Durante os ensaios a passagem do tráfego foi considerada como “moderada” a “baixa” (com um elevado número de veículos pesados a circular a velocidade “média” a “elevada”), enquanto se verificou que o vento era de “fraca” intensidade. Com base nestas ações, a excitação dos modos da ponte com deslocamentos verticais foi predominante face aos modos com deslocamentos segundo as outras direções. Neste estudo foram também

verificados deslocamentos longitudinais nas juntas entre o vão central simplesmente apoiado e as zonas do tabuleiro adjacentes, e o aparecimento de ferrugem nos elementos estruturais metálicos (ver Figura 4.5).

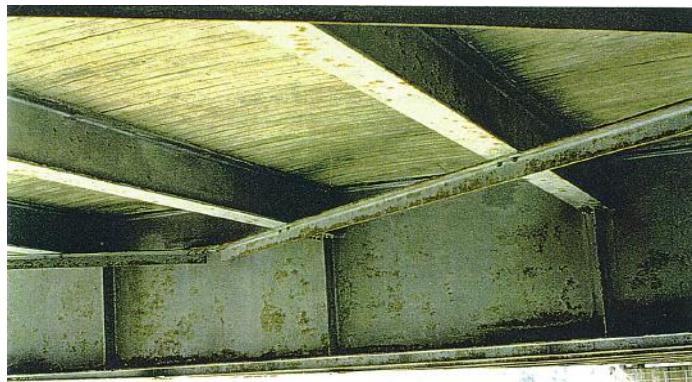


Figura 4.5– Elementos estruturais metálicos com ocorrência de ferrugem (Costa et al., 1997).

Entre 2003 e 2006 foram realizadas obras de reabilitação da ponte, com base nos estudos feitos entre 1997 e 2001. A intervenção na ponte envolveu a reabilitação dos tirantes, a substituição e reforço do sistema de ancoragem do tabuleiro nos pilares de transição, o reforço das torres, a reparação de elementos metálicos e em zonas de ligação dos perfis metálicos à laje de betão do tabuleiro (ver Figura 4.6). Para além disso, nos viadutos de acesso realizou-se o reforço das vigas do tabuleiro e o controlo sísmico dos viadutos (Infraestruturas de Portugal, 2022).



Figura 4.6 – Reabilitação da ponte até 2006 (Ulma, 2018).

No final de 2015 iniciaram-se as obras de reabilitação e reforço dos elementos estruturais de betão, decorrentes de uma análise visual onde foram identificados sinais de degradação dos cilindros onde apoiam as torres da ponte. Estes apoios apresentavam fissuração, em alguns casos acompanhada de eflorescências e escorrência devido à corrosão

das armaduras passivas. Verificou-se ainda uma taxa elevada de penetração de cloretos no betão. Os trabalhos envolveram a remoção do betão superficial até a superfície lateral dos varões de aço ficar exposta, a limpeza destas superfícies e o seu revestimento com microbetão auto-compactável e com retração controlada. Os trabalhos foram concluídos em 2016 (Marques, 2016).

Em 2020 o LNEC realizou um novo estudo, solicitado pela Infraestruturas de Portugal (IP), para realizar a caracterização aerodinâmica da ponte Edgar Cardoso. O estudo consistiu num conjunto de ensaios de um modelo reduzido do tabuleiro da ponte (escala 1:50) colocado num túnel de vento, com o objetivo de se determinarem os coeficientes aerodinâmicos do tabuleiro e se estudar a sua estabilidade aerodinâmica (Silva, 2020). O modelo reduzido, conforme ilustrado na Figura 4.7, reproduz o tabuleiro com as vigas longitudinais e transversais, as carlingas e a laje, bem como a cornija e os guarda-corpos. Com este estudo, para além da determinação dos coeficientes aerodinâmicos de arrastamento, de sustentação e de momento de picada, foi possível concluir que (i) não se verificam situações de instabilidade aerodinâmica, (ii) não há instabilidade por galope e (iii) ocorrem deslocamentos de flexão para velocidades do vento consideradas como frequentes, associados ao desprendimento de vórtices no tabuleiro.

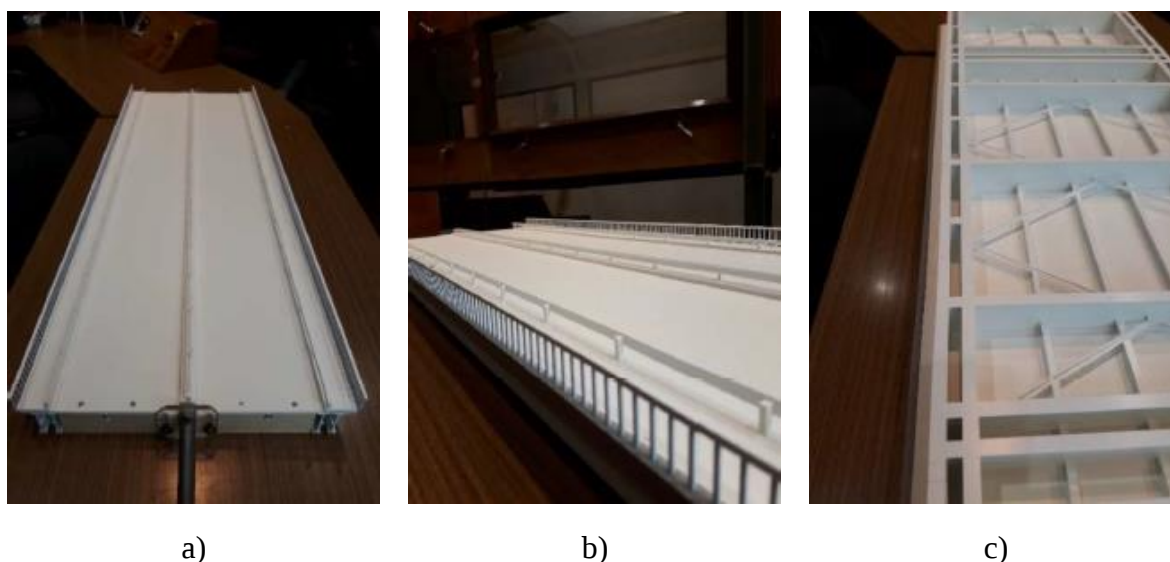


Figura 4.7 – Modelo reduzido de uma parte do tabuleiro da ponte Edgar Cardoso (Silva, 2020).

Em 2021, o Laboratório de Vibrações e Monitorização de Estruturas (VIBEST) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto realizou uma campanha de ensaios

dinâmicos aos tirantes da ponte Edgar Cardoso, também por solicitação da IP (FEUP, 2021). Na inspeção visual realizada verificou-se sujidade e degradação da pintura dos tirantes, incluindo o aparecimento de líquenes (ver Figura 4.8). Foram identificados também fios partidos na zona de ancoragem ao tabuleiro e deposição de resíduos junto às aberturas para passagem dos tirantes – devido a isto, em 2020 realizou-se o isolamento das ancoragens com revestimento do tirante com uma manga plástica na zona da ancoragem, de modo a impedir a drenagem de água e a acumulação de mais resíduos (ver Figura 4.9 - Ancoragem das pontes protegidas por uma manga plástica.). Note-se que estas observações tinham já sido reportadas em relatórios de 2018, 2019 e 2020.



a)



b)

Figura 4.8 – Condição dos tirantes em 2024.



a)



b)

Figura 4.9 - Ancoragem das pontes protegidas por uma manga plástica.

As medições foram realizadas com um acelerómetro piezoelétrico, com a aquisição e o processamento feitos por um analisador de Fourier portátil. A fixação do acelerómetro ao tirante realizou-se através de uma base magnética e de forma que as medições fossem realizadas no plano vertical e na direção perpendicular ao eixo do tirante. As estimativas das forças nos tirantes, obtidas através das frequências medidas e da Eq. (2.6), foram comparadas com as obtidas em ensaios realizados em 2016, 2018, 2019 e 2020. As diferenças percentuais registadas foram, em geral, muito baixas (entre 1% e 3%).

As inspeções dos tirantes, realizadas anualmente desde 2016, evidenciaram uma evolução significativa do número de fios partidos ou com redução de tensão nos vários tirantes. Dado que a inspeção visual apenas permite avaliar a integridade dos fios visíveis, existe uma grande incerteza sobre os fios partidos ou com tensão insuficiente no interior dos cabos. Para além disso, a degradação dos cabos tem tendência a aumentar com a redistribuição de tensões pelos fios em serviço (Infraestruturas de Portugal, 2022). Deste modo, a IP tomou a decisão de proceder à substituição integral do sistema de tirantes, dotando assim a ponte de uma segurança acrescida. A substituição será realizada de forma progressiva, com um par de tirantes de cada vez, devido a condicionamentos técnicos (espaço disponível para colocação dos tirantes novos enquanto os restantes continuam em serviço) e de segurança. A solução adotada prevê também a substituição das selas situadas no topo das torres, que garantem a continuidade dos tirantes, por blocos de ancoragem dos tirantes, tirando assim partido dos benefícios dos sistemas de tirantes modernos, i.e., melhorias no comportamento à fadiga, melhor caracterização das vibrações e melhoria das condições de impermeabilização e retardamento da degradação provocada pela água (Rito et al., 2021).

4.3 Medição das frequências dos tirantes

De forma a demonstrar a aplicabilidade da App4SHM, nos dias 13 de setembro de 2023 e 17 de janeiro de 2024 foram realizadas visitas por uma equipa da Universidade Lusófona, abrigo de um protocolo entre a Universidade Lusófona e a IP. Durante estas visitas foram conduzidos ensaios dinâmicos em vibração ambiental sobre a ponte, com o objetivo de testar e comparar a App4SHM com os sistemas tradicionais de monitorização.

As medições das frequências foram realizadas nos tirantes do lado Este/Nascente da ponte, nos tirantes designados por “Longo” e “Médio”, conforme ilustrado na Figura 4.10. Os

quatro tirantes foram designados por L-S, M-S, L-N e M-N, onde as letras “L” e “M” referem-se ao comprimento dos cabos, respetivamente, longo e médio, e as letras “N” e “S” dizem respeito ao lado em que o cabo está situado, respetivamente, Norte e Sul.

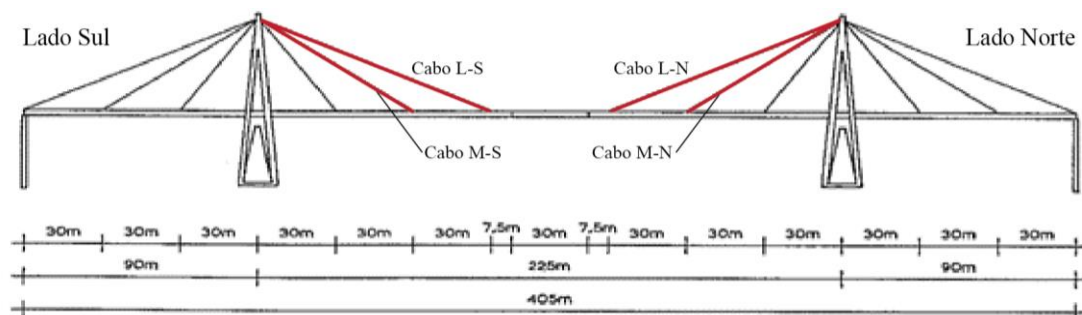


Figura 4.10 – Plano de monitorização (alçado longitudinal visto de montante para jusante).

As medições foram realizadas com telemóveis diferentes, tanto com sistema operativo Android como iOS. Na Figura 4.11 mostra-se o posicionamento do telemóvel num dos tirantes para aquisição das séries temporais de acelerações e as frequências naturais de vibração. O telemóvel foi colocado sobre cada tirante e amarrado de forma a evitar a sua queda e outros movimentos que possam influenciar negativamente as medições. Cada observação consiste na aquisição de dados ao longo de cerca de 90 s e resulta num conjunto das três primeiras frequências de vibração do tirante. Estas frequências são escolhidas com base no procedimento descrito na Secção 3.2.1. Todas as medições realizadas foram posteriormente tratadas e utilizadas para estimar as forças nos tirantes.



a)



b)

Figura 4.11 – Posicionamento do telemóvel no tirante para medição das frequências (Figueiredo et al., 2024).

No dia 27 de março de 2024 realizou-se uma nova visita à ponte para realização de mais medições. As condições climáticas adversas, marcadas por ventos fortes e chuva intensa, inviabilizaram a realização de medições nos tirantes da ponte. Por outro lado, foi possível realizar medições sobre o tabuleiro, embora não sejam objeto de estudo neste trabalho (Figura 4.12). Durante esta visita, foi estabelecido contacto com a empresa responsável pelas obras de substituição dos tirantes, a Mota-Engil SGPS. A empresa forneceu informações pertinentes relativas às cargas adicionais aplicadas na ponte, fazendo notar que em setembro de 2023 foram colocados separadores *New Jersey*, e em janeiro de 2024 foram colocadas plataformas com cerca de 500 kg junto aos tirantes para facilitar o acesso dos trabalhadores.



Figura 4.12 – Medição das frequências do tabuleiro da ponte.

4.4 Cálculo das forças nos tirantes

As forças nos tirantes foram calculadas com base na Eq. (2.6), i.e.,

$$T = 4mL^2 \left(\frac{f_n}{n} \right)^2, \quad (4.1)$$

onde as várias grandezas foram já definidas anteriormente. Na verdade, tendo sido realizadas várias medições, dispõe-se de uma série de valores para cada uma das primeiras três frequências de vibração de cada tirante da ponte. Seja $f_n^{(i)}$ a i -ésima observação da n -ésima frequência, com $i = 1, \dots, k$ e $n = 1, 2, 3$, sendo k o número de observações válidas realizadas, i.e., removendo quaisquer *outliers* dos dados recolhidos. A abordagem adotada consiste em calcular a n -ésima frequência média e calcular a força correspondente T_n pela Eq. (4.1), i.e.,

$$T_n = 4mL^2 \left(\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{f_n^{(i)}}{n} \right)^2. \quad (4.2)$$

Note-se que esta abordagem permite reduzir o impacto da aleatoriedade dos erros cometidos durante as medições. Após o cálculo das forças associadas às três primeiras frequências de vibração, efetua-se a média destes valores para se obter a estimativa da força em cada tirante.

Relativamente à deteção de *outliers*, realizou-se a normalização de cada uma das frequências, através de

$$z_n^{(i)} = \frac{f_n^{(i)} - \bar{f}_n}{s_n}. \quad (4.3)$$

em que $\bar{f}_n$ é o valor médio e s_n o desvio-padrão para a frequência n . Nestas condições, as frequências normalizadas passam a seguir uma distribuição Normal standard, ou seja, com valor médio $\mu = 0$ e desvio-padrão $\sigma = 1$. Esta transformação permite identificar com facilidade os *outliers* com base na sua distância ao valor médio em função do desvio-padrão. Assim, considera-se que uma frequência é um *outlier* se a distância do seu valor normalizado $z_n^{(i)}$ ao valor médio ultrapassar, em valor absoluto, z_{lim} vezes o desvio-padrão, ou seja,

$$\left| z_n^{(i)} - \mu \right| < z_{lim} \sigma. \quad (4.4)$$

Tratando-se de uma distribuição Normal standard ($\mu = 0$ e $\sigma = 1$), a Eq. (4.4) assume uma forma mais simples, i.e.,

$$\left| z_n^{(i)} \right| < z_{lim}, \quad (4.5)$$

sendo assim apenas necessário comparar o valor absoluto da frequência normalizada com um valor limite, z_{lim} , definido *a priori*. Neste trabalho adotou-se o valor $z_{lim} = 3$, ou seja, a frequência é um *outlier* se o seu valor normalizado estiver a uma distância do valor médio superior a três vezes o desvio-padrão – considerando a normalidade dos dados, a probabilidade de um valor distar mais do que três vezes o desvio-padrão do valor médio é aproximadamente 0,27%. Importa referir que este método foi aplicado a cada uma das frequências em separado, i.e., sem considerar a sua correlação, uma vez que o processo de seleção das frequências na App4SHM é muito propenso a erros do utilizador quando se escolhe a frequência no ecrã do telemóvel. De qualquer forma, sempre que pelo menos uma das frequências de uma dada

observação foi identificada como *outlier*, excluíram-se todas as frequências relativas a essa observação.

4.4.1 Análise dos resultados

As frequências medidas com a App4SHM encontram-se no Quadro A.1 ao Quadro A.4 no Apêndice A, onde se apresenta também a sua normalização e os *outliers* identificados. No Quadro 4.2 ao Quadro 4.5 indicam-se as estimativas das três primeiras frequências de vibração e das forças nos tirantes para três momentos no tempo: 2021 (FEUP, 2021), 13 de setembro de 2023 e 22 de janeiro de 2024. Nestes Quadros apresentam-se também as diferenças relativas, em percentagem, das estimativas das frequências e das forças nos tirantes, determinadas relativamente ao momento precedente de leitura através de

$$\delta_f = \frac{f_{n,act} - f_{n,prec}}{f_{n,prec}} \times 100\% \quad (4.6)$$

e

$$\delta_T = \frac{T_{n,act} - T_{n,prec}}{T_{n,prec}} \times 100\% \quad (4.7)$$

em que os índices inferiores “*act*” e “*prec*” indicam, respetivamente, a grandeza medida no momento atual e precedente.

Na Figura 4.13 à Figura 4.16 mostram-se os gráficos das frequências medidas em 13 de setembro de 2023 e 22 de janeiro de 2024 para cada um dos tirantes. Em particular, os gráficos a), b) e c) de cada Figura representam as frequências medidas no espaço bidimensional, comparando-as duas a duas. Esta representação foi adotada em detrimento de uma representação tridimensional no espaço das frequências devido à facilidade de leitura e interpretação de gráficos bidimensionais. Os gráficos indicados por d) mostram as observações das três primeiras frequências de vibração ao longo do tempo. Os *outliers* são sempre representados por símbolos não coloridos.

Com base nos resultados obtidos e apresentados, tanto no Quadro 4.2 ao Quadro 4.5 como na Figura 4.13 à Figura 4.16, verifica-se um aumento generalizado das frequências e, consequentemente, das forças nos cabos de 2021 para 2023. O tirante L-N sofreu o menor aumento, apresentando em 2023 uma força estimada de 9494 kN, correspondente a um aumento de 4,2%. Por outro lado, o maior aumento (5,6%) ocorreu no tirante L-S, cuja força estimada em 2023 é de 10021 kN. Estes resultados validam a hipótese de que ocorreu um

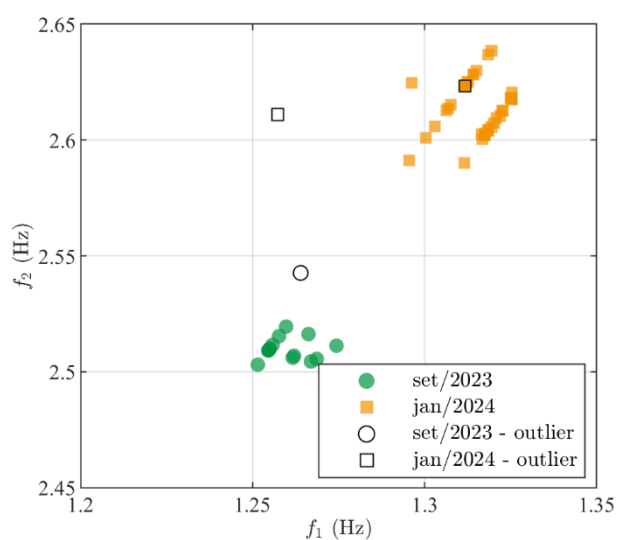
acréscimo de massa no tabuleiro da ponte, decorrente dos equipamentos existentes para a execução das obras em curso e, em particular, da colocação dos separadores *New Jersey*, que foram instalados como medida de segurança entre as faixas de rodagem e a zona da obra. Naturalmente, embora as frequências e forças nos cabos tenham aumentado devido ao acréscimo de massa no tabuleiro da ponte, as frequências naturais de vibração do próprio tabuleiro sofreram uma redução (Figueiredo et al., 2024).

Relativamente a 2024, os resultados evidenciam uma estabilização das forças nos tirantes M-N e L-S, estimando-se aumentos das forças abaixo de 2% em ambos. Por outro lado, nos tirantes L-N e M-S verificou-se um aumento de forças face a 2023, destacando-se o tirante L-N com um aumento de 8,3%. Esta diferença significativa deve-se à colocação de plataformas amovíveis junto da zona de ancoragem do tirante, conforme referido anteriormente, para ser possível aceder à zona inferior do tabuleiro.

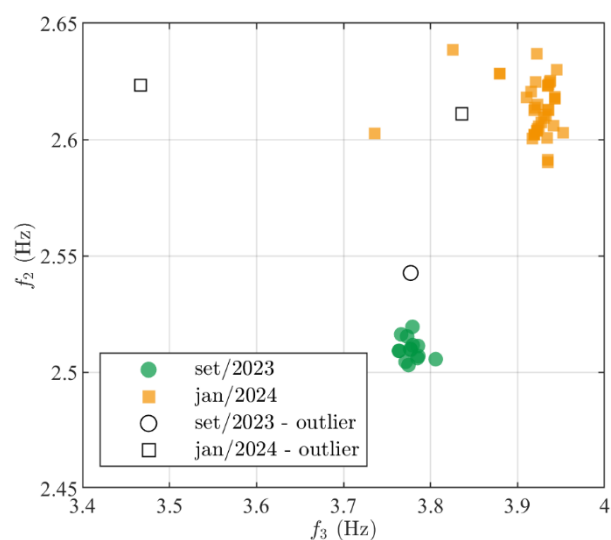
Em nota final, importa referir que os *outliers* identificados nas observações e removidos da análise tiveram alguma influência nos resultados obtidos das forças nos cabos. No entanto, uma análise atenta dos gráficos apresentados na Figura 4.13 à Figura 4.16 permite identificar alguns pontos que poderiam também ser classificados como *outliers*. Por exemplo, os dois pontos a verde nas Figuras Figura 4.15b) e c) estão claramente afastados das restantes observações. Estas frequências poderiam ter sido consideradas como *outliers* caso tivesse sido utilizado outro valor limite para z_{lim} – e.g., se $z_{lim} = 2$, a probabilidade de um valor distar mais do que duas vezes o desvio-padrão é aproximadamente 2,28%, sendo ainda um suficientemente baixo e aceitável. No entanto, de forma a não reduzir demasiado o número de observações, optou-se por manter $z_{lim} = 3$.

Quadro 4.2 – Frequências médias e forças no tirante Longo Norte.

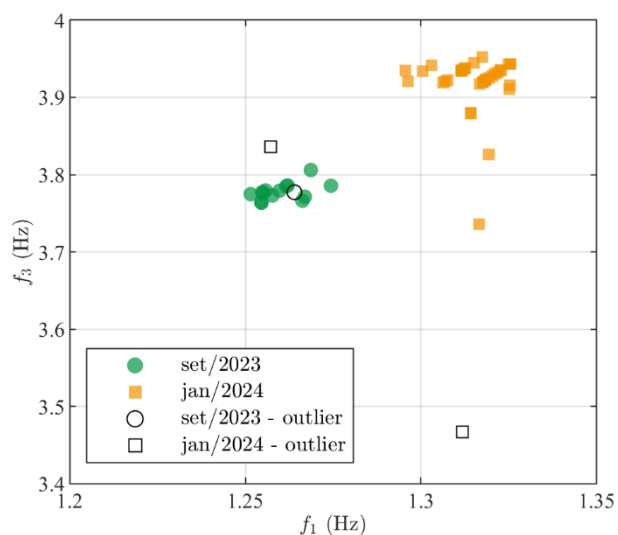
Modo	2021		13/set/2023				22/jan/2024			
	f_n (Hz)	T_n (kN)	f_n (Hz)	δ_f (%)	T_n (kN)	δ_T (%)	f_n (Hz)	δ_f (%)	T_n (kN)	δ_T (%)
1	1,237	9177	1,260	1,9	9526	3,8	1,315	4,4	10376	8,9
2	2,456	9044	2,510	2,2	9445	4,4	2,613	4,1	10241	8,4
3	3,700	9123	3,778	2,1	9510	4,2	3,919	3,7	10236	7,6
		9115			9494	4,2			10284	8,3



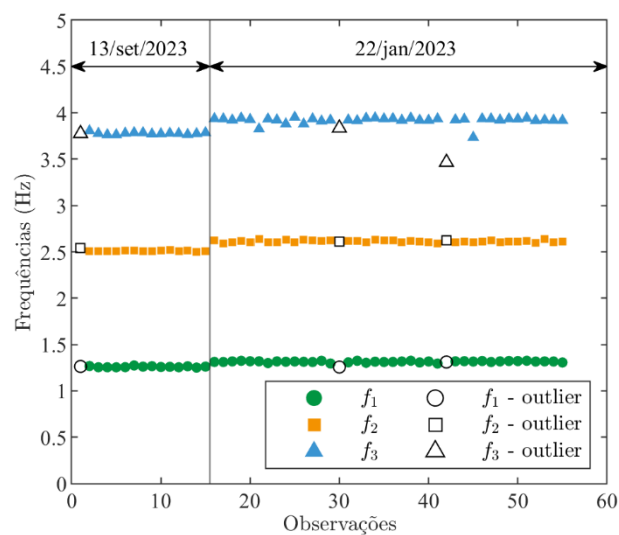
a)



b)



c)

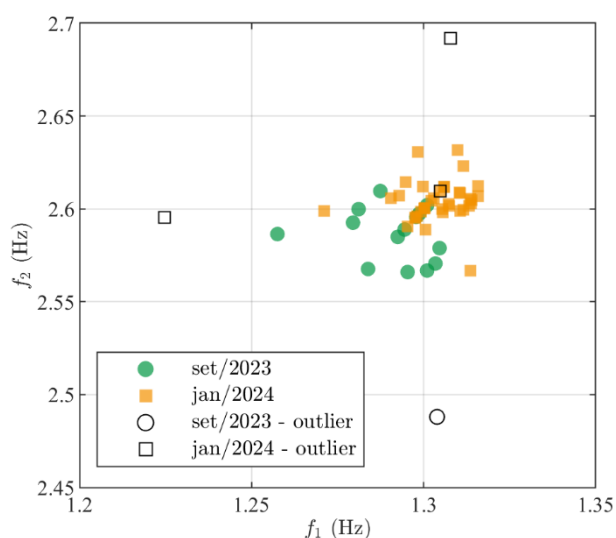


d)

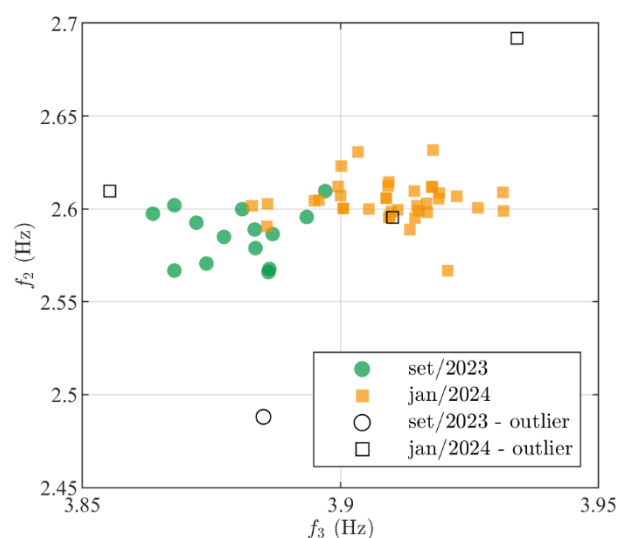
Figura 4.13 – Gráficos das frequências medidas no tirante Longo Norte.

Quadro 4.3 – Frequências médias e forças no tirante Longo Sul.

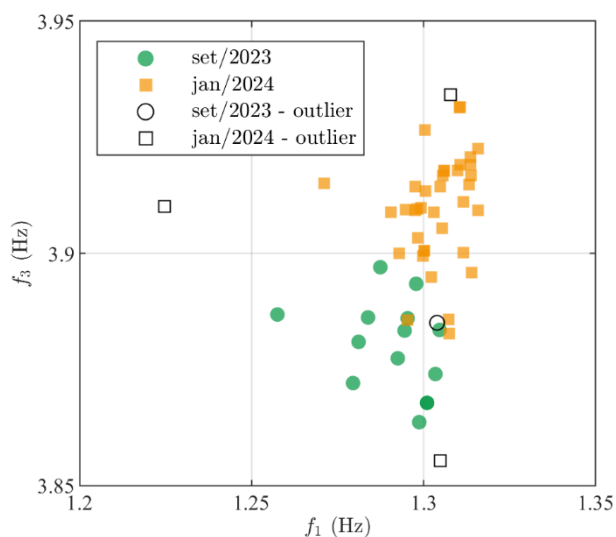
Modo	2021		13/set/2023				22/jan/2024			
	f_n (Hz)	T_n (kN)	f_n (Hz)	δ_f (%)	T_n (kN)	δ_T (%)	f_n (Hz)	δ_f (%)	T_n (kN)	δ_T (%)
1	1,256	9462	1,291	2,8	10001	5,7	1,304	1,0	10198	2,0
2	2,513	9469	2,586	2,9	10029	5,9	2,604	0,7	10168	1,4
3	3,781	9527	3,880	2,6	10032	5,3	3,910	0,8	10187	1,5
		9486			10021	5,6			10184	1,6



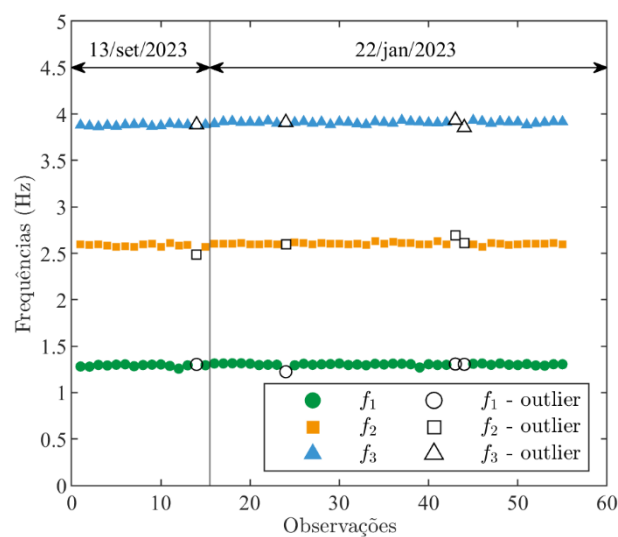
a)



b)



c)

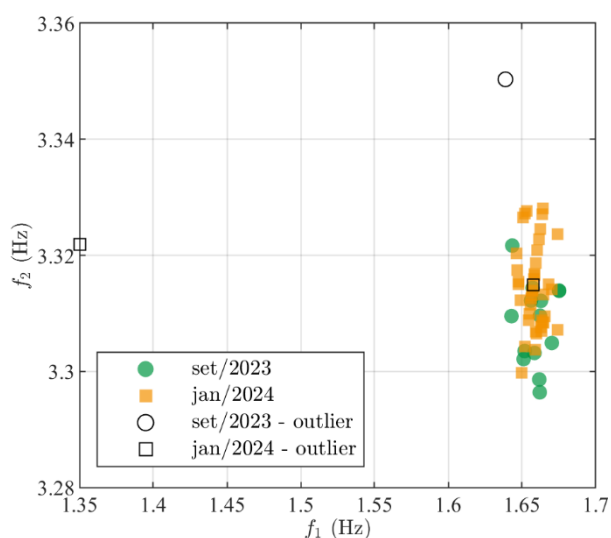


d)

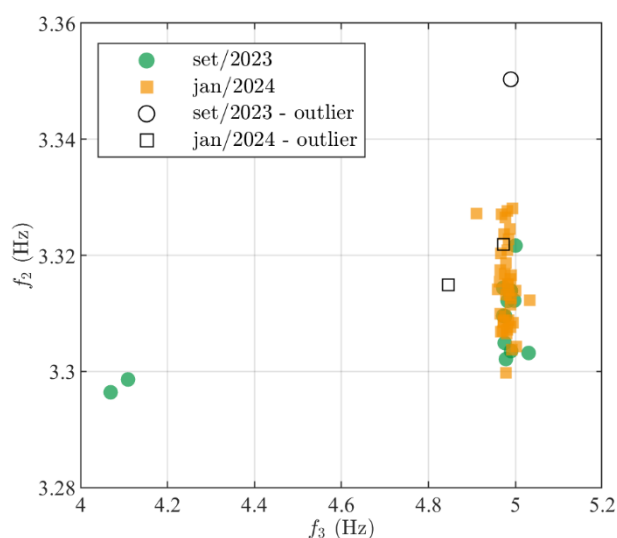
Figura 4.14 – Gráficos das frequências medidas no tirante Longo Sul.

Quadro 4.4 – Frequências médias e forças no tirante Médio Norte.

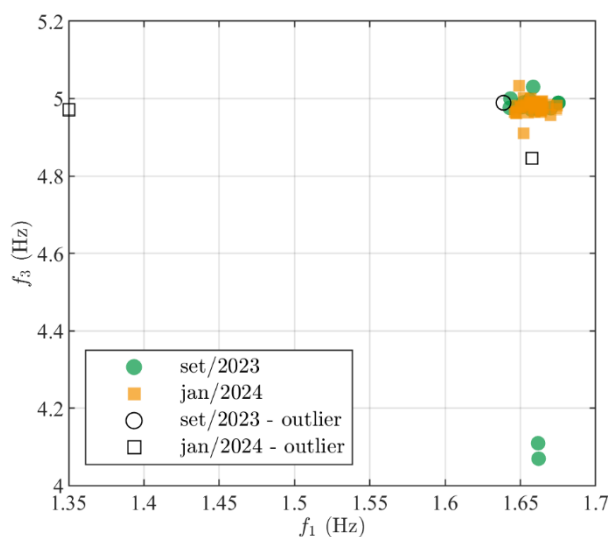
Modo	2021		13/set/2023				22/jan/2024			
	f_n (Hz)	T_n (kN)	f_n (Hz)	δ_f (%)	T_n (kN)	δ_T (%)	f_n (Hz)	δ_f (%)	T_n (kN)	δ_T (%)
1	1,600	5265	1,659	3,7	5662	7,5	1,659	0,0	5658	-0,1
2	3,219	5327	3,308	2,8	5627	5,6	3,315	0,2	5648	0,4
3	4,831	5333	4,859	0,6	5395	1,2	4,979	2,5	5666	5,0
		5308			5561	4,8			5657	1,7



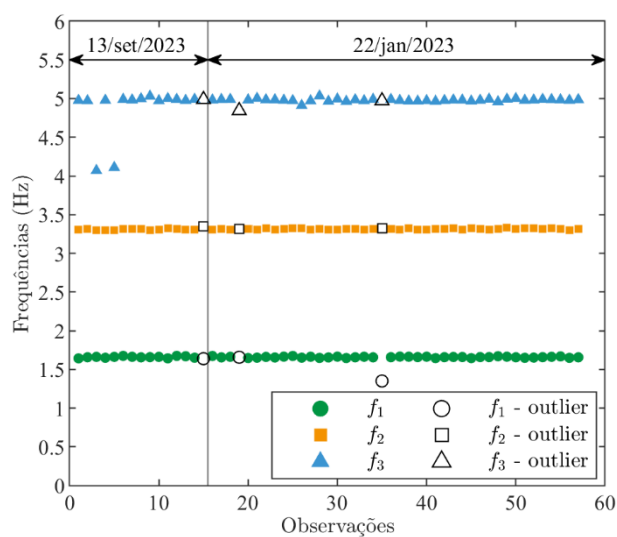
a)



b)



c)



d)

Figura 4.15 – Gráficos das frequências medidas no tirante Médio Norte.

Quadro 4.5 – Frequências médias e forças no tirante Médio Sul.

Modo	2021		13/set/2023				22/jan/2024			
	f_n (Hz)	T_n (kN)	f_n (Hz)	δ_f (%)	T_n (kN)	δ_T (%)	f_n (Hz)	δ_f (%)	T_n (kN)	δ_T (%)
1	1,581	5140	1,619	2,4	5391	4,9	1,665	2,8	5698	5,7
2	3,150	5101	3,243	3,0	5407	6,0	3,331	2,7	5704	5,5
3	4,744	5143	4,874	2,7	5428	5,5	5,007	-2,7	5728	5,5
		5128			5409	5,5			5710	5,6

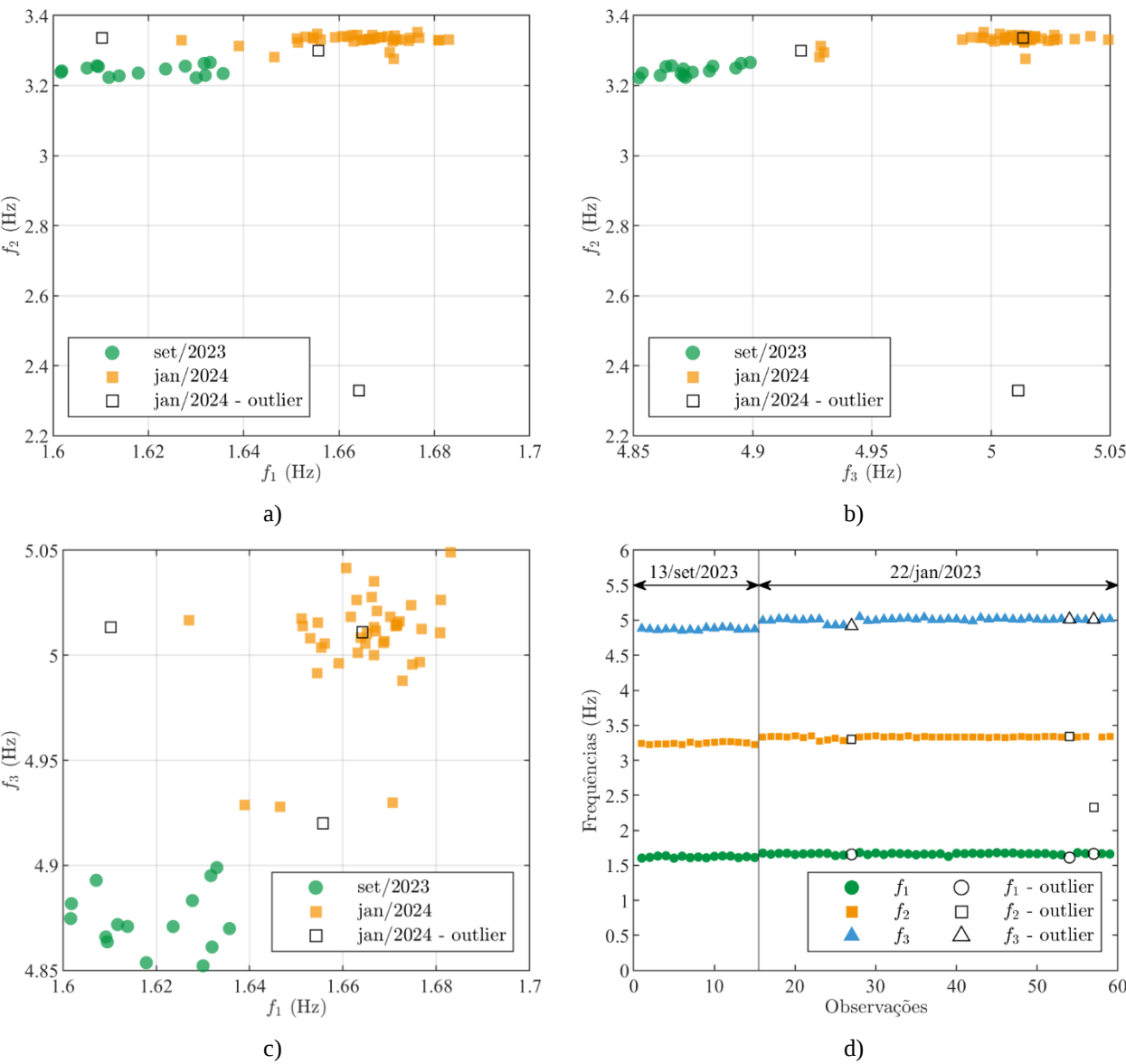


Figura 4.16 – Gráficos das frequências medidas no tirante Médio Sul.

5 Considerações finais

5.1 Conclusões

Neste trabalho foi avaliada a viabilidade do uso de telemóveis e da aplicação App4SHM como ferramentas de SHM para a medição das frequências naturais de vibração dos cabos de uma ponte de tirantes. Os valores medidos foram comparados com os obtidos por sistemas de monitorização tradicionais e, após validação, foram utilizados para calcular as forças a que os cabos estão sujeitos no momento das medições, utilizando a conhecida fórmula da teoria das cordas vibrantes.

O trabalho desenvolvido permite extrair as seguintes conclusões:

- (i) As frequências obtidas com a App4SHM em setembro de 2023 e janeiro de 2024 estão em concordância com as obtidas em 2021 com um sistema tradicional de monitorização.
- (ii) Verificou-se um acréscimo generalizado das frequências e, consequentemente, das forças nos tirantes, que é devido possivelmente ao aumento de massa no tabuleiro da ponte.
- (iii) O aumento de forças de 2021 para 2023 é semelhante em todos os cabos (entre 4,2% e 5,6%), o que permite validar a hipótese do aumento de massa no tabuleiro. Em particular, sabe-se que foram colocados separadores *New Jersey* ao longo de toda a ponte para permitir a realização das obras de substituição dos tirantes em segurança.
- (iv) De setembro de 2023 para janeiro de 2024, verificou-se que as forças nos tirantes M-N e L-S se mantiveram relativamente estáveis (estimaram-se aumentos abaixo de 2% em ambos). Por outro lado, nos tirantes L-N e M-S registou-se um aumento de forças, sendo de notar a diferença relativa de 8,3% para o tirante L-N. Este aumento é devido à colocação de plataformas amovíveis junto da zona da ancoragem do tirante.
- (v) Embora as diferenças relativas entre os valores observados ao longo do tempo não sejam muito elevadas (abaixo de 5% para as frequências e abaixo de 10% para as forças), as medições realizadas com a App4SHM mostraram-se consistentes e permitiram captar estas alterações nas frequências dos cabos. As medições

realizadas permitem assim validar a utilização de telemóveis na monitorização de pontes de tirantes, em particular nos seus cabos, sendo possível obter as forças instaladas nos cabos através de cálculos simples.

Em conclusão, o estudo reforça a importância da monitorização contínua da integridade estrutura de pontes e demonstra que a utilização de dispositivos móveis e algoritmos de aprendizagem automática podem ser uma abordagem eficaz e económica para realizar estudos rápidos e preliminares sobre as estruturas, de forma a garantir a sua segurança e durabilidade. Para além disso, a implementação destas tecnologias permite uma intervenção mais rápida e focada, contribuindo para a manutenção preventiva e redução de custos associados a reparos de emergência.

5.2 Desenvolvimentos futuros

O trabalho realizado constitui uma nova abordagem à monitorização da integridade estrutural e demonstrou resultados promissores na medição das frequências de cabos de pontes de tirantes. Assim, apontam-se os seguintes desenvolvimentos para trabalhos futuros:

- (i) O desenvolvimento mais imediato é a integração de um algoritmo dentro da App4SHM que calcule automaticamente as forças nos cabos, com base nas frequências medidas. Isto iria otimizar o processo e fornecer informação imediata aos utilizadores.
- (ii) Tendo sido identificados alguns *outliers* nas observações realizadas, deve procurar-se implementar métodos de deteção de *outliers* mais sofisticados, tais como algoritmos de aprendizagem automática para deteção de anomalias, que aprendem de forma adaptativa com novos conjuntos de dados e aumentam a sua precisão na identificação de *outliers*.
- (iii) Incorporar outros sensores disponíveis nos telemóveis, tais como os giroscópios e magnetómetros, de forma a se obter informação mais detalhada sobre os movimentos e vibrações da estrutura. Este desenvolvimento pode introduzir melhorias na precisão das medições das frequências e fornecer uma visão mais holística sobre o estado da estrutura.

- (iv) Desenvolver ferramentas para monitorização e previsão a longo prazo, e.g., incluindo análise de tendências e algoritmos preditivos que forneçam informação sobre potenciais problemas estruturais com base em dados históricos e/ou identificação padrões, prevenindo assim quaisquer falhas antes que estas ocorram.
- (v) Explorar a integração com *drones* para inspeções mais abrangentes. Ao se equipar o *drone* com o telemóvel ou sensores adicionais torna-se possível aceder a zonas com difícil acesso, obtendo-se assim um estudo mais completo da condição da estrutura.

Bibliografia

- Afonso, A. (2015). *As Pontes da minha Vida*. <https://pontesvida.wordpress.com/2015/03/09/59-ponte-edgar-cardoso-figueira-da-foz/> (acedido em 06/ago/2024)
- Agência Lusa. (2021). *20 anos desde a queda da Ponte Hintze Ribeiro: Presidente da República evoca a memória das 59 vítimas mortais*. <https://observador.pt/2021/03/04/20-anos-desde-a-queda-da-ponte-hintze-ribeiro-presidente-da-republica-evoca-a-memoria-das-59-vitimas-mortais/> (acedido em 06/ago/2024)
- Amorim, D., Barnoza, A., & Barbirato, J. (2012). Técnica de analogia de grelha associada a um modelo de pórtico para análise do comportamento de sistemas estruturais de pontes. *V Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas*.
- Andress, J. (2017). *11 Bridges Built by the Ancients That Are Still Used Today*. <https://www.destinationtips.com/attractions/11-bridges-built-ancients-still-used-today/> (acedido em 06/ago/2024)
- Botelho, J. (2008). *Utilização de cabos em pontes: Estudos paramétricos*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Caetano, E., & Cunha, Á. (2015). Dynamic testing of cable structures. *MATEC Web of Conferences* (Vol. 24), 01002.
- Campos, P. (2018). *Deteção de dano em pontes combinado algoritmos de aprendizagem, elementos finitos e monitorização estrutural*. Dissertação de Mestrado. Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias.
- Castanheira, B. (2012). *Comboio avariado na ponte 25 de Abril já foi rebocado*. <https://www.jn.pt/4942884114/comboio-da-ponte-25-de-abril-faz-esta-segunda-feira-25-anos-e-transportou-498-milhoes/> (acedido em 06/ago/2024)
- Castro, B. (2022). *10 curiosidades sobre a Ponte 25 de Abril*. <https://lisboasecreta.co/10-curiosidades-sobre-a-ponte-25-de-abril/> (acedido em 06/ago/2024)
- Costa, A. C., Rodrigues, J., Martins, A. (1997). Relatório – *Caracterização Dinâmica Experimental da ponte da Figueira da Foz*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil

- Mira, F. (2004). *The Bridge*. <https://www.flickr.com/photos/fhmira/3212745494/> (acedido em 06/ago/2024)
- FEUP (2021). *Determinação das forças instaladas nos tirantes da Ponte Edgar Cardoso na Figueira da Foz. Relatório Técnico*.
- Figueiredo, E. (2006). *Monitorização e avaliação do comportamento de Obras de Arte*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Figueiredo, E., Moldovan, I., Alves, P., Rebelo, H., & Souza, L. (2022). Smartphone Application for Structural Health Monitoring of Bridges. *Sensors*, 22(21), 8483. <https://doi.org/10.3390/s22218483>
- Figueiredo, E., Moldovan, I., & Barata Marques, M. (2013). *Condition Assessment of Bridges: Past, Present and Future. A Complementary Approach*. Universidade Católica Editora.
- Figueiredo, E., Moldovan, I., Peres, N., Silva Pinto, S., Alves, P., & Cabral, P. (2024). Smartphone application for structural health monitoring of stay cables: Edgar Cardoso Bridge. *Proceedings of EWSHM 2024 (7 Pages)*.
- Gorges, W. (2005). *Introdução à Engenharia de Pontes (apontamentos de aulas)* (pp. 1–27). <https://engenhariacivilfsp.files.wordpress.com/2015/02/pontes-cap-1-2-e-3.pdf> (acedido em 06/ago/2024)
- Graça, J. (2017). *Inspecção de um conjunto de pontes contribuição para o sistema de gestão municipal*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Coimbra.
- Infraestruturas de Portugal (2022). *Ponte Edgar Cardoso sobre o Rio Mondego substituição do sistema de tirantes*. <https://www.infraestruturasdeportugal.pt/sites/default/files/inline-files/Apresenta%C3%A7%C3%A3o%20Ponte%20Edgar%20Cardoso.pdf> (acedido em 06/ago/2024)
- Junceiro, P. (2018). *Ponte Vasco da Gama: 20 anos já passaram, ainda tem 100 pela frente*. <https://www.motor24.pt/especial/ponte-vasco-da-gama-20-anos-ja-passaram-ainda-tem-100-pela-frente/367474/> (acedido em 06/ago/2024)
- Karasinski, L. (2011). *Conheça o viaduto mais alucinante do mundo*. <https://www.tecmundo.com.br/transito/14911-conheca-o-viaduto-mais-alucinante-do-mundo.htm> (acedido em 06/ago/2024)

- Malekloo, A., Ozer, E., AlHamaydeh, M., & Girolami, M. (2022). Machine learning and structural health monitoring overview with emerging technology and high-dimensional data source highlights. In *Structural Health Monitoring* (Vol. 21, Issue 4, pp. 1906–1955). SAGE Publications Ltd. <https://doi.org/10.1177/14759217211036880>
- Marques, J. C. (2016). *Reabilitação da Ponte Edgar Cardoso*. <https://www.cimpor.com/documents/20124/231496/Reabilita%C3%A7%C3%A3o+da+Ponte+Edgar+Cardoso.pdf> (acedido em 06/ago/2024)
- Martins, N. (2009). *Estudo dos cabos e pendurais de uma pontes pedonal suspensa face ao seu processo construtivo*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Oglethorpe, M. (2023). *How was it built: the iconic Forth Bridge*. <https://blog.engineshed.scot/2023/04/18/building-the-forth-bridge/> (acedido em 06/ago/2024)
- Pinheiro, I. (2019). *Pontes: Descubra os 6 Principais Tipos de*. <https://www.inovacivil.com.br/pontes-conheca-os-principais-tipos/> (acedido em 06/ago/2024)
- Prandi, J. (2012). *A ponte em arco mais alta do mundo*. <https://gigantesdomundo.blogspot.com/2012/04/ponte-em-arco-mais-alta-do-mundo.html> (acedido em 06/ago/2024)
- Rito, A., Cabral, P., Xavier, L., & Abecasis, T. (2021). O Projecto de Substituição dos Tirantes da Ponte Edgar Cardoso. *Reabilitar & Betão Estrutural 2020*.
- Robert, J. L., Bruhat, D., & Gervais, J. P. (1991). Mesure de la tension des cables par methode vibratoire. *Bulletin de Liaison Des Laboratoires Des Ponts et Chaussees*, 173, 109–114.
- Rolão, P. (2021). *Ponte de Trajano: ode às Ninfas*. <https://nationalgeographic.pt/viagens/113-grandes-reportagens/2680-ponte-de-trajano> (acedido em 06/ago/2024)
- RPS EDIÇÃO. (2022). *Ponte da Figueira da Foz vai encerrar à noite a partir de fevereiro de 2023 devido às obras de reabilitação*. <https://radiosoure.pt/Ponte-Da-Figueira-Da-Foz-Vai-Encerrar-a-Noite-a-Partir-de-Fevereiro-de-2023-Devido-as-Obras-de-Reabilitacao/> <https://radiosoure.pt/ponte-da-figueira-da-foz-vai-encerrar-a-noite-a-partir-de-fevereiro-de-2023-devido-as-obras-de-reabilitacao/> (acedido em 06/ago/2024)

- Saramago, J. (2019). *Inspeção subaquática não deteta falhas de segurança na Ponte 25 de Abril*. <https://www.cmjornal.pt/sociedade/detalhe/inspecao-subaquatica-nao-deteta-falhas-de-seguranca-na-ponte-25-de-abril> (acedido em 06/ago/2024)
- Silva, F. (2020). Relatório 292/2020 – *Caracterização Aerodinâmica Da Ponte Atirantada Edgar Cardoso Na Figueira da Foz*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil
- thestructuralengineer.info. (2015). *The Collapse of Silver Bridge*. <https://www.thestructuralengineer.info/news/the-collapse-of-silver-bridge> (acedido em 06/ago/2024)
- Tukaj, N. (2021). *ArchDaily*. <https://www.archdaily.com/972023/pedestrian-bridge-in-jonava-architekturos-linija/6193fa379a957a665a21b5d5-pedestrian-bridge-in-jonava-architekturos-linija-photo> (acedido em 06/ago/2024)
- Ulma. (2018). *Ponte de Figueira da Foz, Lisboa, Portugal*. <https://www.ulmaconstruction.com.br/pt-br/projetos-construcao/Revitalizacao-manutencao/ponte-figueira-da-foz-portugal#scroll-down-link> (acedido em 06/ago/2024)
- Zhao, X., Han, R., Ding, Y., Yu, Y., Guan, Q., Hu, W., Li, M., & Ou, J. (2015). Portable and convenient cable force measurement using smartphone. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 5(4), 481–491. <https://doi.org/10.1007/s13349-015-0132-9>

A Freqüências medidas e normalizadas

Quadro A.1 – Freqüências medidas e normalizadas para o tirante Longo-Norte.

Data	Freqüências medidas (Hz)			Freqüências normalizadas			Outliers
	f_1	f_2	f_3	z_1	z_2	z_3	
13/set/2023	1,264	2,543	3,777	0,551	3,299	-0,048	X
	1,269	2,506	3,806	1,294	-0,697	2,748	
	1,255	2,510	3,777	-0,906	-0,261	-0,046	
	1,255	2,509	3,764	-0,942	-0,310	-1,360	
	1,255	2,509	3,764	-0,942	-0,310	-1,360	
	1,256	2,512	3,780	-0,749	-0,047	0,183	
	1,274	2,511	3,786	2,205	-0,084	0,772	
	1,262	2,506	3,785	0,186	-0,644	0,713	
	1,267	2,504	3,771	1,025	-0,819	-0,616	
	1,258	2,515	3,773	-0,449	0,360	-0,453	
	1,260	2,519	3,779	-0,121	0,804	0,150	
	1,255	2,510	3,777	-0,877	-0,221	-0,097	
	1,266	2,516	3,766	0,912	0,454	-1,115	
	1,252	2,503	3,775	-1,429	-0,969	-0,288	
	1,262	2,507	3,786	0,242	-0,555	0,816	
22/jan/2024	1,312	2,625	3,937	-0,119	0,965	0,388	
	1,311	2,590	3,934	-0,192	-2,050	0,356	
	1,318	2,604	3,922	0,398	-0,856	0,204	
	1,325	2,618	3,943	0,956	0,408	0,466	
	1,320	2,607	3,927	0,547	-0,556	0,268	
	1,319	2,639	3,826	0,473	2,176	-0,998	
	1,300	2,601	3,934	-1,138	-1,122	0,347	
	1,318	2,605	3,923	0,393	-0,797	0,211	
	1,314	2,628	3,880	0,036	1,281	-0,324	
	1,317	2,603	3,952	0,321	-0,943	0,581	
	1,314	2,628	3,880	0,036	1,281	-0,324	
	1,312	2,623	3,935	-0,183	0,833	0,360	
	1,325	2,618	3,911	0,975	0,380	0,061	
	1,296	2,625	3,921	-1,498	0,973	0,188	
	1,257	2,611	3,836	-4,820	-0,210	-0,868	X
	1,308	2,615	3,923	-0,523	0,137	0,211	
	1,325	2,620	3,916	0,988	0,599	0,122	
	1,303	2,606	3,941	-0,921	-0,678	0,442	
	1,315	2,630	3,945	0,111	1,435	0,489	
	1,312	2,624	3,935	-0,166	0,868	0,367	
	1,313	2,625	3,938	-0,092	1,020	0,400	
	1,318	2,602	3,920	0,324	-1,006	0,171	

Quadro A.1 (cont.) – Frequências medidas e normalizadas para o tirante Longo-Norte.

Data	Frequências medidas (Hz)			Frequências normalizadas			Outliers
	f_1	f_2	f_3	z_1	z_2	z_3	
22/jan/2024	1,325	2,618	3,943	0,995	0,350	0,463	
	1,307	2,614	3,920	-0,593	-0,005	0,180	
	1,318	2,602	3,920	0,324	-1,006	0,171	
	1,296	2,591	3,935	-1,548	-1,962	0,360	
	1,312	2,623	3,467	-0,175	0,851	-5,477	X
	1,319	2,606	3,925	0,473	-0,706	0,236	
	1,321	2,610	3,930	0,610	-0,357	0,306	
	1,317	2,603	3,735	0,245	-0,966	-2,125	
	1,323	2,613	3,935	0,756	-0,063	0,369	
	1,311	2,623	3,934	-0,192	0,815	0,356	
	1,318	2,604	3,922	0,398	-0,856	0,204	
	1,323	2,612	3,935	0,770	-0,104	0,365	
	1,322	2,611	3,933	0,696	-0,255	0,333	
	1,325	2,618	3,943	0,995	0,350	0,463	
	1,317	2,600	3,917	0,250	-1,156	0,139	
	1,318	2,637	3,922	0,398	2,024	0,204	
	1,318	2,602	3,920	0,324	-1,006	0,171	
	1,306	2,613	3,919	-0,631	-0,083	0,164	

Quadro A.2 – Frequências medidas e normalizadas para o tirante Longo-Sul.

Data	Frequências medidas (Hz)			Frequências normalizadas			Outliers
	f_1	f_2	f_3	z_1	z_2	z_3	
13/set/2023	1,281	2,600	3,881	-0,903	0,723	0,064	
	1,279	2,593	3,872	-1,036	0,463	-0,886	
	1,299	2,597	3,864	0,538	0,635	-1,786	
	1,292	2,585	3,877	0,028	0,188	-0,314	
	1,301	2,567	3,868	0,724	-0,462	-1,341	
	1,305	2,579	3,883	1,021	-0,029	0,338	
	1,284	2,568	3,886	-0,679	-0,431	0,627	
	1,298	2,596	3,893	0,465	0,571	1,402	
	1,301	2,602	3,868	0,724	0,799	-1,341	
	1,303	2,571	3,874	0,922	-0,326	-0,677	
	1,287	2,610	3,897	-0,386	1,072	1,784	
	1,258	2,586	3,887	-2,832	0,243	0,695	
	1,294	2,589	3,883	0,190	0,330	0,323	
	1,304	2,488	3,885	0,962	-3,286	0,504	X
	1,295	2,566	3,886	0,262	-0,491	0,607	

Quadro A.2 (cont.) – Frequências medidas e normalizadas para o tirante Longo-Sul.

Data	Frequências medidas (Hz)			Frequências normalizadas			Outliers
	f_1	f_2	f_3	z_1	z_2	z_3	
22/jan/2024	1,314	2,605	3,896	0,789	-0,077	-0,907	
	1,314	2,603	3,917	0,780	-0,192	0,531	
	1,316	2,607	3,923	0,910	0,030	0,932	
	1,316	2,613	3,909	0,910	0,360	0,017	
	1,311	2,600	3,911	0,623	-0,384	0,139	
	1,298	2,595	3,909	-0,299	-0,629	0,023	
	1,300	2,601	3,927	-0,118	-0,316	1,209	
	1,300	2,600	3,901	-0,130	-0,336	-0,581	
	1,225	2,596	3,910	-5,155	-0,615	0,077	X
	1,295	2,615	3,909	-0,487	0,477	0,026	
	1,311	2,609	3,919	0,560	0,135	0,697	
	1,300	2,600	3,901	-0,130	-0,336	-0,581	
	1,305	2,610	3,914	0,176	0,191	0,367	
	1,307	2,603	3,886	0,342	-0,211	-1,594	
	1,313	2,602	3,915	0,736	-0,266	0,397	
	1,298	2,596	3,910	-0,268	-0,575	0,041	
	1,302	2,604	3,895	0,001	-0,111	-0,969	
	1,295	2,590	3,886	-0,460	-0,906	-1,605	
	1,310	2,632	3,918	0,517	1,454	0,611	
	1,303	2,606	3,909	0,054	-0,021	-0,013	
	1,312	2,623	3,900	0,628	0,968	-0,609	
	1,310	2,609	3,931	0,555	0,159	1,540	
	1,306	2,612	3,918	0,253	0,323	0,605	
	1,271	2,599	3,915	-2,073	-0,430	0,421	
	1,305	2,600	3,905	0,216	-0,355	-0,246	
	1,298	2,631	3,903	-0,258	1,403	-0,390	
	1,299	2,599	3,910	-0,187	-0,436	0,053	
	1,308	2,692	3,934	0,375	4,909	1,733	X
	1,305	2,610	3,855	0,182	0,201	-3,695	X
	1,311	2,599	3,932	0,559	-0,424	1,554	
	1,314	2,567	3,921	0,768	-2,268	0,811	
	1,300	2,612	3,899	-0,153	0,333	-0,654	
	1,314	2,606	3,919	0,759	-0,041	0,691	
	1,300	2,589	3,913	-0,113	-1,004	0,308	
	1,298	2,595	3,914	-0,303	-0,635	0,369	
	1,307	2,602	3,883	0,354	-0,260	-1,807	
	1,293	2,607	3,900	-0,613	0,046	-0,621	
	1,290	2,606	3,909	-0,781	-0,021	-0,013	
	1,306	2,612	3,918	0,250	0,318	0,597	
	1,306	2,598	3,917	0,230	-0,458	0,534	

Quadro A.3 – Frequências medidas e normalizadas para o tirante Médio-Norte.

Data	Frequências medidas (Hz)			Frequências normalizadas			Outliers
	f_1	f_2	f_3	z_1	z_2	z_3	
13/set/2023	1,643	3,310	4,976	-1,409	-0,127	0,354	
	1,657	3,314	4,972	-0,068	0,267	0,339	
	1,662	3,296	4,069	0,386	-1,188	-2,611	
	1,651	3,302	4,978	-0,642	-0,725	0,360	
	1,662	3,299	4,109	0,354	-1,009	-2,481	
	1,675	3,314	4,989	1,612	0,228	0,397	
	1,663	3,312	4,982	0,459	0,086	0,373	
	1,656	3,312	4,997	-0,170	0,090	0,423	
	1,658	3,303	5,030	0,048	-0,640	0,531	
	1,662	3,310	4,972	0,401	-0,122	0,340	
	1,643	3,322	5,000	-1,362	0,855	0,432	
	1,675	3,314	4,989	1,612	0,228	0,397	
	1,670	3,305	4,975	1,150	-0,500	0,351	
	1,652	3,304	4,990	-0,577	-0,613	0,399	
	1,639	3,350	4,989	-1,793	3,171	0,397	X
22/jan/2024	1,674	3,307	4,981	0,484	-1,055	0,200	
	1,656	3,312	4,988	0,095	-0,445	0,440	
	1,663	3,308	4,989	0,247	-0,972	0,489	
	1,657	3,315	4,845	0,130	0,027	-4,965	X
	1,648	3,315	4,982	-0,075	0,042	0,236	
	1,652	3,304	5,002	0,018	-1,457	0,991	
	1,661	3,323	4,984	0,213	1,124	0,305	
	1,654	3,309	4,984	0,066	-0,822	0,286	
	1,665	3,313	4,978	0,280	-0,205	0,064	
	1,674	3,324	4,973	0,477	1,241	-0,106	
	1,652	3,327	4,911	0,018	1,741	-2,482	
	1,663	3,307	4,970	0,255	-1,086	-0,220	
	1,649	3,312	5,033	-0,048	-0,337	2,152	
	1,655	3,310	4,965	0,077	-0,673	-0,427	
	1,665	3,308	4,994	0,280	-0,886	0,668	
	1,647	3,315	4,963	-0,080	0,107	-0,499	
	1,657	3,314	4,984	0,120	-0,116	0,302	
	1,663	3,309	4,972	0,250	-0,822	-0,156	
	1,656	3,313	4,990	0,106	-0,291	0,512	
	1,350	3,322	4,972	-6,338	1,001	-0,150	X
	1,658	3,316	4,988	0,141	0,162	0,464	
	1,665	3,309	4,975	0,295	-0,735	-0,053	
	1,664	3,327	4,967	0,258	1,723	-0,337	
	1,659	3,307	4,966	0,172	-1,093	-0,370	
	1,664	3,309	4,973	0,269	-0,862	-0,133	
	1,647	3,317	4,964	-0,094	0,376	-0,451	

Quadro A.3 (cont.) – Frequências medidas e normalizadas para o tirante Médio-Norte.

Data	Frequências medidas (Hz)			Frequências normalizadas			Outliers
	f_1	f_2	f_3	z_1	z_2	z_3	
22/jan/2024	1,658	3,317	4,975	0,150	0,283	-0,037	
	1,660	3,321	4,981	0,193	0,852	0,194	
	1,660	3,307	4,980	0,183	-1,137	0,144	
	1,646	3,320	4,967	-0,107	0,779	-0,363	
	1,659	3,319	4,978	0,170	0,551	0,072	
	1,659	3,304	4,991	0,164	-1,525	0,579	
	1,670	3,314	4,958	0,397	-0,073	-0,676	
	1,664	3,328	4,992	0,269	1,866	0,607	
	1,657	3,314	5,000	0,120	-0,107	0,904	
	1,651	3,327	4,977	-0,014	1,650	0,039	
	1,653	3,328	4,981	0,042	1,806	0,182	
	1,658	3,317	4,990	0,148	0,255	0,512	
	1,662	3,325	4,987	0,232	1,368	0,405	
	1,668	3,315	4,983	0,354	0,044	0,265	
	1,650	3,300	4,978	-0,029	-2,082	0,057	
	1,657	3,313	4,986	0,112	-0,218	0,361	

Quadro A.4 – Frequências medidas e normalizadas para o tirante Médio-Sul.

Data	Frequências medidas (Hz)			Frequências normalizadas			Outliers
	f_1	f_2	f_3	z_1	z_2	z_3	
13/set/2023	1.602	3.242	4.882	-1.487	-0.087	0.583	
	1.614	3.228	4.871	-0.452	-1.106	-0.208	
	1.632	3.229	4.861	1.106	-1.000	-0.918	
	1.636	3.234	4.870	1.428	-0.637	-0.281	
	1.602	3.238	4.875	-1.500	-0.350	0.065	
	1.630	3.222	4.852	0.940	-1.508	-1.569	
	1.610	3.254	4.864	-0.825	0.796	-0.742	
	1.618	3.236	4.854	-0.106	-0.525	-1.463	
	1.607	3.250	4.893	-1.029	0.505	1.388	
	1.628	3.255	4.883	0.744	0.901	0.688	
	1.633	3.266	4.899	1.194	1.657	1.828	
	1.632	3.263	4.895	1.085	1.474	1.551	
	1.609	3.257	4.866	-0.853	0.990	-0.570	
	1.624	3.247	4.871	0.389	0.305	-0.211	
	1.612	3.223	4.872	-0.635	-1.414	-0.142	
22/jan/2024	1.675	3.335	4.996	0.868	0.185	-0.346	
	1.659	3.337	4.996	-0.295	0.197	-0.326	
	1.670	3.340	5.018	0.519	0.218	0.479	
	1.672	3.331	5.016	0.662	0.154	0.399	

Quadro A.4 (cont.) – Frequências medidas e normalizadas para o tirante Médio-Sul.

Data	Frequências medidas (Hz)			Frequências normalizadas			Outliers
	f_1	f_2	f_3	z_1	z_2	z_3	
22/jan/2024	1.655	3.348	5.004	-0.572	0.272	-0.052	
	1.663	3.326	5.001	0.001	0.125	-0.146	
	1.667	3.345	5.012	0.289	0.248	0.238	
	1.671	3.277	5.014	0.615	-0.204	0.331	
	1.671	3.294	4.930	0.551	-0.087	-2.738	
	1.639	3.313	4.929	-1.786	0.037	-2.786	
	1.646	3.282	4.928	-1.231	-0.173	-2.808	
	1.656	3.300	4.920	-0.548	-0.052	-3.093	X
	1.683	3.331	5.049	1.473	0.157	1.596	
	1.655	3.337	4.992	-0.636	0.197	-0.495	
	1.676	3.353	4.997	0.985	0.302	-0.307	
	1.655	3.335	5.016	-0.629	0.184	0.375	
	1.672	3.343	5.015	0.633	0.239	0.357	
	1.667	3.335	5.021	0.310	0.181	0.578	
	1.663	3.345	5.026	-0.017	0.248	0.773	
	1.651	3.323	5.014	-0.865	0.101	0.317	
	1.661	3.341	5.042	-0.176	0.225	1.321	
	1.656	3.331	5.006	-0.517	0.156	0.014	
	1.665	3.330	5.006	0.127	0.148	0.011	
	1.627	3.329	5.017	-2.671	0.145	0.414	
	1.671	3.331	5.014	0.619	0.156	0.336	
	1.667	3.333	5.000	0.263	0.172	-0.189	
	1.673	3.330	4.988	0.709	0.152	-0.627	
	1.667	3.333	5.035	0.263	0.172	1.087	
	1.671	3.325	5.014	0.603	0.119	0.312	
	1.681	3.329	5.026	1.319	0.143	0.770	
	1.675	3.328	5.024	0.853	0.133	0.681	
	1.677	3.336	5.012	1.010	0.188	0.265	
	1.664	3.345	5.008	0.054	0.248	0.120	
	1.666	3.332	5.028	0.227	0.166	0.821	
	1.665	3.330	5.011	0.151	0.152	0.196	
	1.669	3.337	5.006	0.405	0.198	0.020	
	1.653	3.339	5.008	-0.746	0.208	0.109	
	1.651	3.334	5.018	-0.883	0.179	0.452	
	1.610	3.337	5.013	-3.911	0.194	0.294	X
	1.681	3.330	5.011	1.308	0.151	0.211	
	1.669	3.338	5.007	0.425	0.201	0.051	
	1.664	2.328	5.011	0.081	-6.523	0.214	X
	1.667	3.333	5.013	0.263	0.172	0.296	
	1.662	3.340	5.018	-0.106	0.216	0.476	