



Monitorização estrutural da cobertura do estádio de Leiria através de sensores dinâmicos de baixo custo

Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas

Isadora Désirée Estevam

Leiria, março de 2023



Monitorização estrutural da cobertura do estádio de Leiria através de sensores dinâmicos de baixo custo

Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas

Isadora Désirée Estevam

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Professor Doutor Paulo Alexandre Lopes Fernandes e coorientações do Professor Doutor Hugo Rodrigues e do Doutor Romain Ribeiro de Sousa

Leiria, março de 2023

Originalidade e Direitos de Autor

A presente dissertação é original, elaborada unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para a elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionada a Autora e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual a mesma foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia Civil – Construções Cíveis, no ano letivo 2022/2023, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

Dedicatória

Essa Dissertação de conclusão do Mestrado em Engenharia Civil – Construções Cíveis que realizei é dedicada aos meus principais incentivadores e motivadores de vida, aos meus pais, Antônio Estevam Neto e Adrianie Désirée Oliveira Estevam.

Agradecimentos

Depois de todo o meu percurso estudantil, desde o Bacharelado em Engenharia Civil no Brasil até o Mestrado em Engenharia Civil – Construções Cívicas em Portugal, chegou a hora de agradecer as principais pessoas que me apoiaram e incentivaram na qual sem eles, eu não estaria aqui batalhando pelos meus sonhos.

Primeiramente agradeço a Deus que esteve ao meu lado em todos os momentos desse Mestrado e dessa Dissertação, tanto nos momentos bons quanto nas dificuldades encontradas pelo caminho principalmente pelo fato de enfrentar um outro país a não ser o meu de naturalidade onde as culturas e costumes são diferentes.

Agradeço imensamente à minha família, principalmente os meus pais e o meu irmão. Quero agradecer os meus pais, Antônio Estevam e Adrianie Estevam, que sem eles nada disso teria acontecido, pois foram eles que me apoiaram nessa jornada me incentivando, motivando tanto para o meu crescimento profissional quanto o crescimento pessoal. Agradeço também ao meu irmão, Lucas Estevam, que foi o que me incentivou a fazer um mestrado e apoiou-me quando decidi que seria em Portugal.

Quero agradecer o meu colega de profissão, Leonardo Metran, que me apoiou quando lhe contei essa jornada que queria realizar. E agradeço também tanto os meus amigos do Brasil quanto os meus amigos que fiz em Portugal pois essa jornada não é fácil e é necessário um ombro amigo para seguir em frente e concluí-la, um agradecimento especial ao meu amigo Lucas Reis que me ajudou nessa tese em sua área de programação.

Agradeço também ao meu orientador dessa Dissertação de Mestrado, Paulo Fernandes, meus coorientadores Hugo Rodrigues e Romain de Sousa, por me ajudarem e orientarem na realização desse trabalho, e também a Engenheira Inês Bourgeois pelo apoio na realização dos ensaios realizados no DECivil, da Universidade de Aveiro.

E por fim, quero agradecer ao meu noivo, Vagner Steffen, que me ajudou tanto realizando tarefas simples do dia a dia para eu poder estudar quanto me motivando para continuar a execução dessa Dissertação.

*“Existirão obstáculos, existirá quem duvide, existirão erros, mas com trabalho duro, não
haverá limites.”
(Michael Phelps)*

Resumo

A monitorização da integridade estrutural surgiu para se verificar o desempenho das construções, uma vez que as estruturas de engenharia civil, com o passar do tempo, sofrem degradação, o que pode afetar a funcionalidade e até a estabilidade do edifício. Com a monitorização da estrutura é possível aferir a segurança, integridade, performance e identificar os danos sendo assim possível corrigi-los atempadamente. E isso ocorre através de análises de dados obtidos por meio de sensores de modo contínuo ou periódico instalados nas estruturas.

A presente dissertação inicia-se por uma pesquisa bibliográfica acerca dos sensores existentes no mercado e como se dá o seu funcionamento; prossegue com um estudo de sensibilidade do sensor de baixo custo escolhido que culmina com um ensaio no objeto de estudo e por fim são apresentadas as análises dos resultados.

O presente trabalho avalia a utilização de um sensor dinâmico de baixo custo com o objetivo de verificar a sua aplicabilidade na monitorização de estruturas existentes. A campanha experimental compreendeu um estudo paramétrico com vista a aferir a sua precisão em diferentes condições, em comparação com equipamentos de maior precisão. Por fim compreendeu um estudo de caso, aplicando o sensor na monitorização da estrutura metálica da cobertura do Estádio Municipal Dr. Magalhães Pessoa na cidade de Leiria, Portugal.

Palavras-chave: Monitorização da Integridade Estrutural, Sensor de Baixo Custo, Acelerômetro, Vibração Estrutural

Abstract

Structural Health Monitoring emerged to verify the performance of buildings given that, over time, civil engineering structures suffer degradation, which can affect the functionality and even the stability of the buildings. With the monitoring of the structure, it is possible to assess the safety, integrity, and performance and to identify the damage so that it is possible to correct them in due time. This occurs through the analysis of data obtained by sensors installed in the structure, either continuously or periodically.

The present dissertation aims to use a low-cost sensor to assess the dynamic behaviour of structures. To do it a parametric study was carried out to assess its accuracy in different conditions while comparing it to high-performance reference sensor. The low-cost sensor was also tested in a case study, assessing the steel structure of the roof of the Municipal Stadium Dr. Magalhães Pessoa in the city of Leiria, Portugal.

The work started with one bibliographic research about existing sensors in the market and how they work followed by a sensitivity study of the chosen low-cost sensor. Then, their performance was characterized in a case study, and finally, some conclusions were drawn.

Keywords: Structural Health Monitoring, Low-Cost Sensor, Accelerometer, Structural Vibration

Índice

| | |
|--|-------------|
| Originalidade e Direitos de Autor | iii |
| Dedicatória | iv |
| Agradecimentos | v |
| Resumo | vii |
| Abstract | viii |
| Lista de Figuras | xi |
| Lista de tabelas..... | xiv |
| Lista de siglas e acrónimos..... | xv |
| 1. Introdução | 16 |
| 1.1. Enquadramento Geral | 16 |
| 1.2. Objetivos..... | 17 |
| 1.3. Organização da dissertação | 17 |
| 2. Monitorização da Integridade Estrutural | 19 |
| 2.1. Introdução | 19 |
| 2.2. Monitorização da Integridade Estrutural | 20 |
| 2.2.1. Etapas..... | 20 |
| 2.2.2. Categorias | 21 |
| 2.2.3. Classificação..... | 22 |
| 2.2.4. Vantagens e Desvantagens | 23 |
| 2.2.5. Metodologia..... | 23 |
| 2.3. Sensores convencionais para monitorização estrutural | 24 |
| 2.3.1. Classificação dos sensores..... | 25 |
| 2.3.2. Tipos de sensores..... | 25 |
| 2.3.3. Escala utilizada nos sensores | 29 |
| 2.3.4. Interface de comunicação | 29 |
| 2.4. Sensores de baixo custo | 30 |
| 3. Descrição do equipamento e software utilizado..... | 33 |
| 3.1. Equipamento | 33 |
| 3.1.1. Informações gerais..... | 33 |
| 3.1.2. Programação do sensor..... | 36 |
| 3.1.3. Informações dos sensores utilizados no ensaio | 39 |
| 3.2. Software..... | 39 |
| 3.2.1. PyCharm | 39 |
| 3.2.2. MatLab..... | 40 |

| | | |
|-------------|---|-----------|
| 3.2.3. | Modelação numérica da estrutura..... | 41 |
| 4. | Estudo de sensibilidade dos sensores de baixo custo..... | 43 |
| 4.1. | Familiarização e testagem do equipamento | 43 |
| 4.2. | Medição de frequências em estruturas sujeitas a vibração ambiental | 47 |
| 4.2.1. | Massageador..... | 47 |
| 4.2.2. | Ponte Pedonal Metálica..... | 53 |
| 4.2.3. | Departamento de Engenharia Civil UA..... | 62 |
| 5. | Ensaio na Cobertura do Estádio Municipal Dr. Magalhães Pessoa | 67 |
| 5.1. | Descrição e caracterização estrutural..... | 67 |
| 5.2. | Ensaio de identificação dinâmica | 71 |
| 5.2.1. | Primeira etapa..... | 71 |
| 5.2.2. | Segunda etapa..... | 73 |
| 5.3. | Modelação da viga 39E | 78 |
| 6. | Conclusão | 80 |
| 6.1. | Considerações finais | 80 |
| 6.2. | Desenvolvimentos futuros..... | 81 |
| | Referências Bibliográficas | 82 |
| | Anexos | 85 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Etapas de um sistema SHM [2]..... | 21 |
| Figura 2 - Categorias de um sistema SHM [2] | 22 |
| Figura 3 - Esquema visual do sistema SHM [2]..... | 24 |
| Figura 4 - Constituição genérica acelerômetro piezoelétrico [6] | 27 |
| Figura 5 - Constituição genérica acelerômetro piezoresistivo [6]..... | 28 |
| Figura 6 - Constituição genérica acelerômetro capacitivo [6]..... | 28 |
| Figura 7 - Ilustração de um MEMS [17] | 31 |
| Figura 8 - Sensor STWINKT1B | 33 |
| Figura 9 - Localização dos sensores na placa [10] | 34 |
| Figura 10 - Localização do carregador de bateria linear de íões de lítio [10] | 35 |
| Figura 11 - Arquivo Execution_Config.json – dados do equipamento como um todo..... | 36 |
| Figura 12 - Parte da configuração do arquivo DeviceConfig.json | 38 |
| Figura 13 - Representação do software utilizado para transformar arquivo .data em .cvs.. | 40 |
| Figura 14 - Representação do software utilizado para realizar os gráficos | 40 |
| Figura 15 - Representação da transformada rápida de Fourier [14] | 41 |
| Figura 16 - Programação do equipamento para o primeiro ensaio..... | 43 |
| Figura 17 - Luzes pulsadas no equipamento | 44 |
| Figura 18 - Programação do equipamento para o segundo ensaio | 44 |
| Figura 19 - Programação para testar tempo de pausa..... | 46 |
| Figura 20 - Programação para testar tempo maior de pausa..... | 46 |
| Figura 21 - Teste com massagedor | 48 |
| Figura 22 - Programação de 5 min - massagedor | 48 |
| Figura 23 - Programação de 1 min - massagedor | 49 |
| Figura 24 - Programação de 2 min – massagedor..... | 49 |
| Figura 25 - Acelerograma da direção longitudinal X do massagedor em 5 minutos..... | 50 |
| Figura 26 - Espectro de potência na direção longitudinal X do massagedor em 5 minutos | 50 |
| Figura 27 - Espectro de potência na direção longitudinal Y do massagedor em 5 minutos | 51 |
| Figura 28 - Espectro de potência na direção longitudinal Z do massagedor em 5 minutos | 51 |

| | |
|---|----|
| Figura 29 - Espectro de potência na direção perpendicular Z do massagedor em 1 minuto | 52 |
| Figura 30 - Espectro de potência na direção perpendicular Z do massagedor em 2 minutos | 52 |
| Figura 31 - Teste na ponte pedonal em Leiria [Google Maps] | 53 |
| Figura 32 - Teste na ponte pedonal em Leiria, local de medição..... | 54 |
| Figura 33 - Programação de 1 minuto – ponte metálica, estrutura concreto armado e cobertura metálica | 54 |
| Figura 34 - Espectro de potência da primeira medição da ponte metálica..... | 55 |
| Figura 35 - Espectro de potência da segunda medição da ponte metálica | 56 |
| Figura 36 - Espectro de potência da terceira medição da ponte metálica | 57 |
| Figura 37 - Espectro de potência da quarta medição da ponte metálica | 57 |
| Figura 38 - Espectro de potência da quinta medição da ponte metálica | 58 |
| Figura 39 - Espectro de potência da sexta medição da ponte metálica | 59 |
| Figura 40 - Espectro de potência da sétima medição da ponte metálica..... | 59 |
| Figura 41 - Resultados da medição da ponte metálica | 62 |
| Figura 42 - Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro [Google Maps] | 63 |
| Figura 43 - Estudo na Universidade de Aveiro | 63 |
| Figura 44 - Espectro de potência da primeira medição da Universidade de Aveiro | 64 |
| Figura 45 - Espectro de potência da segunda medição da Universidade de Aveiro | 64 |
| Figura 46 - Espectro de potência da terceira medição da Universidade de Aveiro..... | 65 |
| Figura 47 - Espectro de potência primeira medição na Universidade de Aveiro - acelerômetro piezoelétrico | 65 |
| Figura 48 - Espectro de potência segunda medição na Universidade de Aveiro - acelerômetro piezoelétrico | 65 |
| Figura 49 - Vigas da cobertura do estádio..... | 67 |
| Figura 50 - Contraventamentos e fuste na cobertura do estádio | 68 |
| Figura 51 - Planta de cobertura do Estádio de Leiria [Câmara Municipal de Leiria] | 69 |
| Figura 52 - Alçado de viga da cobertura do estádio [Câmara Municipal de Leiria] | 70 |
| Figura 53 - Representação das caleiras, coletores e tubos de queda [Câmara Municipal de Leiria]..... | 70 |
| Figura 54 - Espectro de potência acelerômetro piezoelétrico na Cobertura do Estádio..... | 72 |
| Figura 55 - Espectro de potência sensor de baixo custo na cobertura do estádio | 72 |

| | |
|--|-----|
| Figura 56 - Vigas medidas – lateral da cobertura..... | 73 |
| Figura 57 - Espectro de potência das medições na cobertura do estádio | 74 |
| Figura 58 - Espectro de potência da direção horizontal da viga 35E e 32D..... | 75 |
| Figura 59 - Vigas medidas - meio da cobertura..... | 76 |
| Figura 60 - Espectro de potência da medição das vigas centrais..... | 77 |
| Figura 61 - Modelação da viga 39E no Galileu..... | 79 |
| Figura 62 – Frequência da viga 39E no Galileu | 79 |
| Figura 63 - Espectro de potência da primeira medição de 5 minutos do massageador | 85 |
| Figura 64 - Espectro de potência da segunda medição de 5 minutos do massageador | 86 |
| Figura 65 - Espectro de potência da terceira medição de 5 minutos do massageador | 87 |
| Figura 66 - Espectro de potência da quarta medição de 5 minutos do massageador | 87 |
| Figura 67 - Espectro de potência da medição de 1 minuto na direção Z do massageador .. | 88 |
| Figura 68 - Espectro de potência da medição de 2 minutos na direção Z do massageador | 89 |
| Figura 69 - Espectro de potência da medição de 5 minutos na direção Z do massageador | 89 |
| Figura 70 - Espectro de potência das medições de 1 minuto do massageador | 91 |
| Figura 71 - Espectro de potência das medições de 2 minutos do massageador | 92 |
| Figura 72 - Espectro de potência das medições de 5 minutos do massageador | 94 |
| Figura 73 - Espectro de potência da viga 35E na vertical | 96 |
| Figura 74 - Espectro de potência da viga 35E na largura da viga | 97 |
| Figura 75 - Espectro de potência da viga 39E na vertical | 99 |
| Figura 76 - Espectro de potência da viga 39E na largura da viga | 100 |
| Figura 77 - Espectro de potência da viga 32D na vertical..... | 101 |
| Figura 78 - Espectro de potência da viga 32D na largura da viga..... | 102 |

Lista de tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Especificações técnicas dos sensores [2] | 25 |
| Tabela 2 - Tipos de sensores [2]..... | 26 |
| Tabela 3 - Resumo das programações que deram certas..... | 47 |
| Tabela 4 - Frequência da passada para vários tipos de andamento [25] | 60 |
| Tabela 5 - Resultados das medições do trabalho de Liana Ostetto [13]..... | 61 |
| Tabela 6 - Resumo dos resultados da medição do sensor de baixo custo | 61 |
| Tabela 7 - Resumo das temperaturas medidas na Cobertura do Estádio..... | 77 |
| Tabela 8 - Comparação entre temperatura e frequência das vigas | 78 |

Lista de siglas e acrónimos

| | |
|------------------|--|
| I ² C | Inter-integrated Circuit |
| ISIS | Institute for Science and International Security |
| MEMS | Micro Elettromecanicals Systems |
| NDE | Non Destructive Evaluation |
| NDT | Non Destructive Testing |
| SHM | Structural Health Monitoring |
| SPI | Serial Peripheral Interface |

1. Introdução

1.1. Enquadramento Geral

As estruturas de engenharia podem ser vulneráveis a acidentes e sofrerem efeitos de degradação ao longo do tempo que podem comprometer com a funcionalidade e até a estabilidade do edifício [1]. A degradação e consequente manifestação de fenômenos patológicos nos edifícios varia em função dos materiais empregues, qualidade de construção, fatores ambientais, falta de conservação adequada dos utilizadores e até da desadequada utilização dos usuários.

Como tal, as estruturas precisam de ter uma manutenção constante a fim de que o seu desempenho projetado seja adequado atingido a função pretendida. Entretanto, a redução dos recursos humanos, financeiros e de materiais dificultam as inspeções, controle, manutenção e reparação dos edifícios em geral, tanto nos setores públicos como nos setores privados [2].

Atualmente, soluções novas estão sendo desenvolvidas e aperfeiçoadas, criando ferramentas modernas que disponibilizam informações mais completas, confiáveis e com maior rapidez. Essas soluções pode oferecer uma visão tanto local quanto global das situações em questão e podem dar garantias sobre o desempenho do edifício, além de alertar sobre os possíveis perigos no futuro.

Nos últimos anos, a monitorização da integridade estrutural (Structural Health Monitoring – SHM) tem surgido como um interessante tema na engenharia civil. Essa monitorização refere-se à verificação do desempenho das estruturas através da medição de algumas grandezas importantes que provê informação sobre o atual estado estrutural do edifício [1]. Esse sistema tem como objetivo aferir a segurança, integridade, performance além de identificar os danos, e isso é realizado através do tratamento e análise dos dados obtidos pelo sistema sensorial utilizados na estrutura de modo contínuo ou periódico.

Um dos sistemas de monitorização que tem sido objeto de análise prende-se com a medição das frequências próprias de vibração de estruturas por forma a avaliar a eventual alteração do comportamento dinâmico das mesmas resultantes da ocorrência de um dano ou da

progressiva deterioração das propriedades iniciais da estrutura devido ao seu envelhecimento.

1.2. Objetivos

A presente dissertação tem como propósito estudar a utilização de um equipamento de baixo custo que engloba sensores na qual possuem capacidade para medir várias grandezas. As grandezas medidas nesse trabalho são a vibração em três direções e a temperatura. Já o objeto de estudo é a estrutura metálica da cobertura do Estádio Municipal Dr. Magalhães Pessoa localizado na cidade de Leiria, Portugal.

Foi escolhido um sensor de baixo custo devido, além do seu reduzido valor monetário comparado com outros tipos de sensores que possuem no mercado, a facilidade de ser programado, instalado e monitorizado nos pontos a serem estudados. Nesse trabalho será testado se o sensor escolhido tem a capacidade de medir vibração em estrutura flexível e estrutura rígida; se as medições obtêm muitas interferências de ruídos e se a temperatura tem grande influência na frequência da estrutura medida. O trabalho inclui ainda a programação do sensor, bem assim como a programação necessária ao pós processamento dos resultados.

Além disso, com os resultados obtidos pelas medições realizadas por esse sensor de reduzido custo, será comparado com medição realizada por um equipamento de maior sensibilidade, um acelerômetro unidirecional piezoelétrico, e também será comparado com uma modelação realizada em um software.

1.3. Organização da dissertação

O presente trabalho organiza-se em sete capítulos compreendendo a introdução, uma revisão da literatura e descrição mais detalhada do tema estudado, a descrição das análises e ensaios realizados e termina com as conclusões.

O primeiro capítulo refere-se ao tema que será tratado nessa dissertação, apresentando uma breve introdução e objetivo do trabalho.

O segundo capítulo aborda o desenvolvimento do assunto, os estudos realizados em artigos acerca do tema em que se encontra dividido em seção e subseção para uma melhor organização e compreensão do conteúdo.

O terceiro capítulo faz referência do equipamento utilizado, trazendo informações gerais dos sensores nele inseridos e os sensores que foram necessários para o desenvolvimento desse trabalho em si. Além disso, esse capítulo também aborda sobre os softwares que permitiram processar e analisar os registros compilados nos diferentes ensaios, nomeadamente o PyCharm na qual utiliza a linguagem Python e o MatLab. E também aborda sobre o software Galileu utilizado para realizar a modelação da viga analisada.

No quarto capítulo é abordado um estudo de sensibilidade realizado para compreender melhor o sensor de baixo custo escolhido a fim de se analisar as frequências da cobertura do Estádio de Leiria, na qual esse estudo foi dividido em duas etapas e cada etapa subdividida em duas partes.

O quinto capítulo faz referência ao objeto de estudo, o Estádio Municipal de Leiria, relacionando um pouco da sua história e da sua estrutura tanto como um todo quanto principalmente em relação a cobertura, elemento a ser estudado.

Já o sexto capítulo é o ensaio realizado na cobertura do Estádio Municipal de Leiria, mostrando como foi feito, os resultados e análises obtidos com o ensaio realizado e a comparação feita com a modelação. E por fim, o sétimo capítulo aborda as conclusões obtidas através desse estudo, desse trabalho acerca da monitorização da integridade estrutural e do uso de um equipamento de baixo custo para tal finalidade.

2. Monitorização da Integridade Estrutural

2.1. Introdução

Há muito tempo que os engenheiros, numa tentativa de aumentar a vida útil das estruturas, examinam o seu desempenho de forma contínua. Entretanto, somente recentemente, o uso dos sistemas SHM – monitorização da integridade estrutural – se tornou mais essencial e houve um avanço das tecnologias utilizadas. Esse avanço se deve principalmente pelas organizações, entre elas o Institute for Science and International Security Canadá (ISIS Canadá), e a tendência mundial de utilizar esses sistemas por causa do: interesse de monitorização a longo prazo devido os projetos que se utiliza novos materiais ainda não comprovados em requisito de segurança; inevitabilidade de monitorizar a longo prazo as estruturas já existentes; avanço no desenvolvimento dos sistemas de transmissão de dados e sua coleta, além dos sistemas de arquivamento e recuperação, entre outros [3].

As tecnologias existentes para avaliar uma estrutura, tanto pontualmente como globalmente, abrange várias áreas de intervenção, entretanto um elemento importante a ser considerado é o período de avaliação, na qual pode ser de curta duração e as de longa duração. As avaliações de curta duração englobam as avaliações pontuais e as de longa duração englobam as avaliações contínuas sendo que as primeiras acabam tendo mais execução e acabam gastando menos recursos que as últimas [2].

As técnicas de monitorização de sistemas por meio de avaliações pontuais utilizam as tecnologias intituladas por Teste Não Destrutivos (NDT – Non Destructive Testing) ou por Avaliações Não Destrutivas (NDE – Non Destructive Evaluation). Já o sistema de monitorização estrutural, de longa duração, almeja um acompanhamento contínuo da estrutura do edifício [2]. A análise pontual pode ser periódica quando se almeja ocasionar alterações na resposta das estruturas por meio de picos de resposta que provém de medições executadas em um determinado intervalo de tempo, e a análise contínua é mais empregue para ocasionar alterações no comportamento da estrutura quando essa fica submetida às ações ambientais [4].

Os sistemas SHM são um instrumento importante para avaliar a segurança, a integridade, o desempenho das estruturas da construção civil e também em seu diagnóstico do estado de conservação. Esse sistema não destrutivo é dado pela instalação de equipamentos na obra a

ser analisada, portanto uma avaliação *in situ*, em que realizam medição, durante um certo período de tempo, processamento dos dados e a sua transmissão. Esses sistemas podem ser complementados através de modelos numéricos em que detectam a ocorrência de possíveis comportamentos indesejáveis no futuro [3; 5].

2.2. Monitorização da Integridade Estrutural

A monitorização da integridade estrutural, como dito anteriormente, é um processo de avaliação *in situ*, não destrutivo, contínuo ou periódico para identificar danos em uma estrutura utilizando sensores instalado em seu exterior ou embutidos na própria estrutura, na qual coleta-se dados em tempo real ou por amostragem de períodos regulares. Eles podem ser utilizados em qualquer obra da engenharia civil como por exemplo pontes, túneis, edifícios, rodovias, entre outros [2; 3].

Após a obtenção e transmissão dos dados realiza-se o processamento e análises através de vários tipos de técnicas e modelos como por exemplo análise estatística. Essa análise tem a finalidade de encontrar um padrão de comportamento da estrutura em questão e caracterizá-la. Quando se obtém um comportamento diferente, esse é analisado e caracterizado, com objetivo de especificar se pode ou não estar associado a algum dano. É necessário lembrar que um dano estrutural ocasiona uma variação no comportamento habitual da estrutura, entretanto, uma variação no comportamento pode não ser necessariamente ocasionada por um dano, podendo, como por exemplo, resultar do aumento de sobrecargas em que acaba gerando aumento de massa. Com isso, essas informações obtidas pelos SHM são armazenadas e referenciadas para serem utilizadas em futuros diagnósticos [2].

A estratégia para utilizar esses sistemas de monitorização é obter, através de análises a longo prazo, o histórico da evolução da capacidade estrutural de uma construção, considerando a sua funcionalidade em questão e também os danos sofridos devidos o ambiente em que se encontra.

2.2.1. Etapas

De uma forma geral, o sistema SHM tem seis etapas em comum: [3]

- Obtenção de dados;
- Transmissão da informação;

- Processamento e análise dos dados;
- Armazenamento dos dados processados;
- Diagnóstico;
- Recuperação de informação, caso seja preciso.

Um possível fluxograma representativo deste modelo está representado na Figura 1, sendo importante lembrar que podem existir outros modelos de representação do sistema SHM.



Figura 1 - Etapas de um sistema SHM [2]

2.2.2. Categorias

Os sistemas SHM estão classificados em quatro tipos de categorias, sendo que cada uma compõe-se em subcategorias menores. Essas categorias, representadas na Figura 2, são conforme os testes realizados e as principais são [3]:

- Teste estático de campo,
- Teste dinâmico de campo,
- Monitorização periódico,
- Monitorização contínuo.

A discriminação de cada categoria é realizada por critérios. Tem-se como o primeiro critério em relação a obtenção dos dados, se eles são alcançados de forma contínua ou pontualmente. Tem também como critério o tipo de teste a ser realizado e como os dados são coletados [2].

Essa distinção das categorias ocorre devido a natureza das ações em análise, como por exemplo, se quiser realizar uma avaliação dinâmica de uma estrutura onde o impulso de ativação seja uma explosão é necessário que os ensaios sejam feitos esporadicamente por causa dos riscos envolventes nesses ensaios.



Figura 2 - Categorias de um sistema SHM [2]

2.2.3. Classificação

Os sistemas SHM podem ser classificados tanto em relação aos termos de seu nível de sofisticação quanto em relação ao tipo de informação que o método consegue fornecer. Com isso, tem-se quatro níveis de classificação [3]:

- Nível I: o sistema detecta algum dano na estrutura, porém não tem a capacidade de informar a natureza, localização nem a gravidade do dano. Nesse nível o sistema também não consegue avaliar a segurança da estrutura.
- Nível II: um pouco mais sofisticado que o nível I, o nível II consegue identificar a presença de dano e a sua localização aproximada.
- Nível III: o sistema além de detectar e identificar o dano, consegue fornecer uma estimativa da sua severidade.
- Nível IV: nesse último nível, o sistema possui o máximo de sofisticação pois tem a capacidade de fornecer dados pormenorizados sobre a presença, localização e gravidade do dano. Esse nível também avalia a segurança estrutural. Entretanto, nesse nível os sistemas são mais complexos e caros.

2.2.4. Vantagens e Desvantagens

A monitorização da integridade estrutural possui várias vantagens. Entre elas estão a diminuição dos custos de inspeção e manutenção periódica, aumento da segurança da estrutura e uma melhor percepção do comportamento e durabilidade da estrutura em análise.

As informações que se tem atualmente sobre o comportamento estrutural das construções de engenharia foram obtidas em laboratórios, entretanto é difícil modelar por completo o comportamento em escala real. Com isso, os ensaios são feitos em escalas pequenas em que se generaliza para toda a estrutura. Já a monitorização das estruturas proporciona uma vasta gama de dados do comportamento real da estrutura quando ela está submetida a ações ambientais reais [3].

Outra vantagem é que quando se detecta os danos estruturais logo em seu início, permite-se realizar alguma ação a fim de evitar que a estrutura tenha de sustentar as cargas enquanto estiver em estado danificado. Isso permite a realização de reparos precoce e evita uma maior deterioração da patologia além de diminuir os custos desse reparo. Isso acaba também resultando em projeções menos excessivas e reduzindo o custo de execução além de aumentar a eficiência dos projetos.

Os sistemas SHM acabam reduzindo a demanda de inspeção *in situ* e permite uma atualização de dados da estrutura automaticamente. Com isso, gera-se uma melhor gestão na estratégia para mitigar a deterioração alocando orçamento com recursos necessários [3].

Em relação às desvantagens da monitorização da integridade estrutural são principalmente o alto custo dos sistemas que se encontra no mercado, a dificuldade de instalar na estrutura a ser analisada, entre outros. Conforme [26], para os sistemas de monitorização que utiliza transdutores piezoelétricos, uma desvantagem é a influência da temperatura nos sensores pois uma variação de temperatura pode fazer com que o sistema forneça resultados falsos-positivos. Já, segundo [27], alguns dos métodos de monitorização estrutural tem como desvantagem a demanda de grande quantidade de pontos para realizar medição.

2.2.5. Metodologia

Em síntese, um sistema de monitorização da integridade estrutural pode proporcionar várias informações, dependendo da classificação do nível do sistema, da saúde da estrutura além de detectar os danos e possível severidade. Para construir um sistema SHM é fundamental

ter o conhecimento a cerca dos materiais, das estruturas, da detecção de informações, dos sensores a ser utilizados, da gestão do sistema e computadores além do processamento perspicaz dos dados obtidos. A Figura 3 a seguir representa um esquema visual do sistema SHM [2].

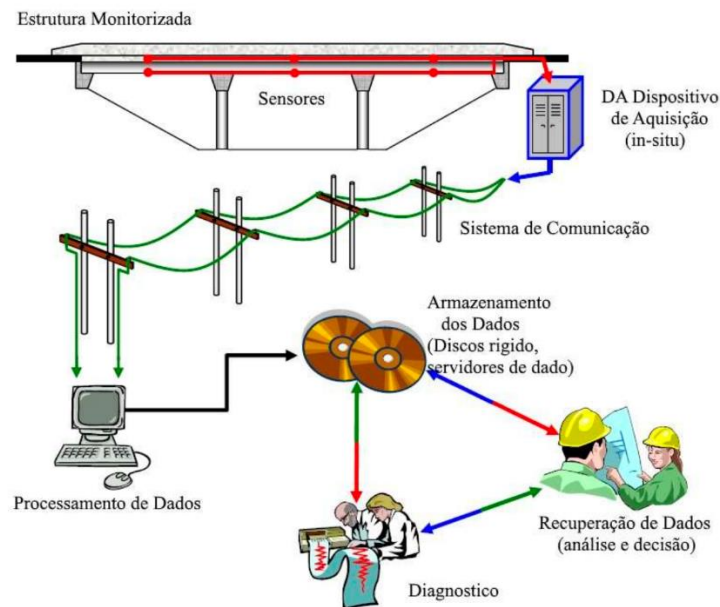


Figura 3 - Esquema visual do sistema SHM [2]

2.3. Sensores convencionais para monitorização estrutural

Um fator importante do sistema de monitorização da integridade estrutural é a seleção dos sensores utilizados. Não existe regras para escolher o tipo de sensor que será utilizado, porém escolhe-se o sensor que cumpre com os requisitos que foram definidos em fase de elaboração do projeto e que sejam capazes de medir o parâmetro de resposta almejado [2; 3].

Os critérios para a escolha dos sensores são a precisão, durabilidade, confiabilidade, limites de instalação e transmissão de sinal, demanda da energia e custo. Em relação ao custo dos sensores, é importante levar em consideração todo o custo gerado do sistema, não somente dos sensores, mas também dos cabos utilizados, tanto para a energia quanto para a transmissão de informação, e o sistema de obtenção dos dados. Além disso, é importante considerar o desempenho a longo prazo dos sensores que será utilizado e também a quantidade e a localização da instalação para que se garanta um resultado satisfatório [3].

2.3.1. Classificação dos sensores

Há diversas formas de classificar os sensores utilizados para monitorizar uma estrutura entre elas a fonte de energia e propriedades e características dos sensores.

A fonte de energia determina se o sensor é ativo ou passivo. Se for passivo, eles não precisam de uma fonte externa elétrica de alimentação já que sua própria corrente elétrica é gerada devido estímulo externo em que essa corrente é transformada em um sinal de saída. Como exemplo desse tipo de sensor, tem-se o sensor piezoelétrico [2].

Já os sensores ativos, ao contrário dos sensores passivos, precisam de uma fonte externa de energia para poderem funcionar. As propriedades do sensor podem ser alteradas através de estímulos externos. Como exemplo desse tipo de sensor tem-se o sensor extensómetro.

Os sensores podem ser classificados também conforme suas propriedades e características em várias formas conforme a representação na Tabela 1 a seguir.

| | |
|------------------------------------|--------------------------------|
| Sensibilidade | Gama de leitura de um estímulo |
| Estabilidade a curto e longo tempo | Resolução |
| Precisão | Seletividade |
| Velocidade de resposta | Condições ambientais |
| Sobrecarga de características | Linearidade |
| Histerese | Banda morta <i>Dead band</i> |
| Tempo de vida em operação | Formato de saída do sinal |
| Custo, dimensões e peso | Outros |

Tabela 1 - Especificações técnicas dos sensores [2]

2.3.2. Tipos de sensores

As vibrações são medidas por sensores que podem ser agrupados em três grupos. O primeiro grupo é composto por sensores que são empregues para medir deslocamento e nivelamento; o segundo grupo é composto por sensores que medem velocidade e aceleração e o terceiro grupo, sensores que medem forças e tensões. Em cada grupo, há vários tipos de sensores como se pode observar na Tabela 2 a seguir.

Os acelerómetros que são mais utilizados nas estruturas de engenharia civil são: Acelerómetros Piezoelétricos; Piezoresistivos e Capacitivos; Servo force balance accelerometer; fibra ótica tipo Fiber Bragg Grating (FBG).

| Presença, deslocamento e nível | Velocidade e aceleração |
|---|---------------------------------|
| Sensores potenciométricos | Sensores de velocidade fixo |
| Sensores piezoresistivos | Velocidade linear |
| Sensores capacitivos | Sensores de velocidade angular |
| Sensores indutivos e magnéticos | Sensores inercial de rotação |
| LVDT e RVDT | Giroscópio de rotor |
| Sensores indutivos transverso | Giroscópio vibratório |
| Sondas de corrente Eddy | Giroscópio ótico laser |
| <i>Pavements loops</i> | Sensores inercial lineares |
| Detetores de metal | Inclinómetros |
| Sensores de efeito-Hall | Sensores sísmicos |
| Sensores magneto resistivos | Acelerómetros capacitivos |
| Detetores magnetorestitivo | Acelerómetros piezoresistivos |
| Sensores Óticos | Acelerómetros piezoeletrico |
| Ponte ótica | Acelerómetros térmicos |
| Detetor de proximidade com polarização de luz | Closed-Loop accelerometer |
| Sensores prismáticos e refletivos | |
| Sensores Fabry-Perot | |
| Sensores de fibra ótica | |
| <i>Fiber bragg grating</i> | |
| <i>Grating photomodulator</i> | |
| Sensores de espessura e nível | Força e tensão |
| <i>Ablation sensors</i> | Extensómetro |
| Sensores de filme | Filmes sensíveis a pressão |
| <i>Sensores de nível líquido criogénico</i> | Sensores de força piezoeletrico |
| | Cabos piezoeletricos |
| | Sensores de força óticos |

Tabela 2 - Tipos de sensores [2]

Além destes sensores mais convencionais e de maior precisão, nos últimos anos observou-se o aparecimento de sensores de baixo custo que, apesar de apresentarem níveis de precisão inferiores aos mencionados anteriormente, apresentam potencial para algum tipo de aplicações.

Estudos recentes expõem que dispositivos eletrônicos de baixo custo ou até equipamentos pessoais comuns são uma opção com capacidade para conduzir a análise modal operacional em estruturas moderadamente flexíveis, como por exemplo pontes pedonais [20] ou estruturas mais rígidas com frequências dinâmicas mais semelhantes a edifícios residenciais existentes [21]. Mesmo que os acelerômetros que se encontram nesses dispositivos eletrônicos pessoais possam não oferecer a sensibilidade precisa para vibração ambiente em todos os edifícios, considerando a evolução da precisão dos sensores chipados nos últimos anos [22], a ampla aplicação de sistemas micro-electro-mecânicos de baixo custo [23] e o uso de algoritmos de transformação [24], seguramente será plausível adquirir uma análise

modal operacional de confiança com dispositivos pessoais ou de baixo custo em um futuro próximo.

2.3.2.1. Sensores Piezoelétricos

Esse tipo de sensor de vibração é formado por um elemento piezoelétrico, uma base, uma massa sísmica e uma capa que protege o sistema, como é possível observar a Figura 4. Os sensores piezoelétricos podem ser compostos por cristais (quartzo) ou cerâmicas (ferroelétrica) em que são sobrepostos por uma massa formando um conjunto que simula um sistema massa-mole. A sua composição, quando exposta à uma ação externa, como por exemplo uma força de tração ou compressão, tem a particularidade de gerar uma carga elétrica proporcional a aceleração do sistema e por consequência proporcional também a aceleração da superfície em análise [6].

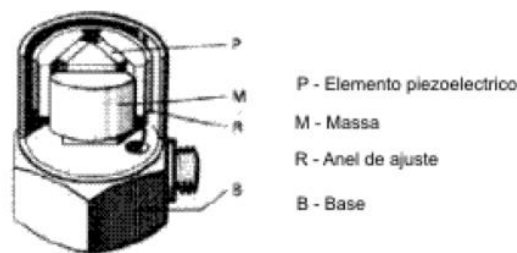


Figura 4 - Constituição genérica acelerômetro piezoelétrico [6]

Como esse sensor gera a sua própria corrente elétrica a partir da energia mecânica adquirida pela deformação dos materiais piezoelétricos, não é necessária alimentação externa. Além disso, esse sensor possui também uma boa durabilidade e estabilidade para uma monitorização de longa duração e não é influenciado pelos efeitos das variações de temperaturas.

Entretanto, como o material piezoelétrico degrada ao longo do tempo, é necessário realizar a calibração periódica do acelerômetro a fim de se assegurar a veracidade dos resultados obtidos. Esse tipo de sensor não é recomendado para monitorizar grandes estruturas flexíveis.

2.3.2.2. Sensores Piezoresistivos e Capacitivos

Os sensores piezoresistivos é composto por uma base, uma massa sísmica e os elementos piezoresistivos, conforme pode-se observar na Figura 5. A massa sísmica é acoplada a uma viga que esteja em flexão e também são instalados os elementos piezoresistivos de forma a

formarem uma ponte de Weathstone ativa. Quando o sistema está submetido a uma deformação, essa altera a sua resistência elétrica [6].

Esses sensores, ao contrário dos sensores piezoelétricos, precisam de uma alimentação elétrica externa, portanto são sensores passivos. No momento em que o acelerômetro é submetido a uma ação externa, os elementos piezoresistivos se deformam devido a vibração da massa. Essa deformação dos elementos piezoresistivos gera uma transformação da resistência elétrica e cria um desequilíbrio na ponte de Weathstone.

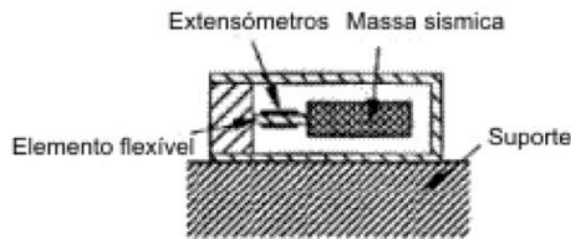


Figura 5 - Constituição genérica acelerômetro piezoresistivo [6]

Já os sensores capacitivos, com esquema de representação na Figura 6, ao contrário dos sensores piezoresistivos, possuem a massa centralizada entre os dois elétrodos criando então uma meia ponte capacitiva, portanto, possuem uma concepção análoga dos sensores piezoresistivos. Essa ponte criada nesses sensores em questão é desequilibrada a todo o momento em que haja um movimento da massa.

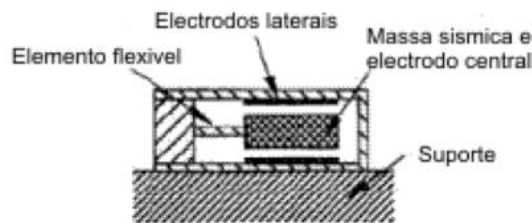


Figura 6 - Constituição genérica acelerômetro capacitivo [6]

Ambos tipos de sensores apontam uma boa sensibilidade e resposta a requisição de baixa frequência e podem ser utilizados para monitorizar as estruturas flexíveis, ao contrário dos acelerômetros de sensores piezoelétricos.

2.3.2.3. Sensores tipo “Force Balance” ou tipo Servo

Os acelerômetros com sensores tipo force balance/tipo servo, assim como os acelerômetros com sensores piezoresistivos e capacitivos, são classificados como sensores passivos pois

precisam de uma alimentação elétrica externa. Eles são compostos por uma massa sísmica, um suporte e um circuito elétrico. A massa sísmica fica abrangida pelo sistema servo que coordena o seu posicionamento [6].

A massa do sistema, quando recebe uma ação externa, tende a movimentar-se. E isso é identificado por um elemento (geralmente sensor capacitivo) que encaminha um sinal de erro para o sistema servo. Com isso, o sistema lança uma corrente elétrica que gera uma força magnética e consegue contrariar o movimento mantendo então a massa em sua posição inicial, de equilíbrio.

Esse tipo de acelerômetro é muito sensível e possui uma boa resposta às ações dinâmicas. Ele é muito utilizado em grandes estruturas flexíveis e em situações em que as vibrações naturais possuem valores reduzidos.

2.3.3. Escala utilizada nos sensores

De acordo com os estudos feitos na área de SHM, as estruturas de engenharia civil possuem uma frequência natural relativamente baixa, normalmente abaixo de 100Hz. E as vibrações ambientais atuam na estrutura em uma baixa aceleração e baixa frequência, com um valor na ordem de $10^{-3}g$ [2].

A fim de se obter uma boa medição pelos sensores, é preciso que a sua sensibilidade a pequena vibração seja muito boa e também é necessário que as amplitudes dos movimentos e das acelerações ambientais estejam dentro da escala em que o sensor tenha a capacidade de medir. Com isso, para os sensores de aplicação em SHM, a escala utilizada por eles deve estar adaptada aos movimentos em que se espera medir, ou seja, a escala deve se encontrar entre mais ou menos 1g até no máximo 2g [2].

2.3.4. Interface de comunicação

A transferência de informação entre os processadores e os circuitos podem ocorrer por meio de dois protocolos. O primeiro protocolo é a comunicação paralela e a segunda é a comunicação em serie na qual subdividem em comunicação sincronizada e comunicação assíncrona [2].

Os protocolos mais comuns nos sensores são o *Serial Peripheral Interface (SPI)*; *Inter-integrated Circuit (I²C)* e o *Serial Communication*, sendo que nos dois primeiros a informação

é sincronizada. Nesse caso, o relógio interno que processa a informação regula o ciclo e o ritmo da transmissão de dados. No processo de transmissão de dado é importante considerar que se tenha definido qual é o dispositivo que emite e que recebe os dados em uma frequência já determinada pelo relógio de processamento pois se isso não ocorrer pode haver perda de informação no caminho [2].

Em relação a velocidade de transmissão dos dados, o protocolo I²C tem uma velocidade maior que 3,4 Mbps por segundo. Já o protocolo SPI tem várias velocidades Mbps/s em que está sujeita da velocidade do relógio em si, como por exemplo, se tem uma situação em que o relógio possua uma unidade de processamento de 16 MHz, tem-se então que a velocidade de transmissão de dados atinge 2Mbps [2].

No caso da outra comunicação comum utilizada nos sensores, o *Serial Communication*, diferentemente dos SPI e I²C, é um protocolo assíncrono. Esse tipo de comunicação possui a velocidade de transmissão vinculada com a frequência do relógio da unidade de processamento. Nesse protocolo, o sistema para receber as informações tem que ser preparado para receber na mesma velocidade que o sistema que envia, pois, o sistema que envia possui uma capacidade muito grande para enviar dados a cada segundo, ou seja, nesse tipo de protocolo o que limita a velocidade utilizada para o envio de dados é a frequência utilizada pelo relógio da unidade de processamento [2].

A transmissão de dados sincronizada tem sua limitação resumida em poucos metros ao contrário da transmissão de dados assíncrona em que se pode obter uma comunicação com muitos metros de distância. Isso se deve ao fato de que a comunicação síncrona foi criada para que se obtivesse em grande velocidade com poucas ligações e protocolos simples considerando a resistência do fio elétrico em relação a passagem da corrente elétrica, pois quanto menor a distância, menos tempo é preciso para conduzir as informações [2].

2.4. Sensores de baixo custo

Através do avanço tecnológico, fez-se possível o desenvolvimento de equipamentos de baixo custo com o foco em manutenção preditiva [15], ou seja, aquela manutenção que é realizada através de acompanhamento periódico a fim de antecipar a necessidade de manutenção no objeto de análise, entre outros. Essa tecnologia gera interesse nos pesquisadores ao entorno do mundo e ainda não é muito utilizado com a finalidade de monitorizar uma estrutura [18].

Esse equipamento de baixo custo usa plataformas eletrônicas de código aberto e tecnologia MEMS – micro electro mechanicals systems – sistemas micro eletromecânicos [15].

As plataformas eletrônicas são um equipamento micro controlado que tem a capacidade de uma entrada e transformá-la em uma saída conforme programada. Possuem várias vantagens entre elas serem de baixo custo, possuírem um ambiente de programação simples e claro e que podem ser usados em vários sistemas operacionais [15].

E os equipamentos com tecnologia MEMS possuem dimensão micrométrica em que funcionam através de domínios das energias elétrica e mecânica [15]. Eles são classificados como micro transdutores e possui a concepção física consistente na integração de micro atuadores, micros sensores e microeletrônica [16]. Os sinais das grandezas físicas são identificados pelos micro sensores e ao serem processados, eles estabelecem comandos em que ordenam o micro atuador a realizar um certo movimento, como demonstrado na Figura 7 [17]. Dentro do conjunto dos MEMS, existem vários equipamentos com várias funções, como por exemplo os acelerômetros, medidores de corrente elétrica, entre outros [15].

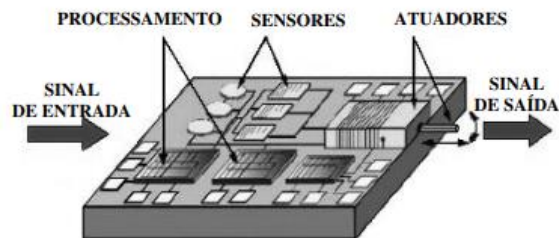


Figura 7 - Ilustração de um MEMS [17]

O sensoriamento realizado por equipamento sem fio tem um forte potencial para a monitorização de estrutural substituindo os métodos tradicionais pois com ele é possível realizar medições, é de fácil implementação [19] e não utilizam cabo na qual possibilita uma implementação mais flexível e particular a cada estrutura [18]. Entretanto, a inserção definitiva dos sensores sem fio possui dificuldade. Por exemplo, o tempo necessário para o funcionamento do equipamento já que não há cabos transmitindo eletricidade; as perdas de dados ocasionadas pelas interferências; limitação das bandas de frequências; entre outros [18].

Com isso, para que os equipamentos de monitorização sem fio sejam capazes de serem usados nas estruturas reais e de fato substituírem os sistemas tradicionais, recomendam-se um pré-requisitos de eficiência a fim de uma instrumentação adequada, dentre eles:

- Autonomia do sensor: empregar módulos de baixo consumo de energia além da plataforma permitir vários jeitos de alimentação, como exemplo a utilização de sistemas energéticos sustentáveis e baterias externa.
- Aquisição e transmissão de dados em tempo real: para casos de leituras remotas é importante o equipamento ter a capacidade de receber e enviar ordens ao usuário.
- Baixo custo: os componentes do equipamento têm de possuir preços acessíveis e estarem consolidados no mercado.
- Confiabilidade dos dados: é necessário atentar-se a alguns fatores como por exemplo ruído, perda de dados, sensibilidade, faixa de frequência e duração da obtenção dos dados. Em relação ao ruído, esse varia conforme a qualidade do equipamento, forma de obter e enviar os dados e pela forma em que são conectados. Já a perda de dados ocorre principalmente pela falta de comunicação pelos cabos, com isso é importante os equipamentos estarem bem sincronizados e haja compatibilidade entre os dispositivos.

3. Descrição do equipamento e software utilizado

3.1. Equipamento

3.1.1. Informações gerais

O equipamento utilizado e testado no âmbito do presente trabalho foi o sensor, demonstrado na Figura 8, STWIN Sensor Tile wireless industrial node – STEVAL-STWINKT1B – na qual é uma união de pacotes de software e firmware otimizado onde incluiu uma placa composta por um material plástico, bateria, placa de sistema central com sensores incorporados e microcontrolador de baixa potência. Esses sensores captam movimentos em uma ampla gama de frequência de vibração além de monitorizar a temperatura [10].



Figura 8 - Sensor STWINKT1B

A placa do sistema central possui nove tipos de sensores específicos sendo que os sensores de movimento interligam com o microcontrolador através da comunicação síncrona SPI e o magnetómetro e sensores ambientais interligam através da comunicação serial I²C.

Na Figura 9 a seguir é possível observar a localização dos sensores onde:

- U2: HTS221 – sensor de umidade relativa e temperatura;
- U3: LPS22HH – sensor digital de pressão absoluta;
- U6: STTS751 – sensor digital de temperatura local de baixa voltagem;
- U9: ISM330DHCX – sensor de vibração nas três direções e três rotações;

- U11: IIS3DWB – sensor de vibração digital de baixo ruído nos três eixos;
- U12: IIS2DH – sensor de movimento de alto desempenho de ultra baixo consumo/accelerômetro;
- U13: IIS2MDC – magnetómetro de três eixos de ultra baixo consumo;
- M1: IMP23ABSU – microfone analógico;
- M2: IMP34DT05 – microfone digital de grau industrial.

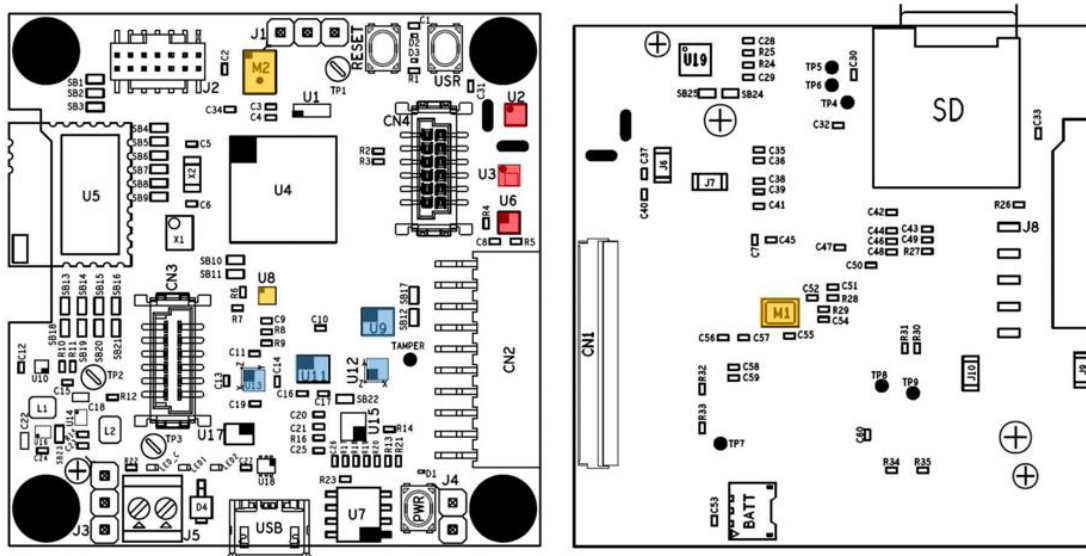


Figura 9 - Localização dos sensores na placa [10]

A placa STWIN é composta por vários sensores que consomem uma potência muito baixa. A sua alimentação principal é dada por uma bateria de polímero de iões de lítio de 3,7V, 480mAh e do carregador de bateria incorporado (STBCO2) com Vin de 4.8 – 5.5V.

Na Figura 10 a seguir tem-se demarcado a localização do carregador de bateria linear de iões de lítio STBCO2 pela sigla U15; o conector de bateria pela sigla BATT; os pinos de bateria – J4; conector de alimentação externa de 5V – J5; e também o botão de ligar e desligar o equipamento – PWR.

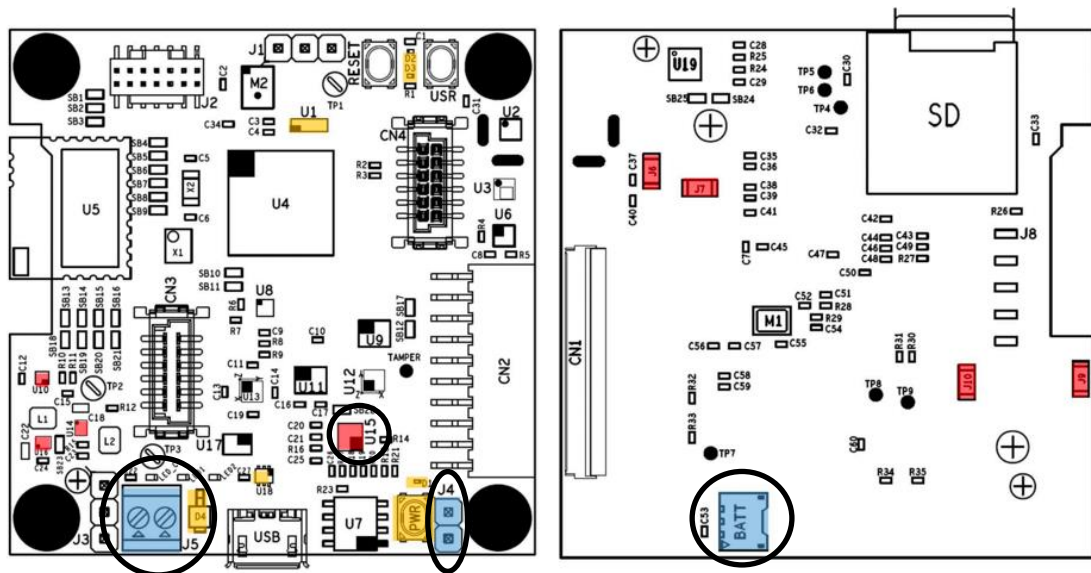


Figura 10 - Localização do carregador de bateria linear de íões de lítio [10]

A placa do sistema central STWIN pode obter energia de diferentes formas:

- a primeira é através de conector micro USB de 5V;
- a segunda é através do conector J5 demonstrada na Figura 10 de 4.8 – 5.5V sendo que a corrente precisa ser restringida a 2A;
- ou através da bateria de polímeros de íões de lítio de 3.7V e 480mAh e do carregador de bateria incorporado na placa STBC02.

A placa está inserida em uma caixa protetora feita de plástico em que abrange a placa do sistema e a bateria juntas. Além disso, a caixa pode alojar também dois ímãs com a finalidade de juntar ao elemento estrutural metálico que será analisado sem precisar utilizar outros métodos como por exemplo fios. Os ímãs não estão incluídos no kit STEVAL-STWINKT1B.

A aplicação HSDatalog (High Speed Datalog) permite guardar os dados de qualquer combinação de sensores e microfones até a taxa de amostragem máxima suportada. Os dados dos sensores são armazenados em um cartão micro SD, SDHC (Secure Digital High Capacity), em que é formatado com sistema de arquivo FAT32 ou senão pode ser transportado para um computador através de USB.

Quando inicia, o aplicativo tenta carregar a configuração do dispositivo a partir do cartão SD (se existir) e depois vai para o modo do estado inativo até obter o comando de partida via USB, botão de pressão ou Bluetooth. Juntamente com o aplicativo HSDatalog, os scripts

MATLAB e Python, dentro da pasta Utilidades, estão disponíveis para ler e plotar os dados salvos automaticamente.

3.1.2. Programação do sensor

A placa STWINKT1B utiliza arquivos de configuração “.json” - o DeviceConfig.json e Execution_Config.json - a fim de mudar as configurações sem ter que mudar a programação da placa em si. Devido isso, é necessário somente a mudança no texto desses arquivos de configuração [9].

Com a placa STWINKT1B desconectada e desligada é possível carregar o cartão SD para que as novas configurações sejam usadas até que a placa seja reinicializada. Toda vez que a placa é conectada a um computador, ela liga automaticamente.

O arquivo Execution_Config.json retém as informações sobre o comportamento do equipamento como um todo quando ligada e lida, e está demonstrada na Figura 11 a seguir. E o arquivo DeviceConfig.json retém as informações sobre o comportamento dos sensores em si.

```
{
  "info": {
    "version": "1",
    "auto_mode": true,
    "phases_iteration": 5,
    "start_delay_ms": 0,
    "execution_plan": [
      "datalog",
      "idle"
    ],
    "datalog": {
      "timer_ms": 60000
    },
    "idle": {
      "timer_ms": 5000
    }
  }
}
```

Figura 11 - Arquivo Execution_Config.json – dados do equipamento como um todo

Nesse arquivo Execution_Config.json tem-se que:

- versão: destina-se somente para tomar notas;
- auto_mode: quando for “true” significa que ao ligar o equipamento, ele já começa a medição;

- `phases_interation`: define o número de vezes que o plano de execução será executado;
- `start_delay_ms`: define o atraso inicial em milissegundos sempre que a placa é iniciada ou reiniciada para a medição;
- `execution_plan`: é a função que é chamada para executar as etapas;
- `datalog`: iniciará o registro dos dados dos sensores que foram selecionados a partir do dispositivo;
- `idle`: é a pausa;
- `timer_ms`: é a duração de cada uma das etapas em milissegundos.

Mesmo tendo vários tipos de sensores na placa, a configuração de cada um é parecido. Essas configurações, que estão presentes no arquivo `DeviceConfig`, na qual como o próprio nome diz, contém as informações sobre o dispositivo, demonstradas na Figura 12, são:

“`id`”: é o id para cada um dos sensores, podendo ser utilizado tanto pelo firmware quanto pelo conversor para diferenciar qual sensor será utilizado.

“`nome`”: é o nome do sensor em que é utilizado pelo firmware e pelo script do conversor python para denominar os arquivos com sensor compatível.

“`sensor discriptor`”: compreende as configurações para cada “`subSensor Descriotor`”. Muito dos sensores como por exemplo os acelerômetros possui em seu pacote também um sensor de temperatura.

“`sensorStatus`”: os ajustes do sensor são definidos, como por exemplo, para ativar um sensor, o ajuste do “`isActive`” deve ser programado para “`true`”.

```

"sensor": [
  {
    "id": 0,
    "name": "IIS3DWB",
    "sensorDescriptor": {
      "subSensorDescriptor": {
        "id": 0,
        "sensorType": "ACC",
        "dimensions": 3,
        "dimensionsLabel": [
          "x",
          "y",
          "z"
        ],
        "unit": "g",
        "dataType": "int16_t",
        "FS": [
          2,
          4,
          8,
          16
        ],
        "ODR": [
          26667
        ],
        "samplesPerTs": {
          "min": 0,
          "max": 1000,
          "dataType": "int16_t"
        }
      }
    },
    "sensorStatus": {
      "subSensorStatus": {
        "ODR": 26667,
        "ODRMeasured": 27584.74609,
        "initialOffset": 0.277445,
        "FS": 2,
        "sensitivity": 0.000488,
        "isActive": true,
        "samplesPerTs": 1000,
        "usbDataPacketSize": 3000,
        "sdWriteBufferSize": 54272,
        "wifiDataPacketSize": 0,
        "comChannelNumber": -1,
        "ucfLoaded": false
      }
    }
  }
],

```

Figura 12 - Parte da configuração do arquivo DeviceConfig.json

Para utilizar o quadro da placa STWINKT1B liga-se no botão PWR pressionando-o por aproximadamente um segundo em que o led vermelho que acende ao apertá-lo desaparece após o primeiro segundo. E com isso um led laranja começa a piscar sinalizando assim que a placa está ligada, porém não está realizando nenhuma ação. Se essa metodologia não der certo, é necessário conectar a placa à um computador e ela deverá ligar ou então é necessário trocar a baterias pois significará que ela provavelmente está esgotada.

Após a placa ligada, esta pode ser alocada para o local em que se realizará a medição. Após isso, é preciso clicar no botão “USR” em que o led verde deverá piscar rapidamente indicando que está sendo grava os dados dos sensores. Esse sensor verde fica piscando rapidamente por um minuto até se desligar e o led laranja começar a piscar lentamente. É necessário repetir este processo para mediar qualquer posição que se almeja. Cada medição é salva em arquivos individuais. Cada arquivo medido contém “AcquisitionInfo.json” e “DeviceConfig.json” e um arquivo para cada dado de sensor.

3.1.3. Informações dos sensores utilizados no ensaio

Para a realização desse trabalho foram realizados os ensaios utilizando os sensores HTS221 – sensor de temperatura – e IIS3DWB – acelerômetro de três eixos. O sensor HTS221 é um sensor ultracompacto de umidade relativa e temperatura em que sua estrutura de capacitor plano dielétrico de polímero capta variações de umidade. Ele consegue funcionar em ambientes que estejam entre -40°C a $+120^{\circ}\text{C}$. Possui uma tensão de alimentação de 1,7 a 3,6V e baixo consumo de energia. Além disso, possui uma precisão de temperatura de mais ou menos $0,5^{\circ}\text{C}$ de 15 a $+40^{\circ}\text{C}$ [11].

Já o sensor IIS3DWB é um sistema integrado com um sensor de vibração digital de 3 eixos com baixo ruído em uma faixa de frequência plana e ultra-plana. Esse sensor tem uma faixa de aceleração de escala total podendo ser de 2/ 4/ 8/ ou 16 g e tem a capacidade de medir acelerações com largura de banda de até 6 kHz. Ele consegue funcionar em uma faixa de temperatura estendida de -40°C até $+105^{\circ}\text{C}$ portanto possui uma alta estabilidade sobre temperatura e também contra choques mecânicos. Esse sensor possui uma tensão de alimentação de 2,1 V a 3,6 V [12].

3.2. Software

3.2.1. PyCharm

Os resultados medidos pelos sensores ficam em arquivo “.data” na qual é um arquivo binário. Com isso, foi programado um algoritmo utilizando a linguagem Python 3.7 no software PyCharm para transformar a leitura do cartão micro SD “.data” em uma leitura “.csv”. O software utilizado está representado na Figura 13 a seguir.

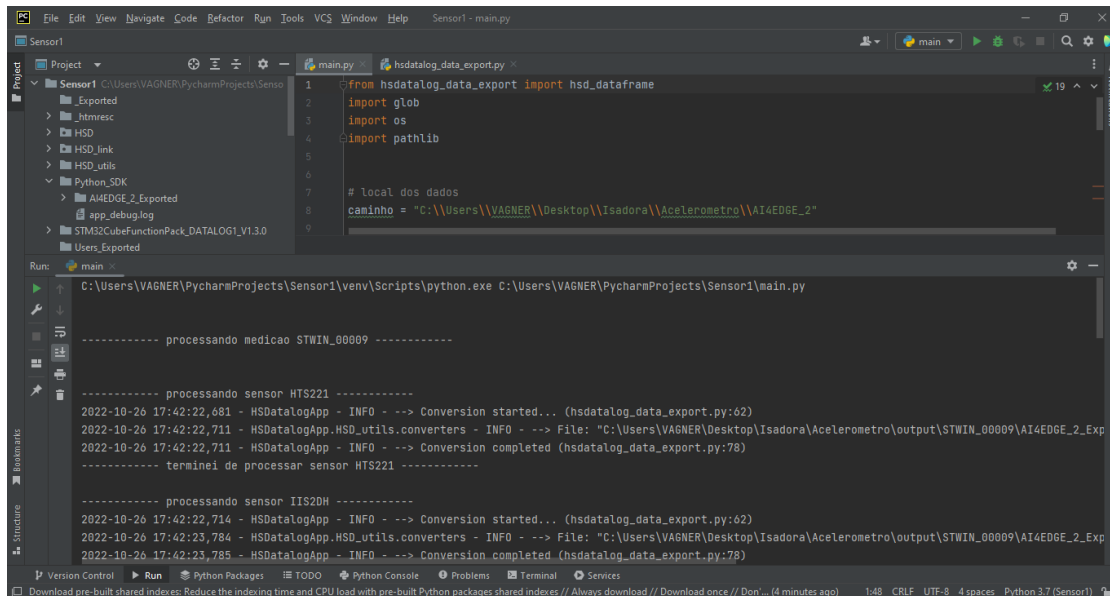


Figura 13 - Representação do software utilizado para transformar arquivo .data em .csvs

3.2.2. MatLab

Após adquirir os resultados através do software PyCharm em leitura “.csv”, utiliza-se o software MatLab, como se pode observar na Figura 14. Esse software foi usado para se obter os gráficos Tempo × Aceleração, através dos dados obtidos pelos sensores e também os gráficos Frequência × Amplitude através da Transformada Rápida de Fourier (FFT).

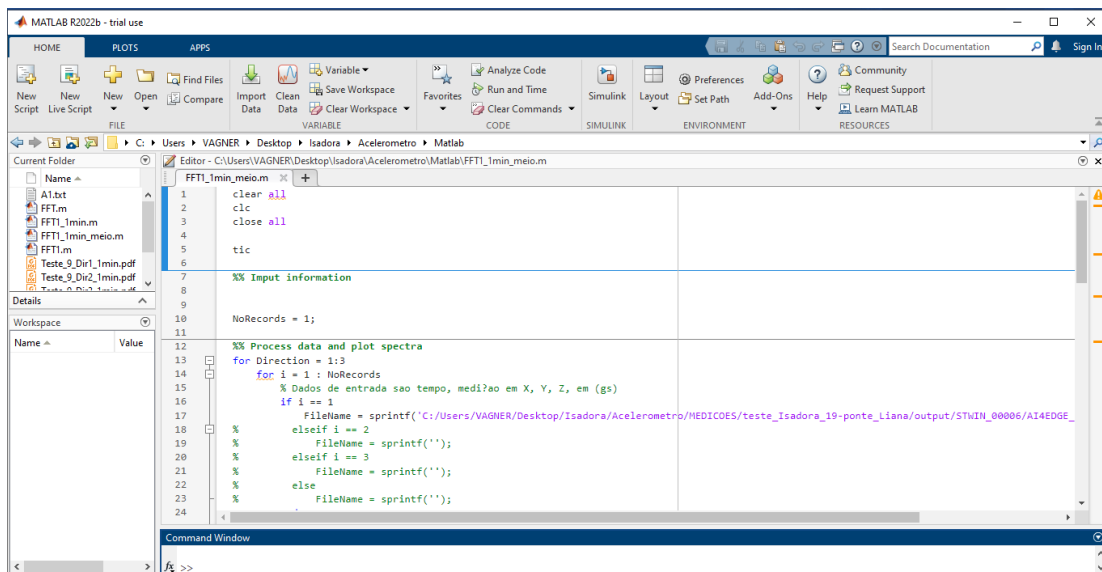


Figura 14 - Representação do software utilizado para realizar os gráficos

A transformada Rápida de Fourier é um algoritmo para converter um sinal do domínio original em componentes espectrais de frequência. Esses componentes gerados pela FFT são

oscilações que possuem a forma de senoides únicas de frequência diversa, na qual cada uma possui uma amplitude própria. É possível observar um exemplo dessa transformada na Figura 15 abaixo [14].

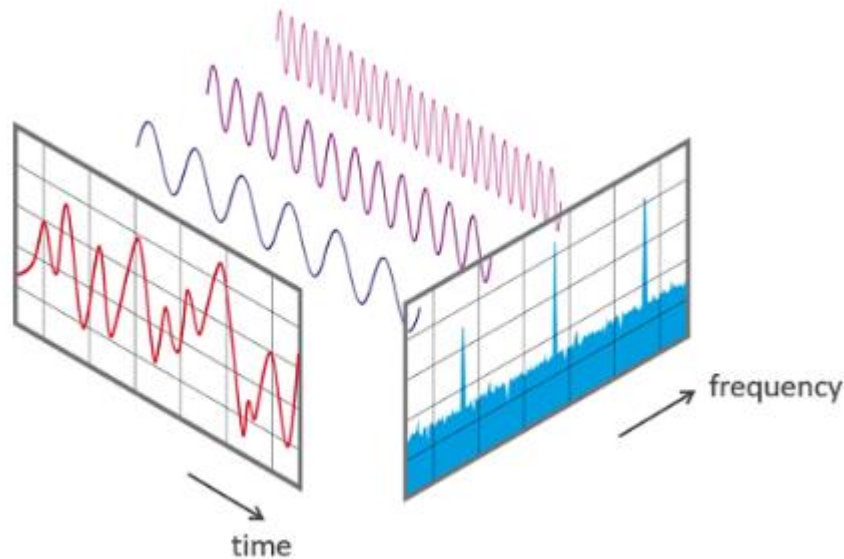


Figura 15 - Representação da transformada rápida de Fourier [14]

3.2.3. Modelação numérica da estrutura

Além de software de programação usado para ler e processar as medições dos sensores foi ainda criado um modelo numérico com recurso a elementos finitos (FEM) num software de análise estrutural intitulado Projeto Galileu para modelar alguns elementos estruturais ensaiados, nomeadamente uma viga analisada da cobertura do Estádio de Leiria. Esse software foi desenvolvido, em contexto académico, pelo Engenheiro Eduardo Seixas Monteiro, sob supervisão científica do Professor Doutor Paulo Providência e Costa (Professor Auxiliar DEC/FCT/UC) e do Professor Engenheiro Paulo Maranhã Nunes Tiago (Professor Coordenador DEC/ISEC/IPC).

Nesse programa, as ações sísmicas são alcançadas através de análises realizadas pelos Espectros de Resposta. É importante considerar que o Software Projeto Galileu representa somente o máximo valor esperado para o efeito em análise e que os seus resultados não são associados, ou seja, a resultante de um efeito não considera a resultante de outro efeito simultaneamente [8].

A análise por Espectro de Resposta é resolvida utilizando o método da Sobreposição Modal na qual os modos de vibração são alcançados através da solução do problema de valores e

vetores próprios. Ao utilizar o método da Iteração em Subespaços, obtém-se várias matrizes de massa elementar e por conseguinte a matriz de massa total.

Para se caracterizar o Espectro de Resposta, o Software utiliza o regulamento exportado por um ficheiro do utilizador, ou através dos espectros estabelecidos pelo Regulamento Português RSA ou também conforme definido no Eurocódigo 8 – Projecto de Estrutura Sismo Resistente.

Dependendo do grau de interação entre os efeitos do modo de vibração obtém-se a combinação dos efeitos associados. O software emprega a CQC – Complete Quadratic Combination – nas combinações modais em que confere uma maior assertividade nos efeitos de proximidade e interação entre os modos de vibração do que a combinação SRSS – Square Root of their Squares. Entretanto a combinação direcional é realizada através da média quadrática – SRSS – das combinações modais de uma coordenada em questão para as direções em análise, isso faz com que o resultado seja mais rigoroso e ao lado da segurança.

4. Estudo de sensibilidade dos sensores de baixo custo

Por forma a avaliar as capacidades do sensor utilizado, realizaram-se estudos de sensibilidade que compreenderam duas etapas. A primeira etapa – familiarização e testagem do equipamento – foi para tentar entender as potencialidades do mesmo e funcionamento de cada sensor. Já a segunda etapa do estudo foi a realização de testes de aplicação reais para comparar os resultados obtidos e analisá-los.

4.1. Familiarização e testagem do equipamento

Nessa primeira etapa do estudo de sensibilidade dos sensores de baixo custo, os ensaios foram realizados com o objetivo de saber na prática como ligar e fazer medição para posteriormente programar com vários intervalos de tempo diferentes a fim de se entender o comportamento do equipamento.

A princípio, o sensor foi programado a fim de ser realizar somente uma medição durante um minuto. Alterou-se os dois arquivos disponíveis no equipamento, em que no arquivo “DeviceConfig.json”, para os sensores em estudo – IIS3DWB e HTS221 – alterou-se o item “isActive” para “true” e nos outros sensores deixou “false” a fim de não se realizar medições nesses outros sensores. E no arquivo “Execution_Config.json” foi alterado para essa configuração em que no item “datalog” inseriu-se 60.000 milissegundos ficando programado conforme a Figura 16.

```
{
  "info": {
    "version": "1",
    "auto_mode": false,
    "phases_iteration": 1,
    "start_delay_ms": 0,
    "execution_plan": [
      "datalog",
      "idle"
    ],
    "datalog": {
      "timer_ms": 60000
    },
    "idle": {
      "timer_ms": 100
    }
  }
}
```

Figura 16 - Programação do equipamento para o primeiro ensaio

Após a alteração dos arquivos no computador, foi colocado no equipamento o microSD e iniciou a medição em cima de uma mesa. Observou-se que, durante a medição, o equipamento acendia uma luz pulsada na cor verde e ao terminar, pulsava uma luz na cor laranja conforme demonstrado na Figura 17 a seguir.



Figura 17 - Luzes pulsadas no equipamento

Após a medição, obteve-se o arquivo “.data” no cartão de memória acoplado nos sensores e através do Software PyCharm e da linguagem Python obteve-se esses resultados em arquivo “.csv”.

Posteriormente, procurou-se realizar as medições de forma automática, sem precisar ligar todas as vezes que quisesse medir. Com isso, alterou-se o arquivo “Execution_Config.json” conforme a Figura 18 abaixo, em que as medições iriam se iniciar de forma automática (mudando o item “auto_mode” para “true”); havendo 6 medições (“phases_iteration” igual a 6); e o tempo de intervalo de 10 minutos (“idle” de 600.000 milissegundos).

```
{
  "info": {
    "version": "1",
    "auto_mode": true,
    "phases_iteration": 6,
    "start_delay_ms": 0,
    "execution_plan": [
      "datalog",
      "idle"
    ],
    "datalog": {
      "timer_ms": 60000
    },
    "idle": {
      "timer_ms": 600000
    }
  }
}
```

Figura 18 - Programação do equipamento para o segundo ensaio

O equipamento foi instalado em uma varada, de estrutura metálica, e foi possível observar a luz pulsada verde indicando que estava sendo realizadas medições e após um minuto a luz pulsava laranja indicando o período de pausa. Com isso, observou depois de aproximadamente 30 minutos que nenhuma luz estava sendo piscada, então retirou o cartão microSD do equipamento e inseriu-o no computador e notou-se apenas uma medição.

Mudou-se assim, o arquivo para um intervalo de pausa de 5 minutos e na própria mesa foi ligado o equipamento para observar as luzes. Realizou-se a primeira medição durante um minuto e depois só ficava piscando a luz laranja, não medindo novamente até que se desligou as luzes. Verificou-se que foi realizado apenas uma medição. Com isso, foi testado novamente com a mesma programação das anteriores mudando apenas o intervalo de pausa para 1 minuto e continuou o mesmo, realizando somente uma medição.

Após essas tentativas, foi mudado a programação para medidas menores, medindo por 10 segundos em um intervalo de 5 segundos sendo 3 vezes isso. E essa medição deu certo, foi realizado as 3 medições de 10 segundos cada no intervalo proposto. Depois disso, leu-se o manual novamente para encontrar se havia algum limite de tempo de pausa e não encontrou, mas tentou realizar outra medição sendo agora o intervalo de pausa de 59 segundos e assim também foi realizado as medições propostas. Ou seja, concluiu-se com esses testes que o intervalo máximo que o equipamento admitia para ter várias medições de forma automática é no máximo 59 segundos.

Após essa descoberta, foi mudado o arquivo “Execution_Config.json” de várias formas a fim de se observar como ocorria as medições. Mudou-se a programação do “start_delay_ms” para 5000 milissegundos, ou seja, após apertar o botão “power” para ligar o equipamento, estando o os sensores programados para iniciar de forma automática no “auto_mode” e dentro do “execution_plan” foi inserido no total dois “idle” para aumentar o tempo de pausa de 59 segundos para 1 min e 58 segundos. E a programação final ficou conforme a Figura 19 abaixo.

```

{
  "info": {
    "version": "1",
    "auto_mode": true,
    "phases_iteration": 3,
    "start_delay_ms": 5000,
    "execution_plan": [
      "datalog",
      "idle",
      "idle"
    ],
    "datalog": {
      "timer_ms": 10000
    },
    "idle": {
      "timer_ms": 59000
    }
  }
}

```

Figura 19 - Programação para testar tempo de pausa

Depois foi programado o arquivo “Execution_Config.json” conforme a Figura 20 a seguir, em que deixou ligado o modo automático, porém sendo o “start_delay_ms” de 10 segundos, a “phases_iteration” de 3 vezes e no “execution_plan” com 8 idle de 59 segundos cada para ter um intervalo maior entre as medições. Tentou-se a priori com 9 idle porém não deu certo.

```

{
  "info": {
    "version": "1",
    "auto_mode": true,
    "phases_iteration": 3,
    "start_delay_ms": 10000,
    "execution_plan": [
      "datalog",
      "idle",
      "idle",
      "idle",
      "idle",
      "idle",
      "idle",
      "idle",
      "idle"
    ],
    "datalog": {
      "timer_ms": 60000
    },
    "idle": {
      "timer_ms": 59000
    }
  }
}

```

Figura 20 - Programação para testar tempo maior de pausa

Fazendo várias medições, sempre mudando o “phases_iteration” e “timer_ms” do “datalog”, observou que somente conforme a Tabela 3 a baixo realizou-se as medições conforme programado.

| | | | | | |
|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Phases iteration | 4 | 3 | 3 | 4 | 2 |
| Datalog | 60s | 120s | 180s | 240s | 300s |
| Idle | 59s * 8 | 59s * 8 | 59s * 8 | 59s * 8 | 59s * 8 |

Tabela 3 - Resumo das programações que deram certas

4.2. Medição de frequências em estruturas sujeitas a vibração ambiental

Para a segunda etapa do estudo, foram realizadas medições em três situações diferentes com o objetivo de analisar a sensibilidade do sensor IIS3DWB para vibrações com diferentes amplitudes. Os três casos consistiram da medição das frequências de um massageador corporal, em uma ponte pedonal na cidade de Leiria e num edifício com estrutura metálica no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, na cidade de Aveiro.

Essa etapa do estudo de sensibilidade dos sensores é dividida em duas partes, em que na primeira parte é onde se realiza as medições conforme a programação proposta e a segunda parte é a conversão dos dados, pelo software PyCharm, em arquivo “.CSV” para poder processar as leituras a fim de então obter os resultados e gráficos dos espectros de potência através do software MatLab.

4.2.1. Massageador

4.2.1.1. Descrição do ensaio

Primeiramente realizou-se medições com um massageador corporal no dia 16 de novembro de 2022. O equipamento é da marca *Jocca*, modelo: 6017, 220-240V, 50Hz e 28W. Ele foi instalado sendo amarrado em uma cadeira pois, ao ligá-lo mexia-se muito e o sensor foi colocado em uma das pontas da cadeira fixada com uma fita, conforme podemos observar na Figura 21 abaixo.

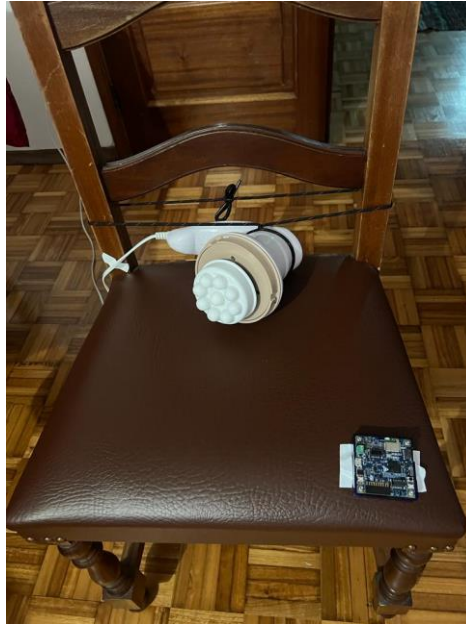


Figura 21 - Teste com massageador

Foi programado o sensor para realizar medições conforme as Figura 22 à Figura 24 a seguir, primeiramente foram 2 medições de 5min cada e um intervalo de no total de 7min e 52seg, onde, realizou-se duas vezes essa configuração para obter então 4 medições. Depois realizou 4 medições de 1min, com o mesmo tempo de intervalo, e por último 3 medições de 2min, também com o mesmo tempo de intervalo. Foi ativado o sensor IIS3DWB na qual mede a vibração nas três direções, duas na longitudinal no plano do sensor e uma perpendicularmente.

```
{
  "info": {
    "version": "1",
    "auto_mode": true,
    "phases_iteration": 2,
    "start_delay_ms": 10000,
    "execution_plan": [
      "datalog",
      "idle",
      "idle",
      "idle",
      "idle",
      "idle",
      "idle",
      "idle",
      "idle"
    ],
    "datalog": {
      "timer_ms": 300000
    },
    "idle": {
      "timer_ms": 59000
    }
  }
}
```

Figura 22 - Programação de 5 min - massageador

```

{
  "info": {
    "version": "1",
    "auto_mode": true,
    "phases_iteration": 4,
    "start_delay_ms": 10000,
    "execution_plan": [
      "datalog",
      "idle",
      "idle",
      "idle",
      "idle",
      "idle",
      "idle",
      "idle",
      "idle"
    ],
    "datalog": {
      "timer_ms": 60000
    },
    "idle": {
      "timer_ms": 59000
    }
  }
}

```

Figura 23 - Programação de 1 min - massageador

```

{
  "info": {
    "version": "1",
    "auto_mode": true,
    "phases_iteration": 3,
    "start_delay_ms": 10000,
    "execution_plan": [
      "datalog",
      "idle",
      "idle",
      "idle",
      "idle",
      "idle",
      "idle",
      "idle",
      "idle",
      "idle"
    ],
    "datalog": {
      "timer_ms": 120000
    },
    "idle": {
      "timer_ms": 59000
    }
  }
}

```

Figura 24 - Programação de 2 min – massageador

4.2.1.2. Análise dos resultados

Para o massageador, a primeira análise a ser feita foi em relação a comparação dos resultados nas três direções para todas as medições realizadas de duração total de cinco minutos. Nos gráficos a seguir, tem-se o exemplo do acelerograma da primeira medição de 5 minutos na direção longitudinal X (Figura 25), bem como os espectros de resposta referentes às quatro

medições na direção longitudinal X (Figura 26), na direção longitudinal Y (Figura 27) e na direção perpendicular Z (Figura 28).

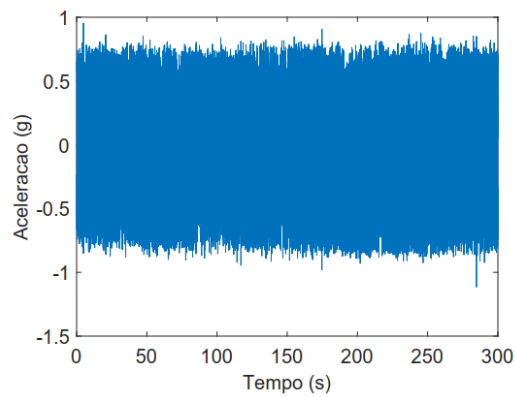


Figura 25 - Acelerograma da direção longitudinal X do massageador em 5 minutos

Na Figura 25 observamos que o sensor conseguiu aferir uma aceleração máxima de 0,75g a -0,75g, com uma amplitude de 1,25g aproximadamente na qual se manteve essencialmente constante durante toda a medição, sem nenhuma interferência.

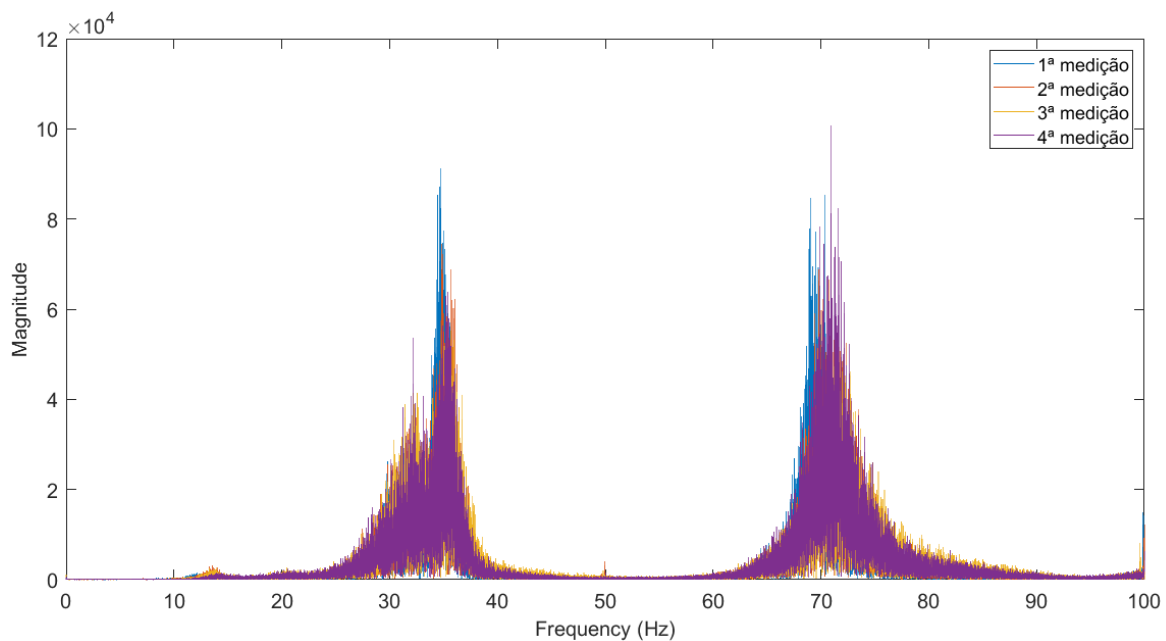


Figura 26 - Espectro de potência na direção longitudinal X do massageador em 5 minutos

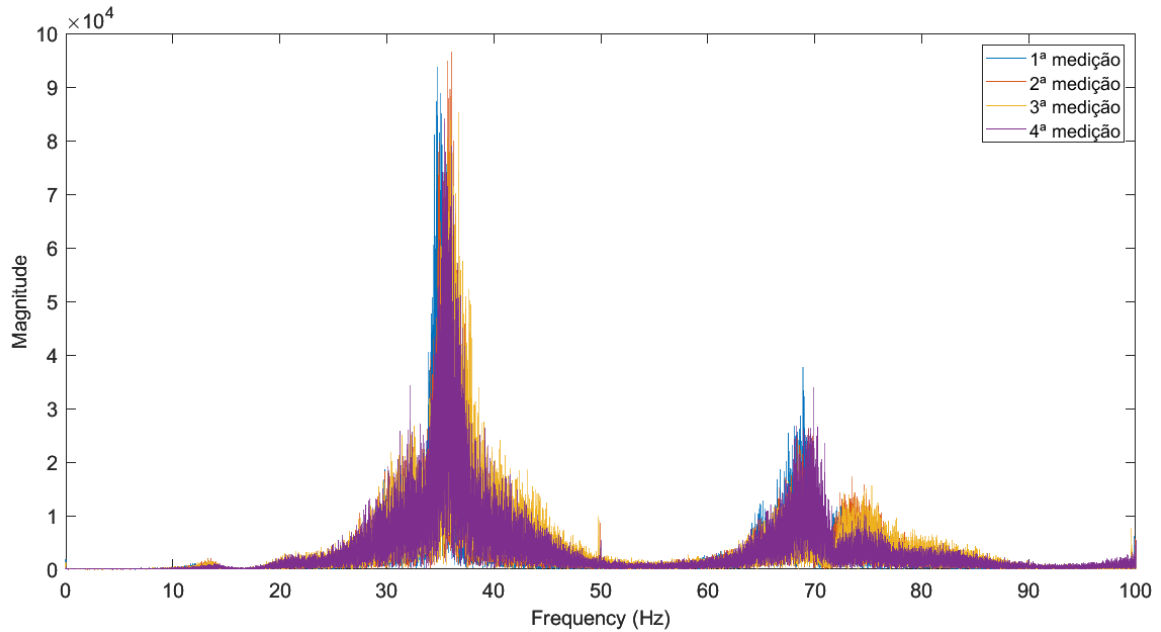


Figura 27 - Espectro de potência na direção longitudinal Y do massageador em 5 minutos

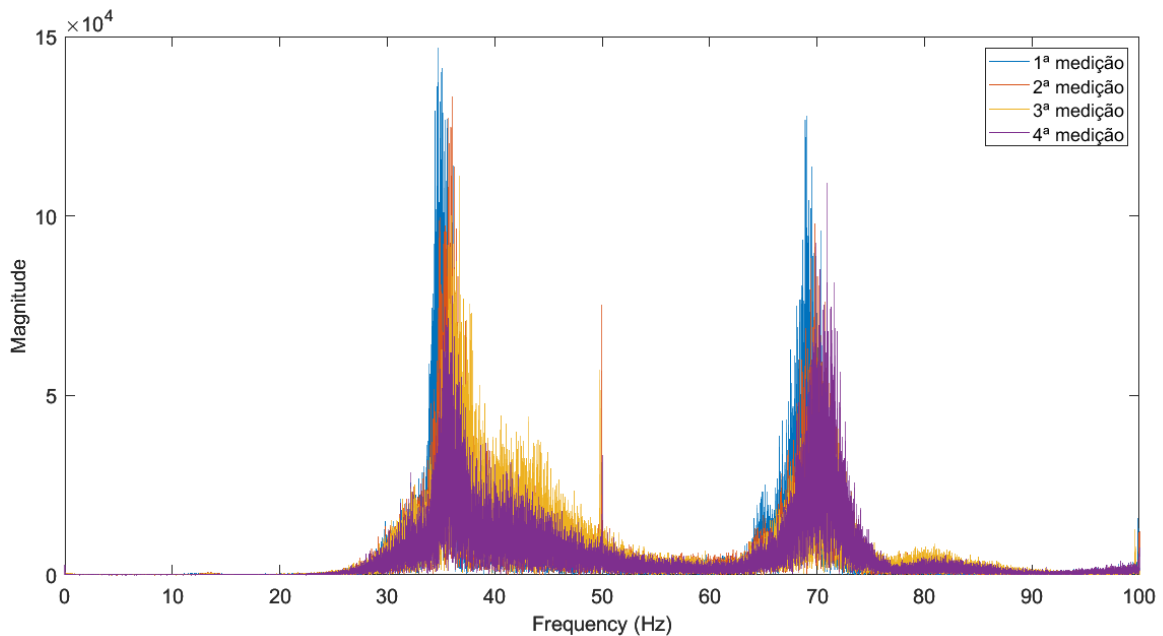


Figura 28 - Espectro de potência na direção longitudinal Z do massageador em 5 minutos

Devido o formato do equipamento medido e após os ensaios realizados, pode-se observar que para as quatro medições, há uma constância medida em relação as frequências para cada direção, ou seja, os gráficos para cada direção obtiveram praticamente o mesmo resultado. É possível observar também que em todos os casos – todas as direções e todas as medições – os picos de amplitude foram praticamente nas mesmas frequências, por volta de 35 Hz, 50 Hz e 68,5 Hz. A frequência de 50 Hz já era esperada por ser a frequência do aparelho

conforme a sua descrição, e provavelmente as outras frequências dizem respeito ao efeito da cadeira no sensor, como o sensor foi instalado no estofado da mesma, uma parte totalmente flexível, pode ter tido influência no resultado obtido.

Para a próxima análise, foi escolhida para estar aqui representada a direção perpendicular Z de todas as medições. A Figura 29 representa o gráfico das medições realizadas de duração um minuto. Já a Figura 30 representa o gráfico das medições realizadas de duração de dois minutos. E o gráfico das medições de cinco minutos já está representada na Figura 28.

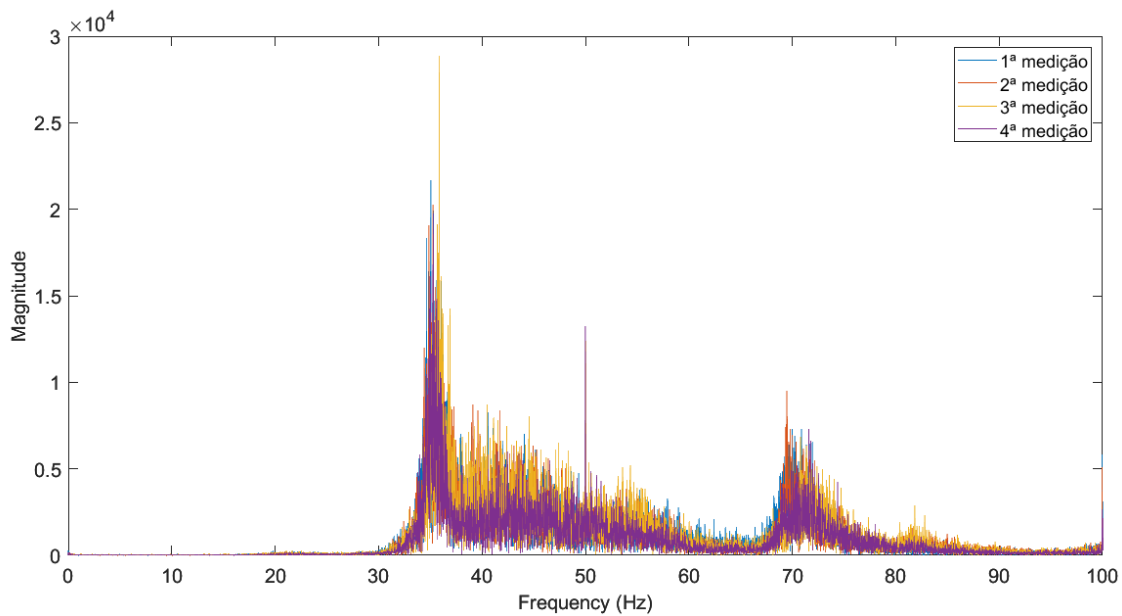


Figura 29 - Espectro de potência na direção perpendicular Z do massagedor em 1 minuto

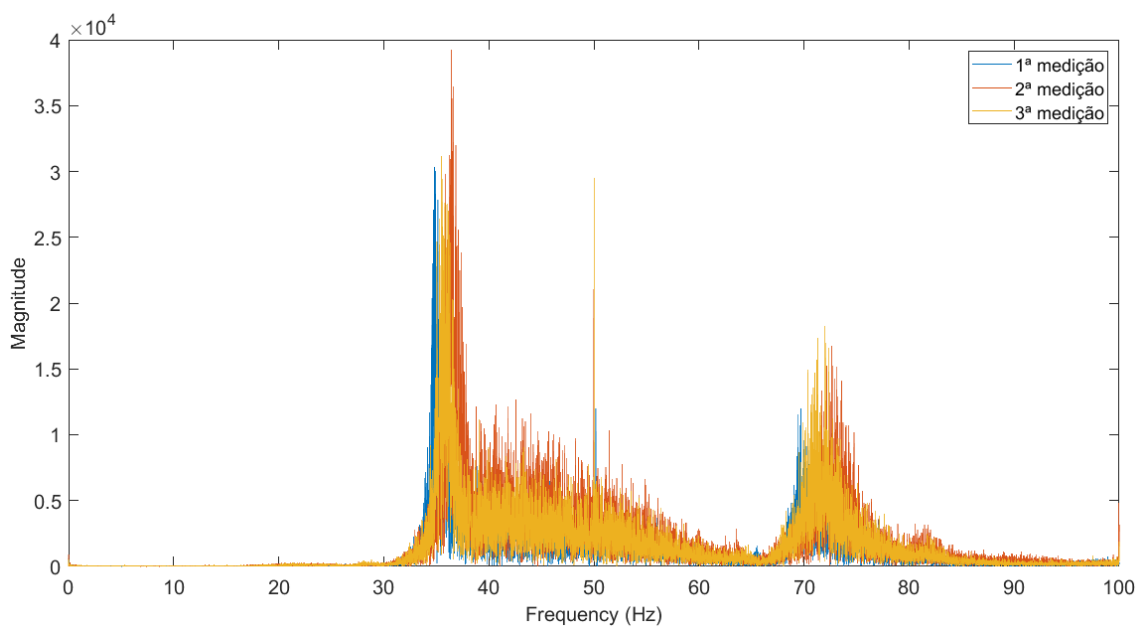


Figura 30 - Espectro de potência na direção perpendicular Z do massagedor em 2 minutos

Analisando esses gráficos, observamos que resultado das medições com diferentes durações se mantém semelhante, apesar do aumento de ruído nas medições mais longas. No anexo A, encontra-se outros resultados obtidos com essas medições.

4.2.2. Ponte Pedonal Metálica

4.2.2.1. Descrição do ensaio

No dia 07 de dezembro do mesmo ano foi medido na Ponte Pedonal Metálica, conforme a Figura 31, uma ponte na cidade de Leiria sobre o Rio Lis. Foi escolhida essa ponte a fim de se comparar os resultados obtidos do sensor STWINKT1B com os resultados obtido pelo trabalho de Liana Ostetto [13] em que foi realizado um ensaio dinâmico em 2019. Essa ponte é assimétrica na qual possui um vão livre de 29 metros e é atirantada, possui um tabuleiro metálico de 0,22 metros de espessura, formada por cinco plataformas na qual são rotuladas entre si e possui duas vigas com perfil metálico com U [13].

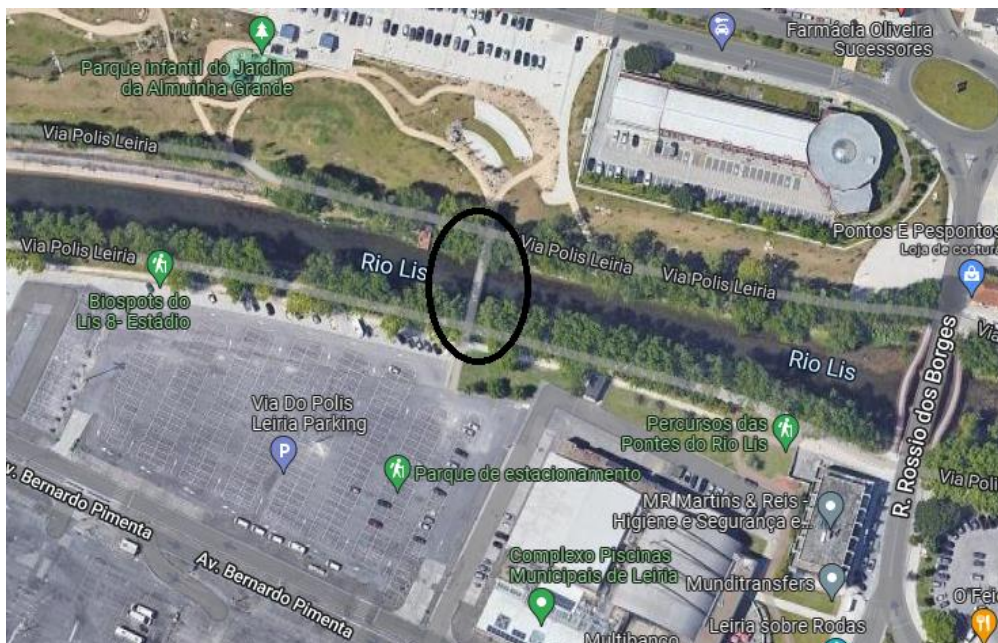


Figura 31 - Teste na ponte pedonal em Leiria [Google Maps]

Para esse ensaio, realizou-se 7 medições em várias partes da ponte conforme demonstrado na Figura 32 e com a programação conforme a Figura 33. Essa ponte é uma ponte metálica com tabuleiro de madeira, em que foi medido no meio das linhas de 1 a 4 e nas extremidades das linhas 2 a 4.

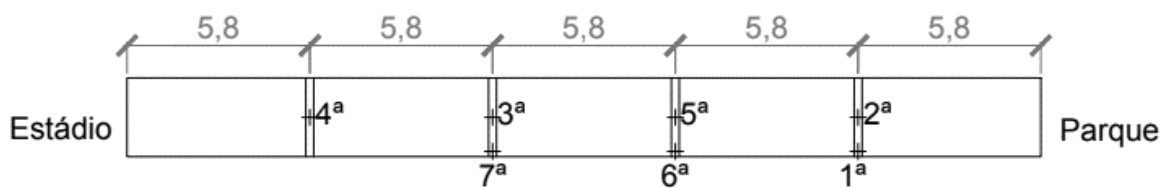


Figura 32 - Teste na ponte pedonal em Leiria, local de medição

```

{
  "info": {
    "version": "1",
    "auto_mode": true,
    "phases_iteration": 1,
    "start_delay_ms": 10000,
    "execution_plan": [
      "datalog",
      "idle"
    ],
    "datalog": {
      "timer_ms": 30000
    },
    "idle": {
      "timer_ms": 59000
    }
  }
}

```

Figura 33 - Programação de 1 minuto – ponte metálica, estrutura concreto armado e cobertura metálica

4.2.2.2. Análise dos resultados

Para a ponte metálica sobre o Rio Liz foi realizado somente medição de 5 minutos nas posições pré-estabelecidas e foi registrada a passagem de pessoas. Para eliminar o efeito das passagens de pedestres, alguns dos espectros de resposta foram realizados apenas com parte destas medições, escolhendo um minuto em que não houve passagem de ninguém. Os

resultados obtidos, na direção vertical, em termos de acelerogramas e espectros de resposta estão representados nas Figura 34 a Figura 40. Nestes, o gráfico B representa o resultado dos cinco minutos medidos e o gráfico C é somente de um minuto medido. Esse último gráfico foi realizado a fim de se diminuir os ruídos e para analisar melhor as frequências da ponte sem nenhuma interferência externa (passagem de pedestres).

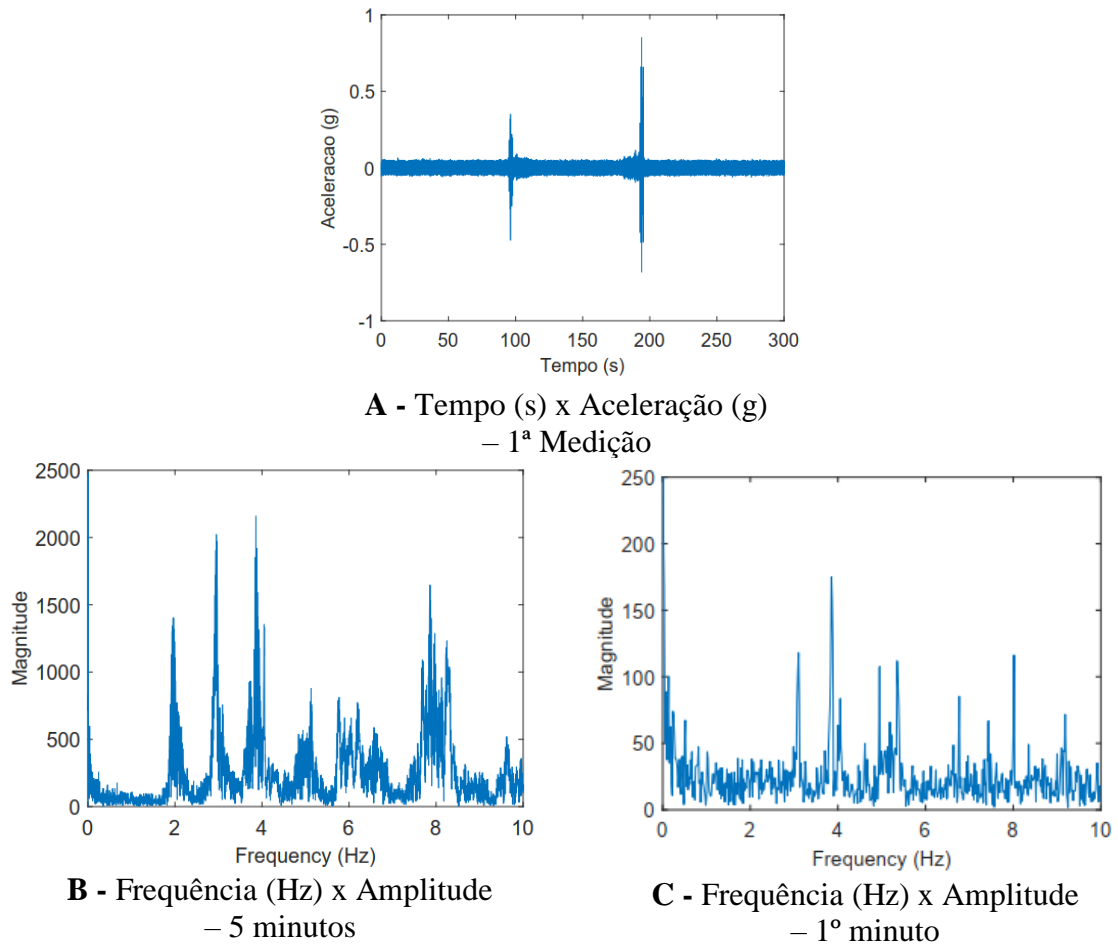
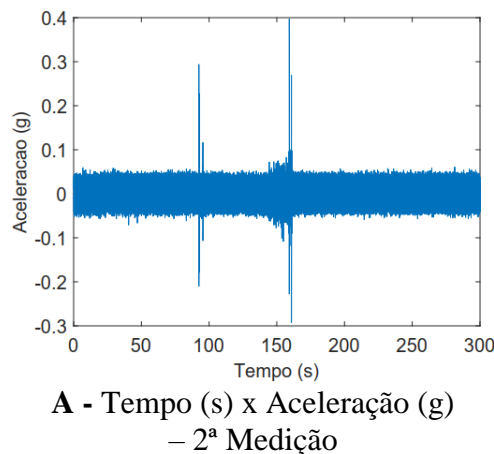


Figura 34 - Espectro de potência da primeira medição da ponte metálica



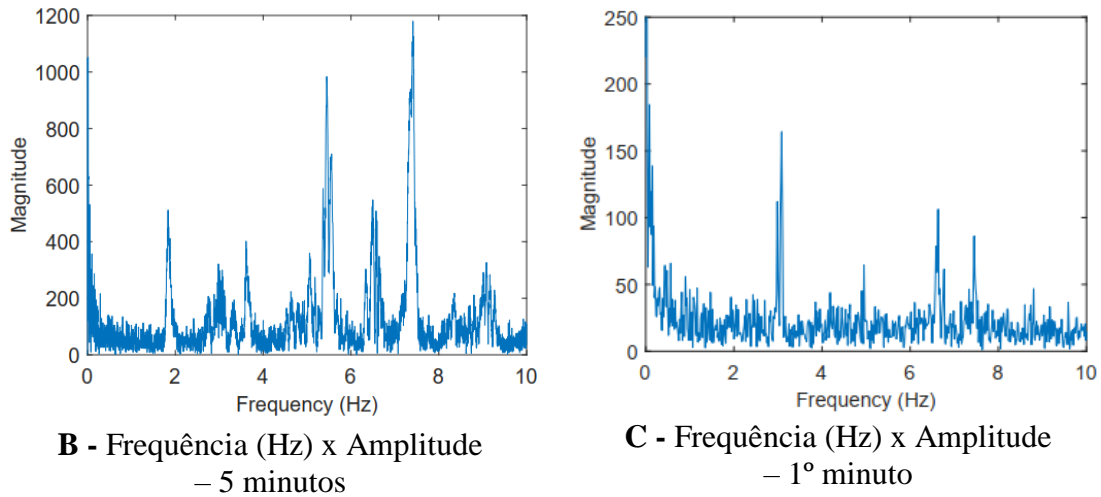
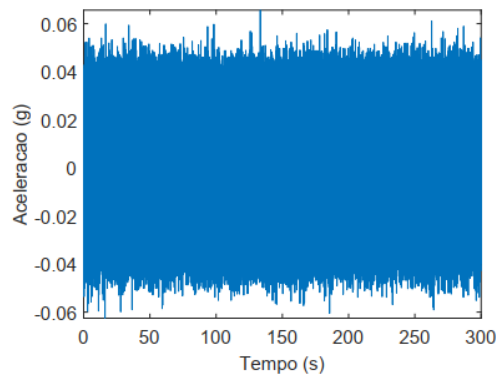


Figura 35 - Espectro de potência da segunda medição da ponte metálica

Para a primeira e a segunda medição, no gráfico A, das Figura 34 e Figura 35, é possível observar exatamente os segundos que houve passagens de pedestre, que são os picos. No gráfico B, das frequências dos cinco minutos totais medidos, observa-se claramente as várias frequências identificadas pelo sensor e quando se retira os ruídos, no gráfico C, nota-se que essa passagem de pedestres influencia no gráfico e verifica-se que a frequência próxima de 2Hz perde o significado em ambos os casos.



A - Tempo (s) x Aceleração (g)
– 3ª medição

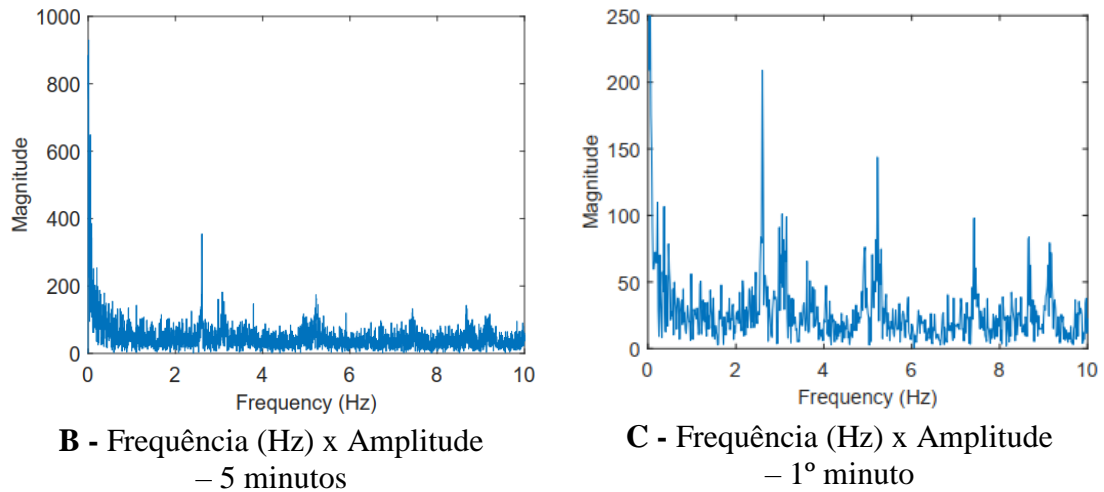


Figura 36 - Espectro de potência da terceira medição da ponte metálica

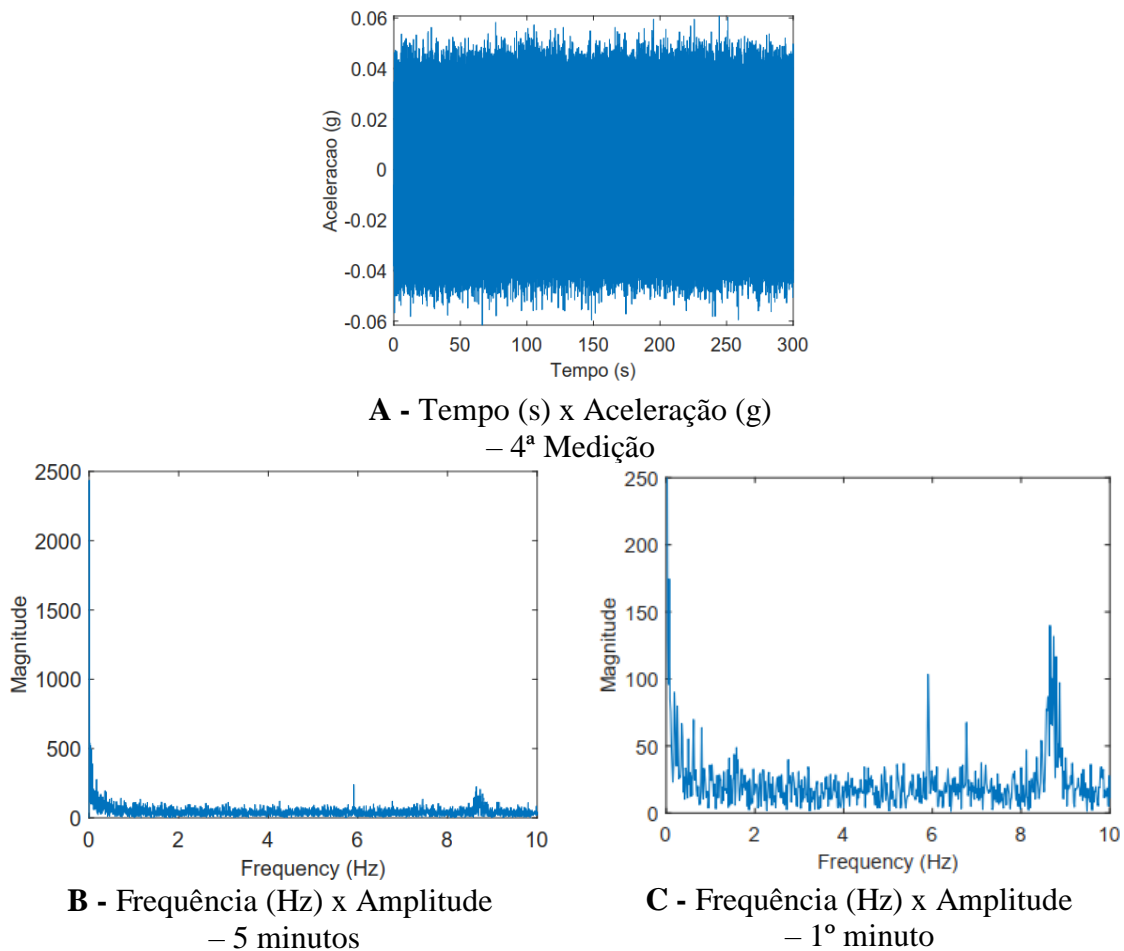
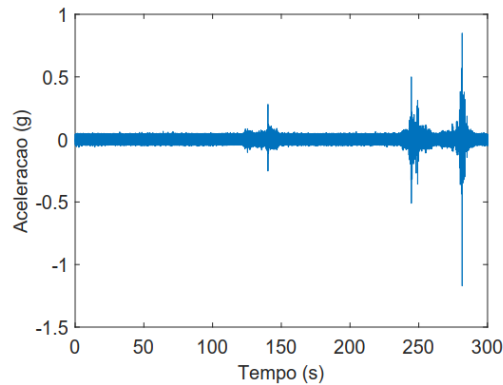


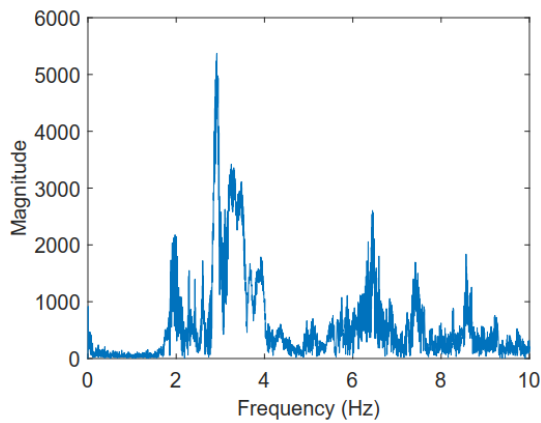
Figura 37 - Espectro de potência da quarta medição da ponte metálica

Tanto na terceira quanto na quarta medição não houve passagem de pedestre. Isso é claramente notado nos gráficos A das Figura 36 e Figura 37 pois não há picos representados, caracterizando assim, a aceleração própria da ponte metálica. Com isso, é possível notar

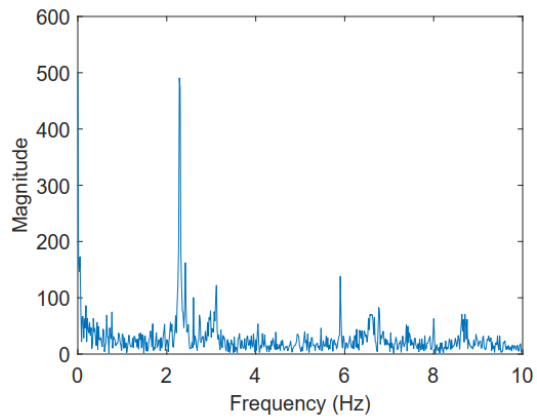
também que os gráficos B e C, Frequência (Hz) X Amplitude, para cada medição, se mantêm bem semelhantes, o que confirma mais ainda que a passagem de pedestre influencia nos gráficos conforme demonstrado nas Figura 34 e Figura 35.



A - Tempo (s) x Aceleração (g)
– 5ª Medição

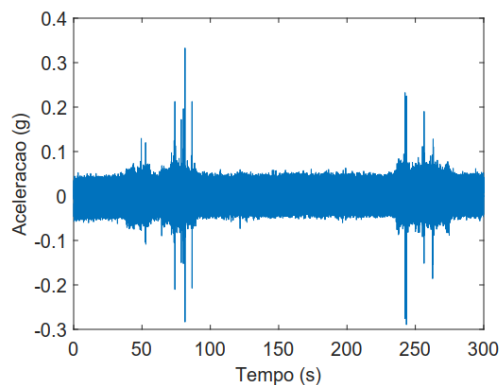


B - Frequência (Hz) x Amplitude
– 5 minutos



C - Frequência (Hz) x Amplitude
– 1º minuto

Figura 38 - Espectro de potência da quinta medição da ponte metálica



A - Tempo (s) x Aceleração (g)
– 6ª Medição

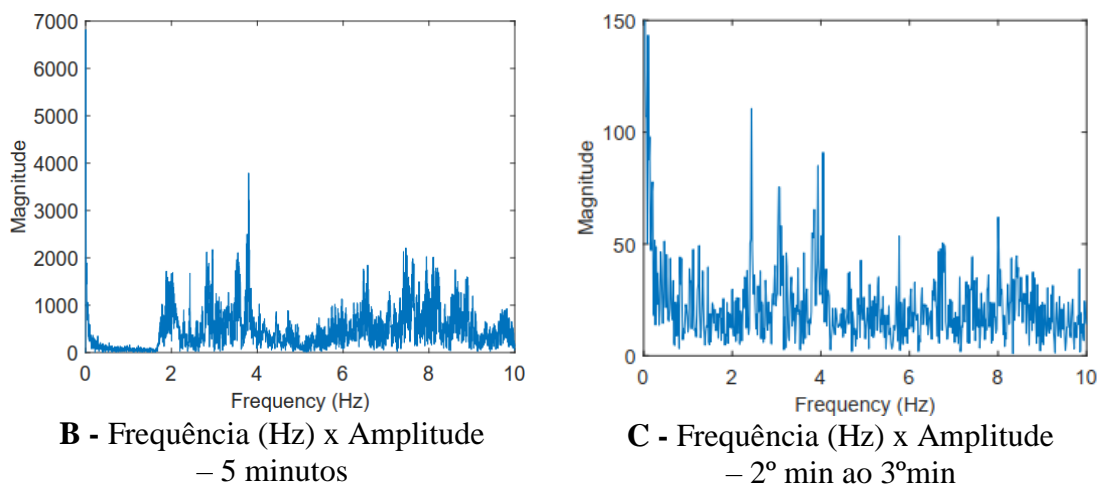
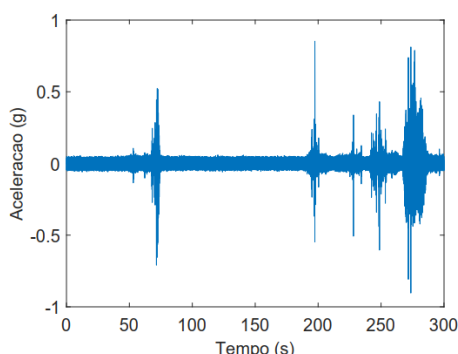


Figura 39 - Espectro de potência da sexta medição da ponte metálica



A - Tempo (s) x Aceleração (g)
– 7ª Medição

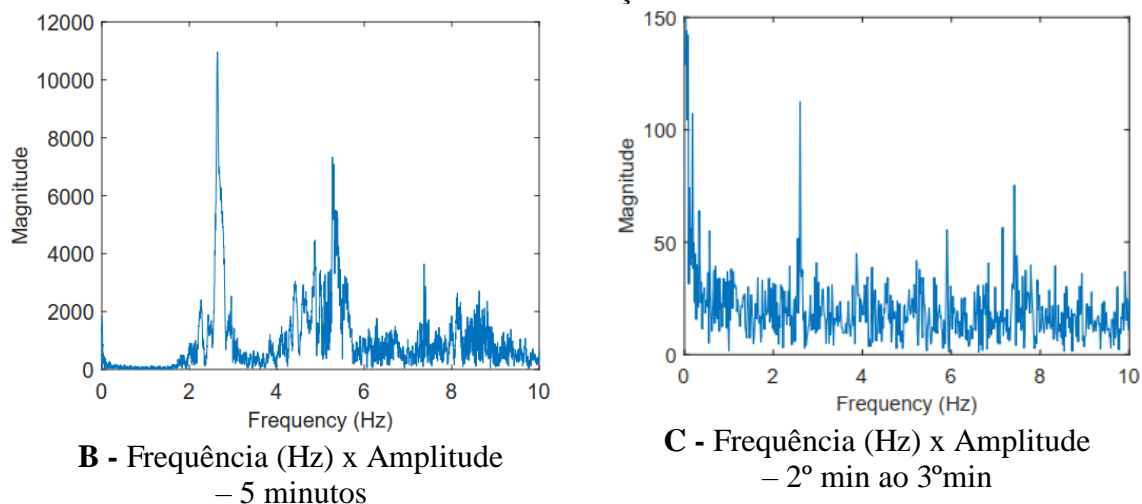


Figura 40 - Espectro de potência da sétima medição da ponte metálica

Para a quinta, sexta e sétima medição, no gráfico A, das Figura 38 à Figura 40, é possível observar quando houve passagens de pedestre, assim como nas duas primeiras medições (Figura 34 e Figura 35), em que são claramente notadas pelos picos ocasionados pelos pedestres nos gráficos. No gráfico B nota-se várias frequências identificadas pelo sensor

durante os cinco minutos medidos e no gráfico C, nota-se que a passagem de pedestre influencia no gráfico ficando com bem menos ruídos.

Através desses gráficos, fica evidente que a passagem de pedestre influencia nas ondas sinusoidais da ponte, apontando outras amplitudes para diversas frequências e quando se retira os ruídos em intervalos que não houve passagem de ninguém, é possível analisar melhor a frequência natural da estrutura em estudo.

A frequência da passada do ser humano é um parâmetro importante na definição da ação do pedestre em que essa frequência é dada pelo número de passos dado por uma pessoa em um certo intervalo de tempo [25]. Há bastantes estudos que relaciona essa frequência da passada com o tipo de andamento do ser humano, e conforme Wheeler *apud* Carlos Moutinho [25] as frequências encontradas estão representadas na Tabela 4.

| Tipo de andamento | f_p (Hz) |
|-------------------|------------|
| Andamento lento | ~1,7 |
| Andamento normal | ~2,0 |
| Andamento rápido | ~2,3 |
| Corrida lenta | ~2,5 |
| Corrida rápida | >3,2 |

Tabela 4 - Frequência da passada para vários tipos de andamento [25]

Carlos Moutinho [25] também cita em seu trabalho que os pesquisadores Matsumoto e Schulze encontraram que a frequência da passada de um andar normal varia entre 1,5 e 2,5Hz, e em relação a corrida lenta, a frequência oscila entre 2,4 à 2,7Hz. Porém é admitido que em corrida a frequência da passada em uma corrida esteja em um intervalo na casa dos 3,5Hz.

Através das medições realizadas na ponte metálica em questão, em que houve passagem de pedestre, é possível comparar que nos gráficos B e C, de Frequência (Hz) X Amplitude, as frequências dos pedestres encontram-se nesse intervalo de 2Hz conforme os estudos demonstrados no trabalho de Carlos Moutinho [25].

No trabalho de Liana Ostetto [13], foi realizado ensaio com um acelerômetro unidirecional piezoelétrico da marca PCB Piezotronics e encontrou-se os resultados representados da Tabela 5. Nessa tabela, tem-se que o ensaio 1 se deu apenas com a excitação ambiental e o

equipamento foi posicionado no meio da ponte e o ensaio 2, além da excitação ambiental teve também a vibração forçada através da passagem de pedestre e o equipamento foi posicionado na extremidade da ponte.

| <i>VIBRAÇÃO AMBIENTAL</i> | | | |
|---------------------------|-------------|--|--|
| <i>Modos</i> | <i>Tipo</i> | <i>ENSAIO 1</i> | <i>ENSAIO 2</i> |
| | | <i>Valores experimentais f(Hz)</i> | <i>Valores experimentais f(Hz)</i> |
| 1 | Vertical | 2,56 | 2,96 |
| 2 | Torção | | 3,99 |
| 3 | Vertical 2ª | 5,86 | 5,08 |
| 4 | Torção 2ª | | 6,32 |
| 5 | Vertical 3ª | 7,44 | |
| 6 | Vertical 4ª | 9,11 | |

Tabela 5 - Resultados das medições do trabalho de Liana Ostetto [13]

Para uma melhor visualização dos resultados do sensor de baixo custo a fim de se comparar com os resultados do acelerômetro profissional, realizou a Tabela 6 a seguir. Nessa tabela, inseriu-se apenas os resultados medidos no meio da ponte, na qual foram a 2ª, 3ª, 4ª e 5ª medição e dos resultados que houve a redução de ruído com medição de 1 minuto. Comparando os resultados, do sensor de baixo custo e do acelerômetro profissional utilizado por Liana Ostetto [13], tem-se que as frequências encontradas em ambas medições foram parecidas, principalmente as frequências por volta de 2,77 Hz; 5,57 Hz; 7,48 Hz e 8,88 Hz.

| | Posição do sensor na ponte | Frequências (Hz) |
|------------|----------------------------|-----------------------------------|
| 2ª medição | Meio | 3,1 / 5,0 / 6,8 / 7,5 / 8,8 |
| 3ª medição | Meio | 2,6 / 3,1 / 5,2 / 7,5 / 8,8 / 9,1 |
| 4ª medição | Meio | 5,9 / 8,8 |
| 5ª medição | Meio | 2,2 / 3,1 / 5,9 / 6,5 / 7,5 / 8,7 |

Tabela 6 - Resumo dos resultados da medição do sensor de baixo custo

Essa ponte, desde a época do trabalho realizado por Liana Ostetto [13], possui um desconforto ao andar devido a vibração ocasionada ao ser utilizada. A extremidade mais próxima do Parque da Almuinha tem menos rigidez comparado ao lado do estádio, na qual possui os pilares atirantados. Na Figura 41 é possível observar, principalmente pelas medições no meio da ponte, que quanto mais flexível a estrutura, maior a capacidade de percepção do sensor.

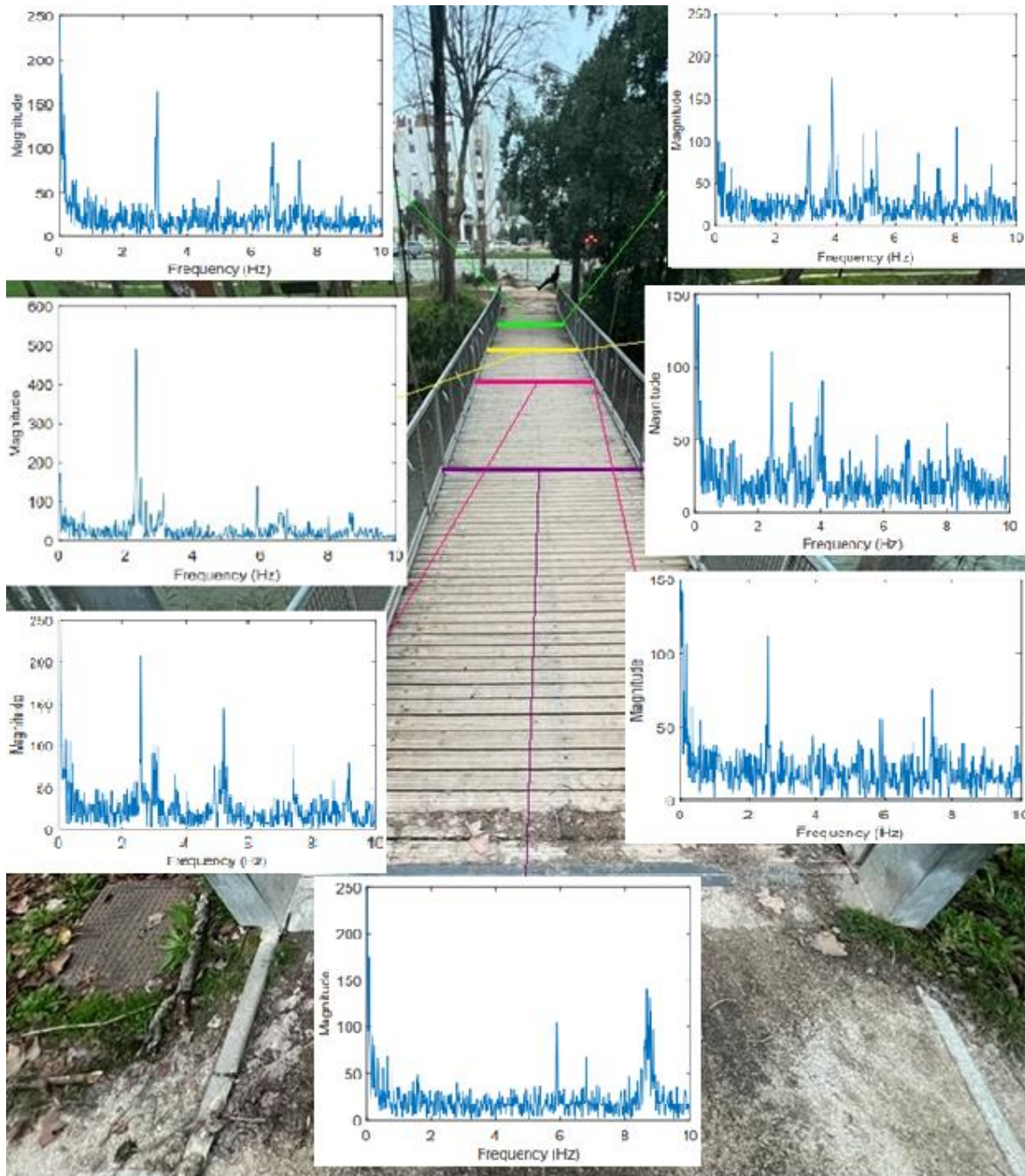


Figura 41 - Resultados da medição da ponte metálica

4.2.3. Departamento de Engenharia Civil UA

4.2.3.1. Descrição do ensaio

O último estudo de sensibilidade foi realizado em Aveiro no dia 14 de dezembro de 2022, com a mesma programação utilizada na ponte metálica demonstrada na Figura 33, em uma estrutura de concreto armado no Departamento de Engenharia Civil na Universidade de Aveiro, demonstrado na Figura 42, em que se instalou o sensor STWINKT1B juntamente

com três acelerômetros de elevada precisão conforme pode-se observar na Figura 43 a seguir.

O equipamento utilizado para se comparar com os resultados do sensor de baixo custo foram três acelerômetros unidirecionais piezoelétricos da marca PCB Piezotronics, do modelo 393B31, com a sensibilidade de 10V/g, intervalo de leitura de frequências de 0,100Hz a 200.000Hz e gama de acelerações de 0,5g. Estes foram ligados a uma placa de aquisição de dados com 8 canais, com uma resolução de 24 bits, incluindo filtros anti-aliasing.

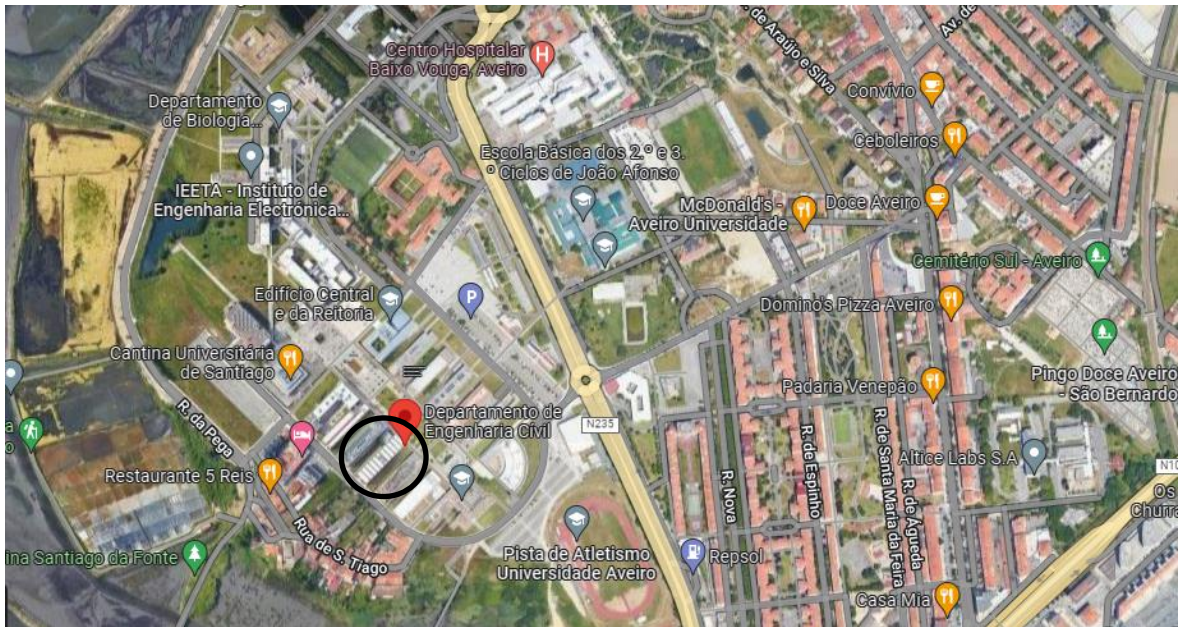


Figura 42 - Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro [Google Maps]



Figura 43 - Estudo na Universidade de Aveiro

4.2.3.2. Análise dos resultados

Para esse ensaio de sensibilidade foi programado o sensor para medir durante 5 minutos pelo mesmo motivo da medição na ponte, na qual em 5 minutos o sensor possui uma maior capacidade de sensibilidade de medição. Foi instalado o STWINKT1B no acelerômetro unidirecional piezoelétrico da PCB Piezotronics a fim de se obter as mesmas condições de medição. As medições na direção vertical obtidas pelo sensor de baixo custo estão demonstradas nos Figura 44 à Figura 46, enquanto as realizações com o equipamento mais sensível, estão representados nos Figura 47 e Figura 48.

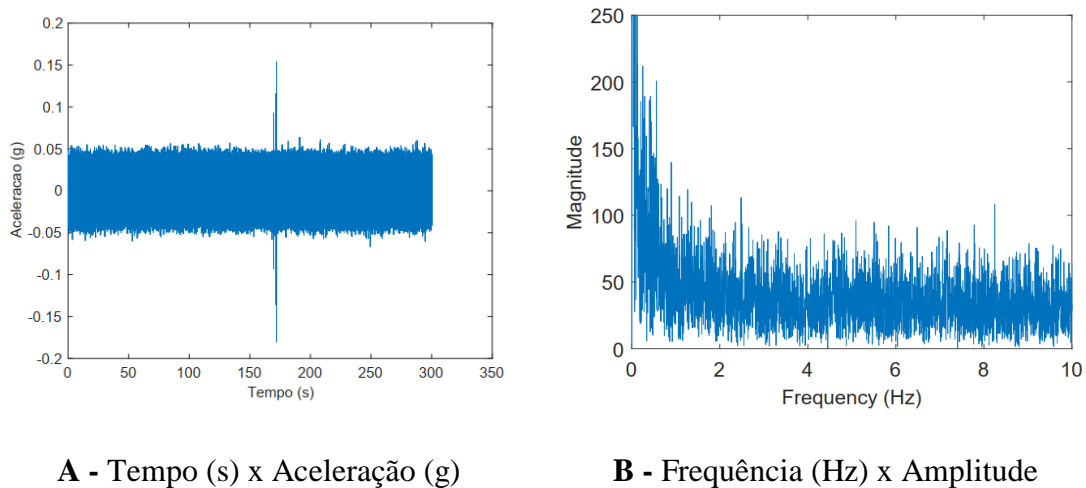


Figura 44 - Espectro de potência da primeira medição da Universidade de Aveiro

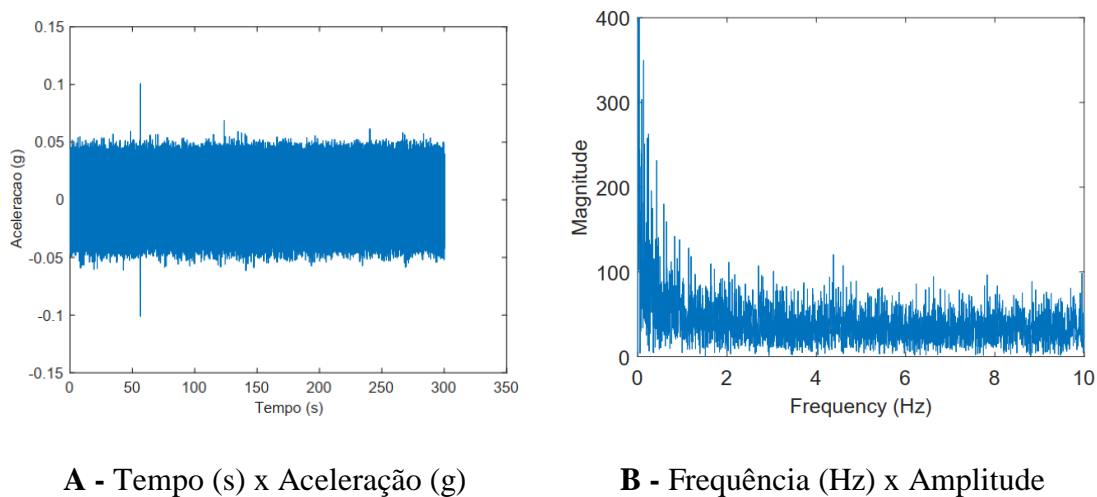
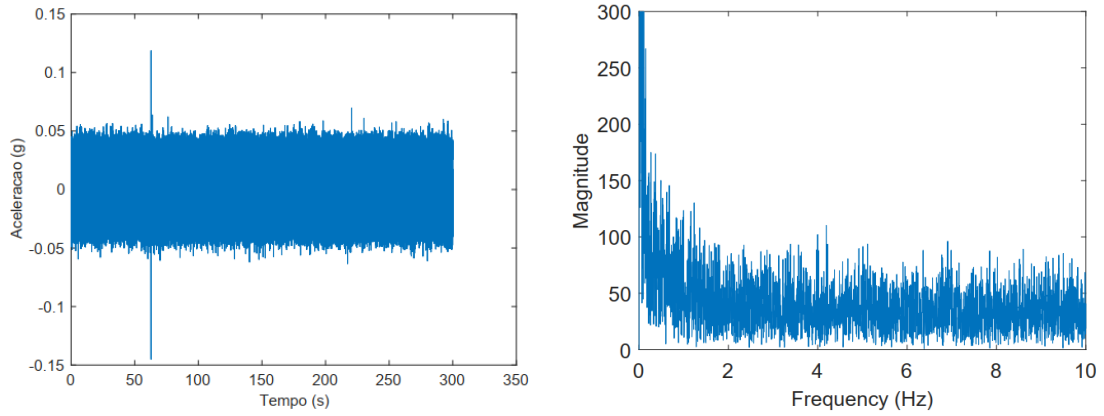


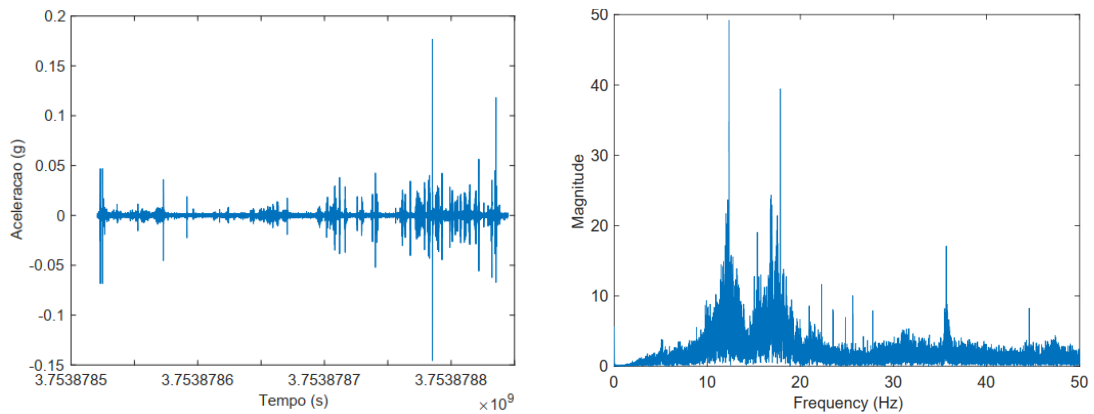
Figura 45 - Espectro de potência da segunda medição da Universidade de Aveiro



A - Tempo (s) x Aceleração (g)

B - Frequência (Hz) x Amplitude

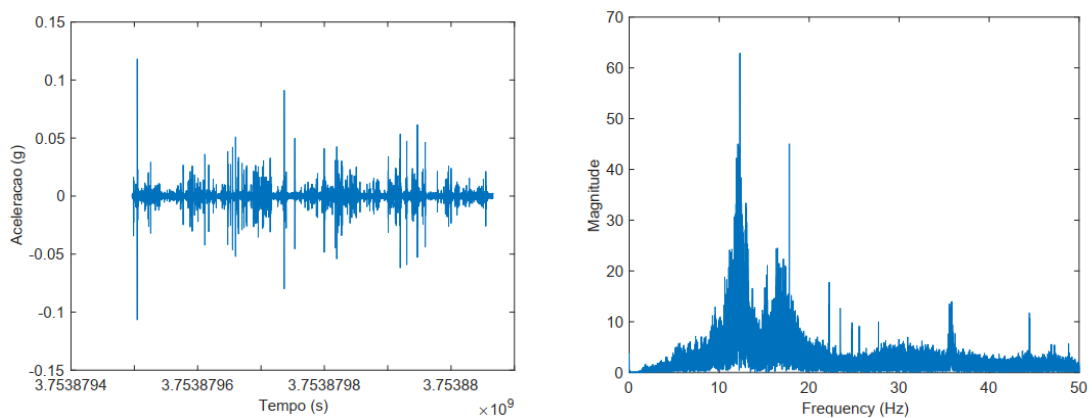
Figura 46 - Espectro de potência da terceira medição da Universidade de Aveiro



A - Tempo (s) x Aceleração (g)

B - Frequência (Hz) x Amplitude

Figura 47 - Espectro de potência primeira medição na Universidade de Aveiro - acelerômetro piezoelétrico



A - Tempo (s) x Aceleração (g)

B - Frequência (Hz) x Amplitude

Figura 48 - Espectro de potência segunda medição na Universidade de Aveiro - acelerômetro piezoelétrico

Dos resultados apresentados é possível observar que no acelerômetro piezoelétrico houve a medição exata do andar das pessoas na estrutura ao contrário do sensor de baixo custo que não se mediu essa aceleração quando era menor que 0,05g. Por esta razão não foram apresentados os resultados nas outras direções, uma vez que a amplitude das vibrações é ainda inferior, e, portanto, indetetáveis pelo sensor de baixo custo.

Levando em consideração a conclusão através do ensaio do Massageador e da Ponte Metálica e agora comparando os resultados entre o sensor de baixo custo com o acelerômetro profissional no ensaio da estrutura de concreto armado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, tem-se claramente que esse sensor de baixo custo não possui capacidade suficiente para medir estruturas rígidas com baixa aceleração ambiente (aceleração menor que 0,05g).

5. Ensaio na Cobertura do Estádio Municipal Dr. Magalhães Pessoa

5.1. Descrição e caracterização estrutural

Uma vez avaliada a precisão do sensor face a diferentes vibrações testou-se a sua aplicação a uma estrutura que apresenta alguma flexibilidade (e, portanto, com amplitudes potencialmente elevadas de serem medidas com o sensor de baixo custo) e que apresenta características para beneficiar de um sistema de monitorização permanente. A estrutura escolhida é o Estádio Municipal Dr. Magalhães Pessoa, localizado do Concelho de Leiria, Portugal.

Esse estádio foi inaugurado em 19 de novembro de 2003 através de uma remodelação, na qual acabou representando a construção de um novo estádio, feita para a realização do Euro 2004. Ele possui um gramado de 105m por 68m e tem a capacidade para 23.888 pessoas [7]. O Estádio Municipal Dr. Magalhães Pessoa possui esse nome em homenagem ao Presidente da Câmara Municipal de Leiria, da década de 60, que tomou iniciativa para a sua construção. Na época, essa decisão da sua edificação foi o primeiro de um parque desportivo na cidade.

O estádio de Leiria possui uma cobertura metálica composta por 57 vigas principais interligadas por vigas de perfil I e com painel em chapas metálicas. Na Figura 49 podemos observar essas vigas principais de cor alaranjadas e as secundárias, as amareladas.

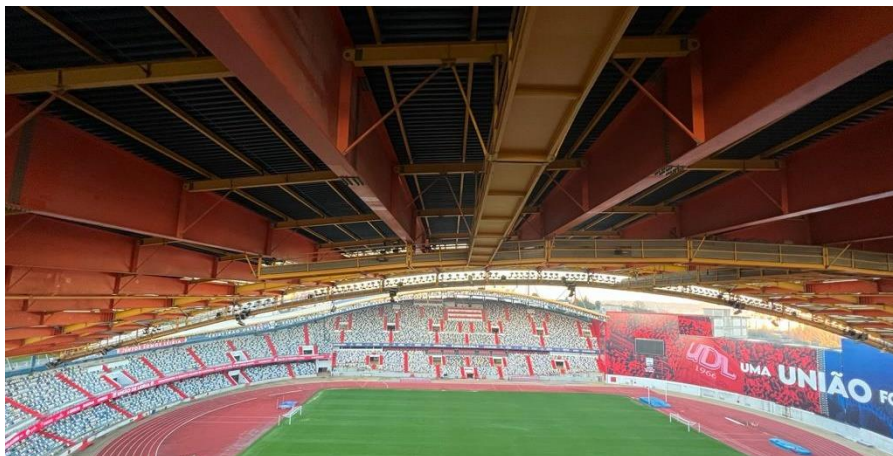


Figura 49 - Vigas da cobertura do estádio

A estrutura da cobertura encontra-se contraventada na extremidade da cobertura, como podemos constatar na Figura 50. As vigas de maior comprimento são suportadas por cabos atirantados aos fustes (Figura 50).

É importante atentar que o estádio possui dois tipos de cobertura. Na sua grande maioria a cobertura é composta por placas de policarbonato alveolar, como se pode observar na Figura 50, e na região do fuste, a cobertura é por painel sandwich (Figura 49). A Figura 51 a seguir representa a planta da cobertura.

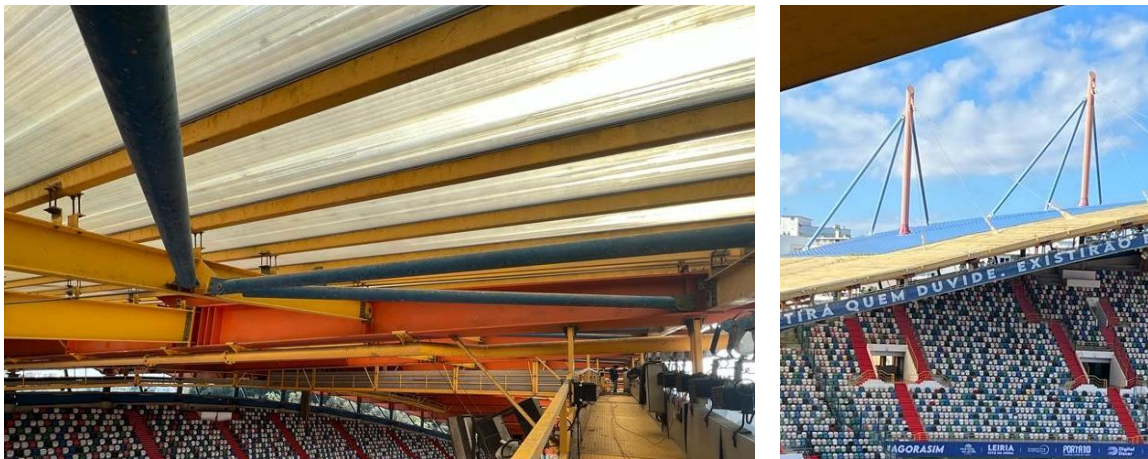


Figura 50 - Contraventamentos e fuste na cobertura do estádio

As vigas principais possuem medidas diferentes, variando de 18,65m à 63m de comprimento e altura máxima de 3m no centro e 0,50m de altura na extremidade. Já as vigas transversais secundárias possuem duas dimensões. Uma, em maior quantidade, localizada mais internamente no estádio, possui a alma de 0,36m e mesa de 0,17m, e o perfil mais externo possui alma de 0,40m e mesa de 0,18m. Entretanto, para as vigas principais de maior comprimento, há uma outra viga secundária com 0,75m de alma e 0,30m de mesa. O perfil das vigas principais está representado na Figura 52 a seguir. Os contraventamentos demonstrados na Figura 50 são cilindros de diâmetro de 0,12m.

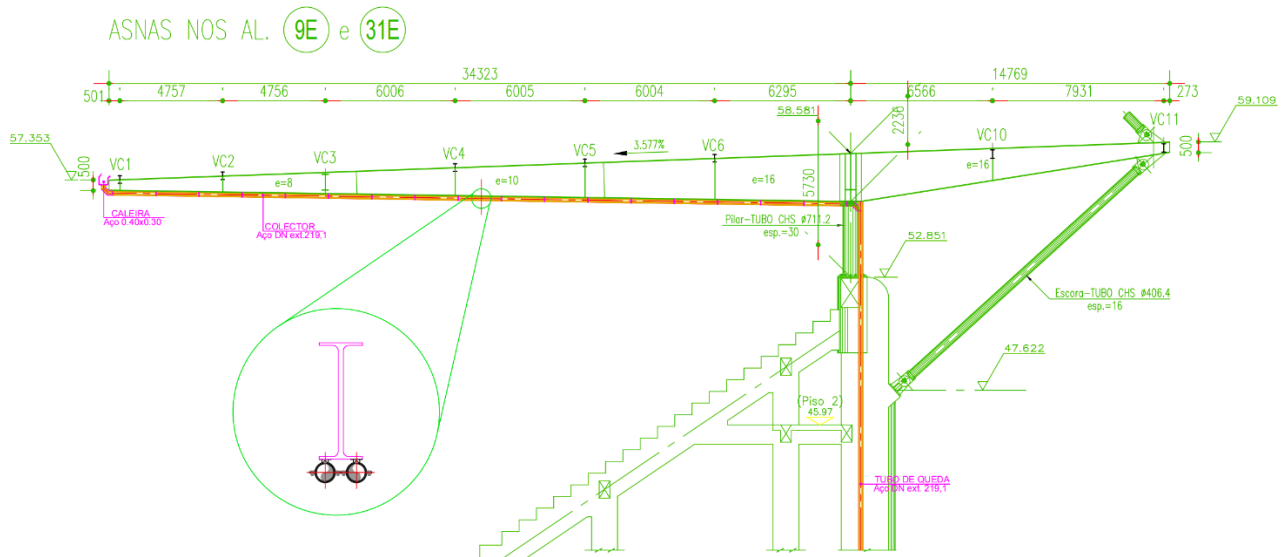


Figura 52 - Alçado de viga da cobertura do estádio [Câmara Municipal de Leiria]

Na Figura 53 podemos ver que as chapas metálicas tanto do lado interno do estádio quanto do lado externo (em algumas chapas) possuem uma caldeira em aço - representada em cor laranja - de secção transversal de 0,40 x 0,30m totalizando 664,14m de comprimento. E em algumas vigas há coletares em tubo de aço - cor azul - de diâmetro externo de 219,1 mm - 12 tubos totalizando 390,70m - ou 267 mm - 6 tubos totalizando 20,22m. Há também na cobertura os tubos de queda pluvial em aço, na qual totaliza 12 tubos de diâmetro externo de 219,1mm e 6 tubos de diâmetro externo de 267mm.

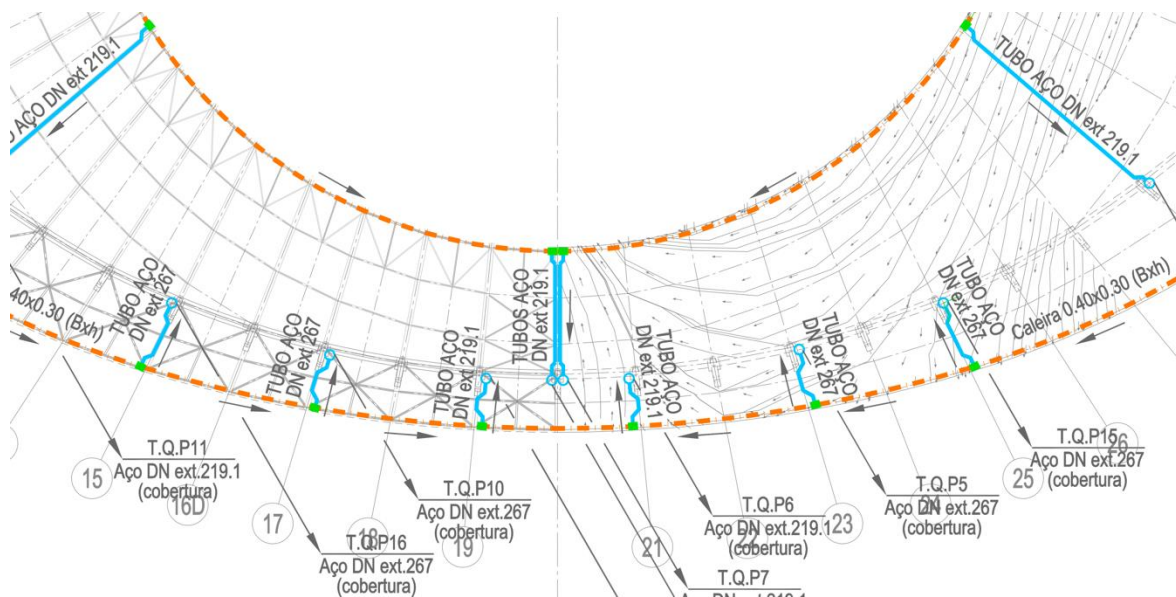


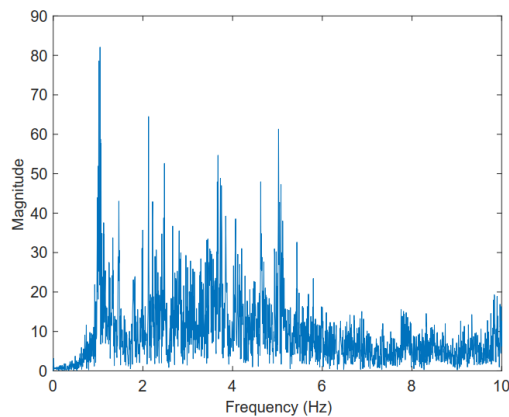
Figura 53 - Representação das caldeiras, coletores e tubos de queda [Câmara Municipal de Leiria]

5.2. Ensaio de identificação dinâmica

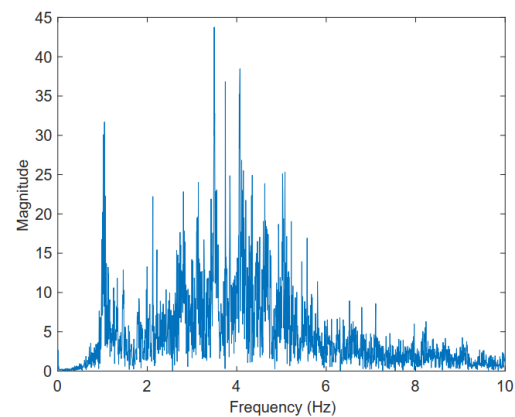
A realização do ensaio na cobertura do Estádio Municipal Dr. Magalhães Pessoa se deu em duas etapas. Para a primeira etapa, foi inserido tanto o sensor de baixo custo STWINKT1B quanto o acelerômetro unidirecional piezoelétrico da PCB Piezotronics, o mesmo utilizado no ensaio de sensibilidade no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. Essa etapa se deu a fim de verificar se realmente o sensor de baixo custo tinha capacidade de medir as propriedades dinâmicas da cobertura. Já na segunda etapa, foram realizadas várias medições a fim de caracterizar melhor a estrutura e avaliar as potencialidades do sensor.

5.2.1. Primeira etapa

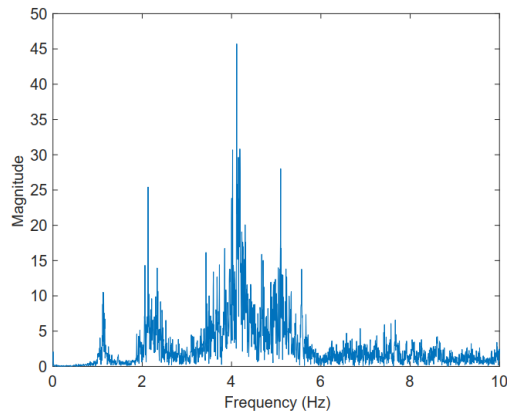
A primeira etapa foi realizada no dia 31 de maio de 2022. Foi realizado uma medição com o acelerômetro unidirecional piezoelétrico, cujos espectros de potência são apresentados na Figura 54 a seguir.



A - Frequência (Hz) x Amplitude
- Direção paralela ao eixo das vigas principais



B - Frequência (Hz) x Amplitude
- Direção perpendicular ao eixo das vigas principais

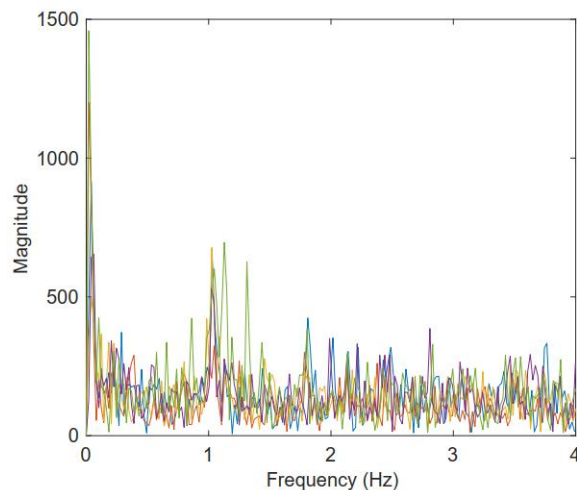


C - Frequência (Hz) x Amplitude
- Vertical

Figura 54 - Espectro de potência acelerômetro piezoelétrico na Cobertura do Estádio

No gráfico C podemos observar que a frequência natural detectada da viga é de aproximadamente 1 Hz. E é possível observar também que há uma tendência bastante parecida das frequências encontradas na direção vertical e na direção horizontal sentido da largura da viga.

Juntamente com acelerômetro unidirecional piezoelétrico, foi instalado também o sensor de baixo custo, em que se realizou medição de duração de 10 minutos e obteve o espectro de potência representado na Figura 55. Nele podemos observar que a frequência natural detectada da viga fica entorno de 1 Hz. E isso condiz com o acelerômetro piezoelétrico, o que comprova então a eficiência do sensor de baixo custo para medição de frequência em estrutura de engenharia.



Frequência (Hz) x Amplitude

Figura 55 - Espectro de potência sensor de baixo custo na cobertura do estádio

5.2.2. Segunda etapa

No dia 05 de janeiro de 2023 foi realizado as medições no Estádio com o sensor de baixo custo. Estes ensaios foram realizados em diferentes vigas da cobertura e a diferentes horas com vista a avaliar a variação de frequências próprias em função da localização e do elemento de suporte bem como em função da temperatura ambiente. Para essa medição, utilizou três sensores iguais com a mesma programação (Figura 33) na qual foram instalados em três vigas diferentes conforme a Figura 56 e Figura 59. As vigas medidas foram a 35E, 39E e 32D de hora em hora. As medições deram início às 8h40 e encerrou-se às 12h45.

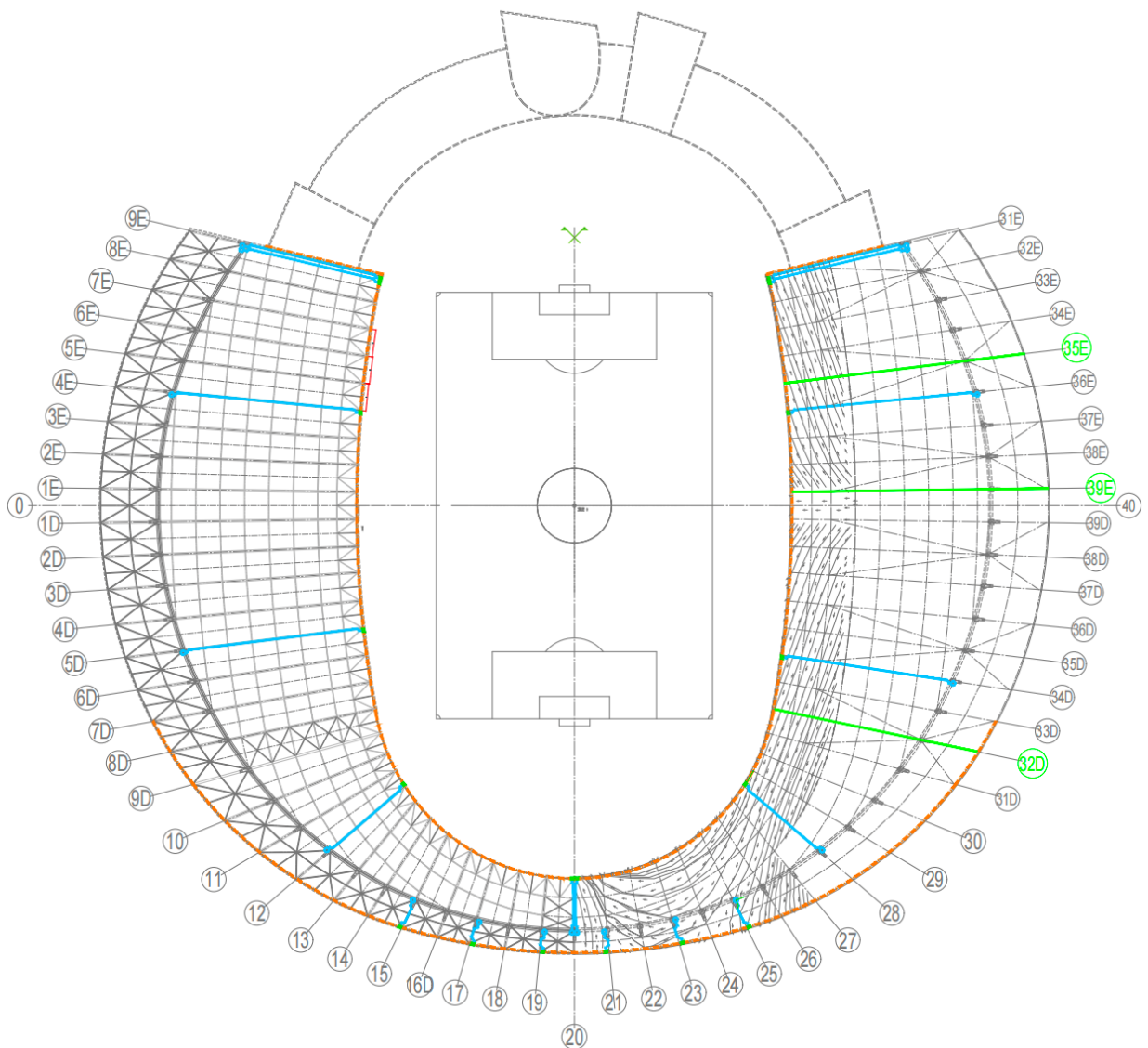


Figura 56 - Vigas medidas – lateral da cobertura

Os resultados gerados de todas as medições do sensor na direção vertical e na direção horizontal perpendicular a viga, assim como outros espectros de potência e acelerograma,

estão no Anexo B. A Figura 57 tem uma representação sucinta de alguns espectros de potência na direção vertical, das primeiras e das penúltimas medições de cada viga, sendo que os gráficos A e B é em relação a viga 35E; os gráficos C e D em relação a viga 39E e por último os gráficos E e F em relação a viga 32D.

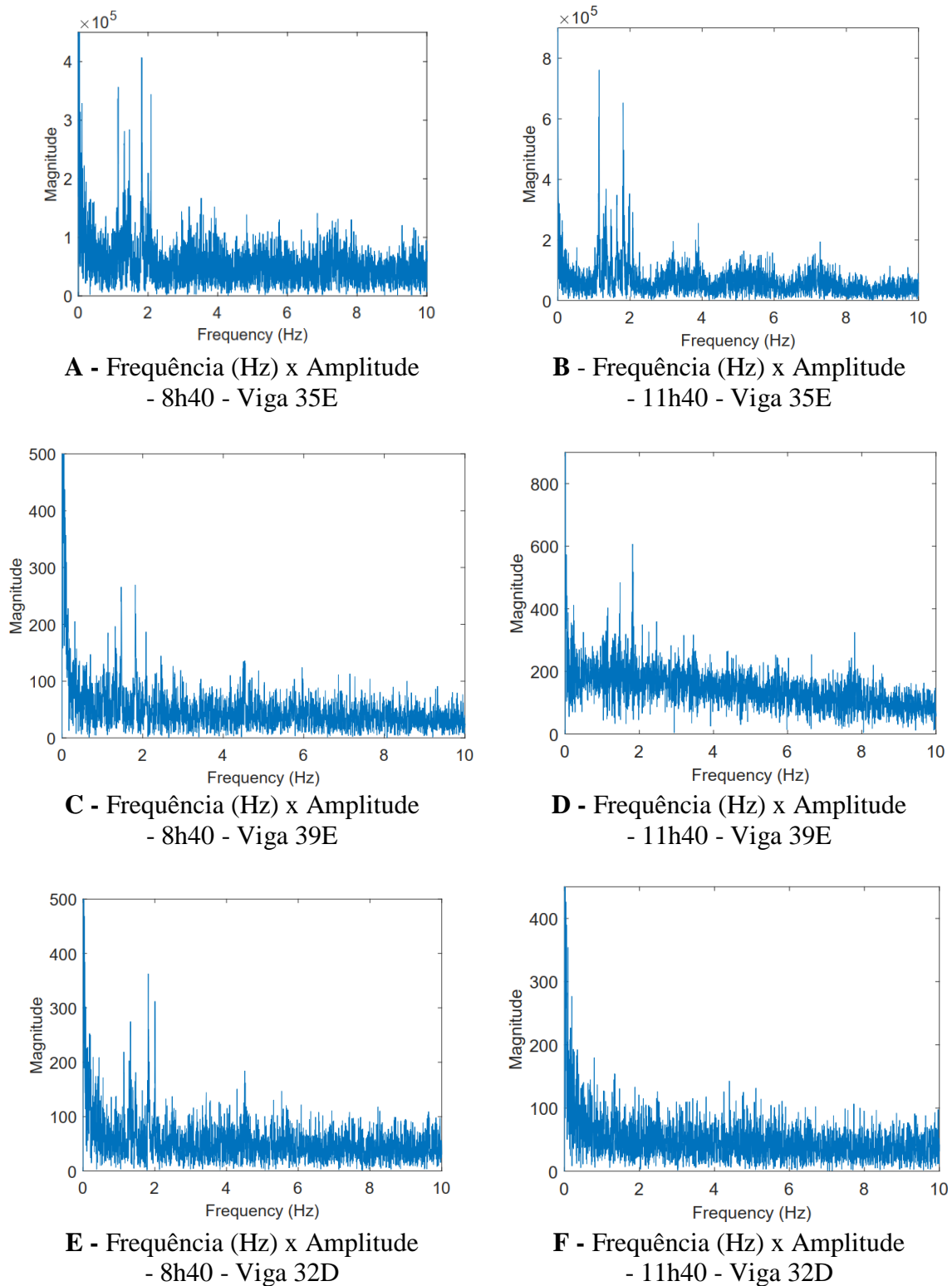


Figura 57 - Espectro de potência das medições na cobertura do estádio

Analisando todos os gráficos gerados pelo sensor de baixo custo na vertical, observa-se que os primeiros picos que se destacam ficam por volta de 1,1Hz em 86,67% dos gráficos. Em 20% deles, esses picos de 1,1Hz são os maiores e em 53,33% o pico maior é de 1,8Hz. Com isso, nota-se que a frequência natural das vigas da cobertura do Estádio de Leiria tem uma média de 1,3Hz é possível observar também, por meio da Figura 58, que a direção horizontal perpendicular a viga possui uma semelhança na configuração dos resultados da vertical.

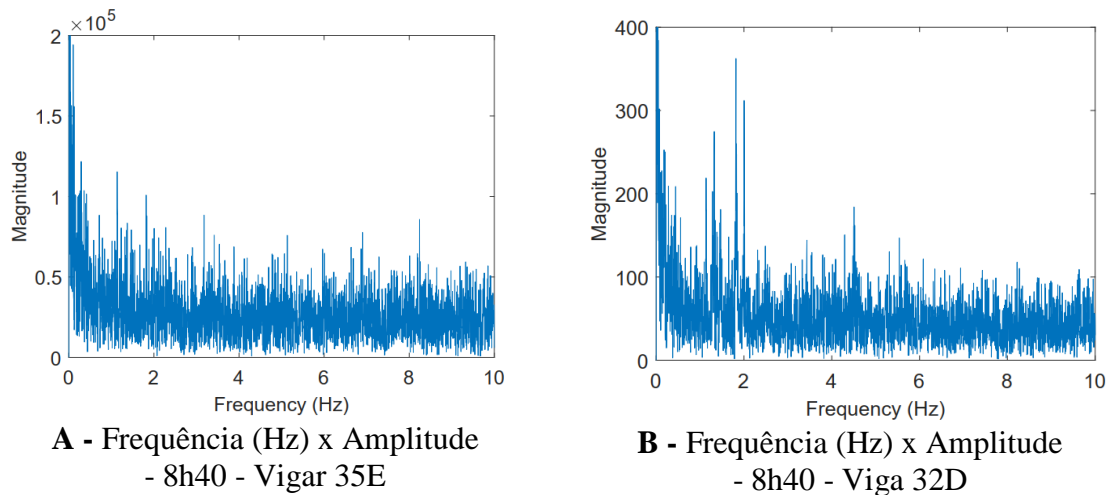


Figura 58 - Espectro de potência da direção horizontal da viga 35E e 32D

Também foi instalado no mesmo dia, com a mesma programação, os sensores em três vigas no meio da cobertura conforme a Figura 59 a seguir. As vigas escolhidas foram a de número 17, 20 e 23. E para essas vigas, foi medido somente uma vez às 12h10. Os espectros de potência na direção vertical encontram-se no Figura 60.

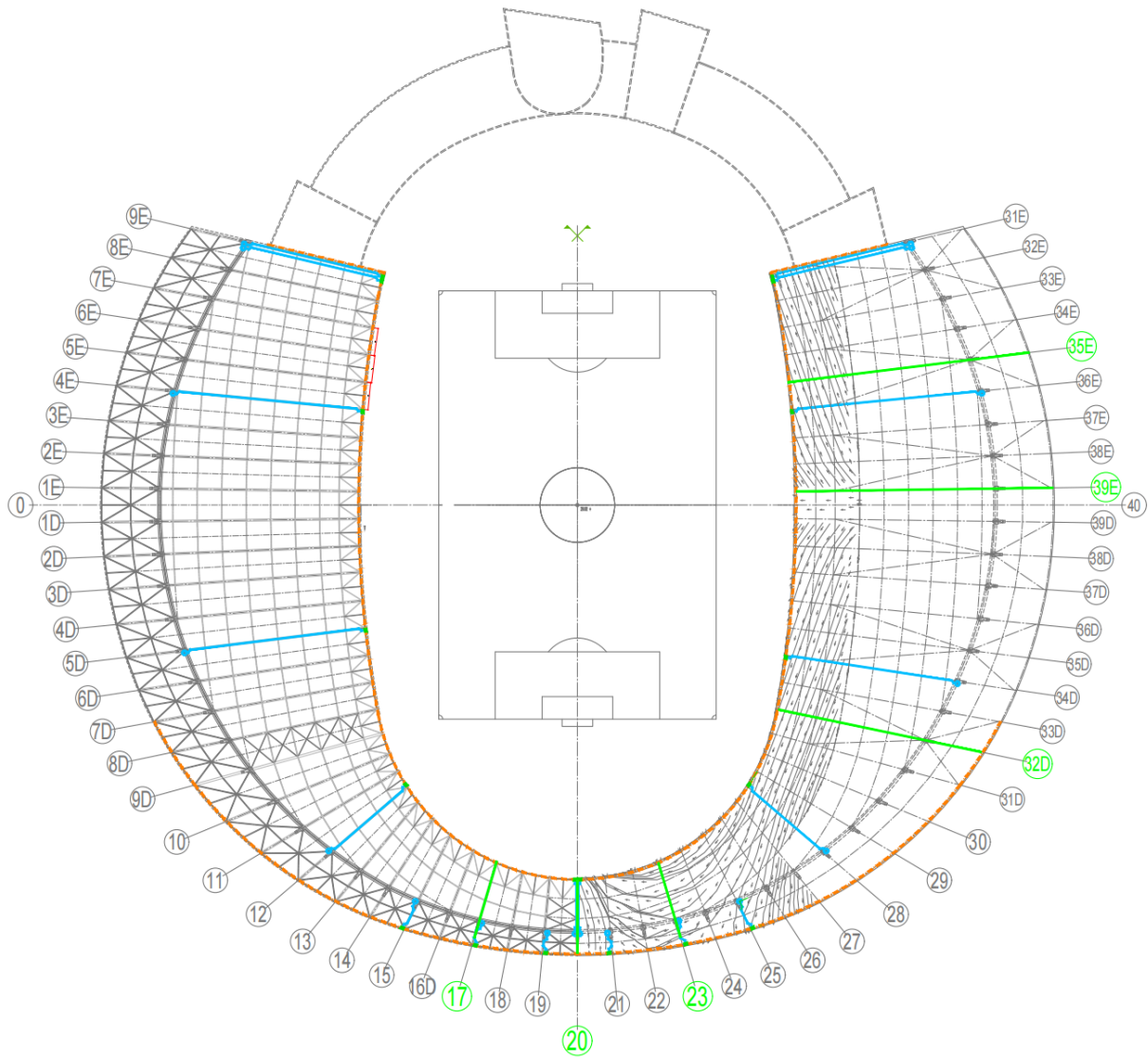
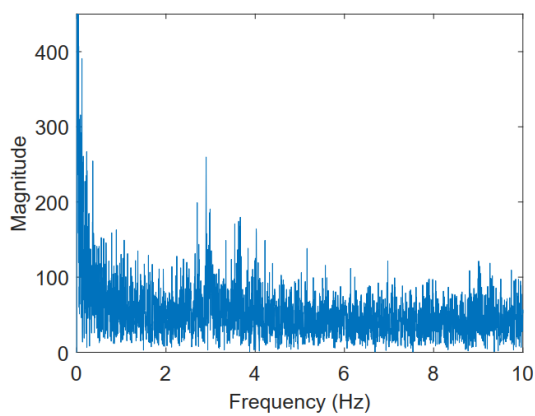
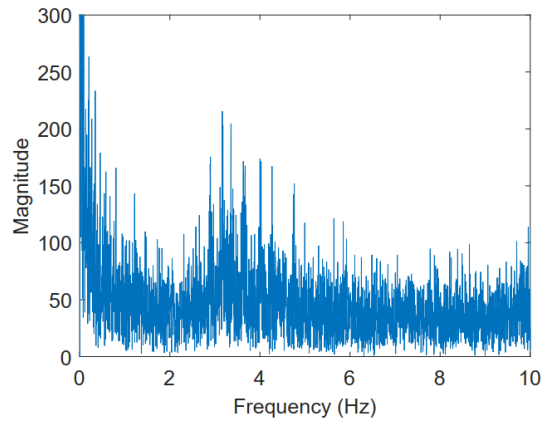


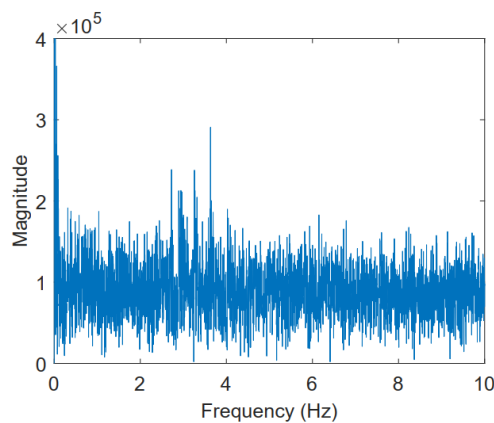
Figura 59 - Vigas medidas - meio da cobertura



A - Frequência (Hz) x Magnitude
– Viga 17



B - Frequência (Hz) x Magnitude
– Viga 20



C - Frequência (Hz) x Magnitude – Viga 23

Figura 60 - Espectro de potência da medição das vigas centrais

Observando os resultados das medições das vigas centrais da cobertura do estádio, tem-se que o primeiro pico que se destaca tem uma frequência maior em relação as outras vigas devidas o tamanho do comprimento do vão livre. A viga 17 e 23 tem um comprimento de 15,05m e a viga 20, um comprimento de 13,00m. A frequência, dessas três vigas, fica por volta de 3Hz.

Foi medida também a temperatura através do sensor HTS221 na qual a Tabela 7 representa a menor e a maior temperatura medida, assim como a variação térmica entre essas medições, Pode-se observar que as vigas no início da medição, às 8h40 possuíam praticamente a mesma temperatura, uma média de 7,53°C e se distinguiram na maior temperatura medida, a qual ocorreu na última medição da 12h40. É importante destacar que devido a posição do estádio, a viga, dentre essas três medidas, que recebe primeiramente os raios solares é a viga 32D, o que justifica obter a maior temperatura e a viga 35E obter a menor temperatura no mesmo instante.

| Viga | Menor Leitura (°C) | Maior Leitura (°C) | Variação Térmica (°C) |
|-------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| 35E | 7,30 | 18,72 | 11,42 |
| 39E | 7,39 | 19,24 | 11,85 |
| 32D | 7,91 | 21,55 | 13,64 |

Tabela 7 - Resumo das temperaturas registadas na Cobertura do Estádio

Na Tabela 8 apresentam-se os registos da temperatura e frequências ao longo das 5 medições de cada viga com o primeiro pico da frequência em destaque dos respectivos espectros de potência. Observando os resultados da medição da temperatura – sensor HTS221 – com os resultados do acelerômetro – sensor IIS3DWB – não foi possível identificar se a temperatura

influenciou na frequência natural das vigas medidas, pois as frequências não se modificaram significativamente ao longo das horas medidas.

| Viga | Intervalo Medido | Média da Temperatura (°C) | Frequência (Hz) |
|------|------------------|---------------------------|-----------------|
| 35E | 8h40 - 8h45 | 10,76 | 1,14 |
| | 9h40 - 9h45 | 8,73 | 1,15 |
| | 10h40 - 10h45 | 11,96 | 1,12 |
| | 11h40 - 11h45 | 14,78 | 1,14 |
| | 12h40 - 12h45 | 17,66 | 1,14 |
| 39E | 8h40 - 8h45 | 8,35 | 1,14 |
| | 9h40 - 9h45 | 11,25 | 1,14 |
| | 10h40 - 10h45 | 11,85 | 1,12 |
| | 11h40 - 11h45 | 14,74 | 1,15 |
| | 12h40 - 12h45 | 17,99 | Erro na medição |
| 32D | 8h40 - 8h45 | 10,85 | 1,13 |
| | 9h40 - 9h45 | 9,37 | 1,12 |
| | 10h40 - 10h45 | 16,13 | 1,14 |
| | 11h40 - 11h45 | 19,21 | 0,79 |
| | 12h40 - 12h45 | 19,80 | 1,13 |

Tabela 8 - Registos de temperatura e frequência

5.3. Modelação da viga 39E

Para a viga 39E, foi modelada por elemento de casca, no Software Projeto Galileu, a fim de se obter a frequência do primeiro modo de vibração e compará-la com as frequências encontradas pelo sensor de baixo custo. Para isso, inseriram-se as dimensões da estrutura metálica e adicionaram-se as cargas que ela suporta. As cargas, referentes as vigas secundárias e dos contraventamento, foram calculadas conforme o projeto de AutoCad da Câmara Municipal e alguma dessas medidas foram conferidas *in situ* no dia 05 de janeiro no dia da realização do ensaio.

Não tendo sido possível consultar o projeto da cobertura, foi considerado que a cobertura de policarbonato alveolar pesa aproximadamente 3 Kg/m² e ele está instalado em perfil metálico RHS de 0,12m de altura por 0,08m de largura. Consideramos também que o painel sandwich pesa 12 Kg/m² e está instalado em perfil metálico IPE.

A viga modelada é bastante rígida na área do fuste e na extremidade externa do estádio por serem encastrada. Já a zona mais interna é mais flexível e na terceira viga perpendicular a

viga principal, foi inserido no modelo, o apoio referente ao cabo do fuste por meio de um apoio flexível. Segue a seguir, na Figura 61, o modelo da viga 39E.

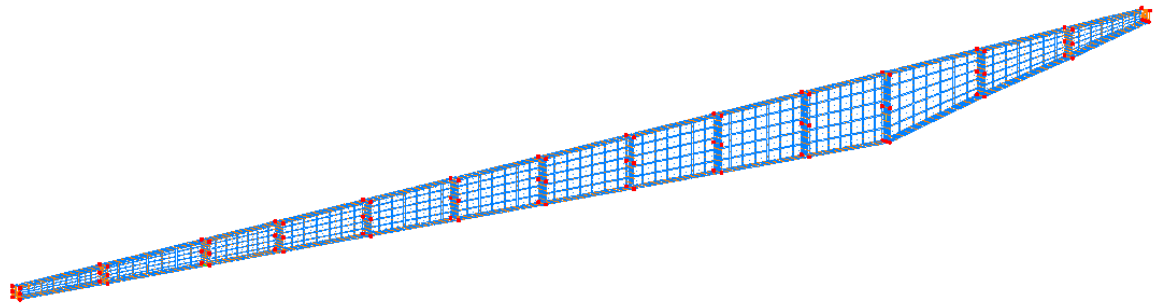


Figura 61 - Modelação da viga 39E no Galileu

Após a realização dos cálculos, temos que a frequência natural da viga é de 1,17Hz para o primeiro modo de vibração (Figura 62). Devido a sua rigidez, os outros modos de vibrações são locais, sendo somente essa, portanto, um modo global. Levando em consideração que não obtivemos com precisão as informações e características exatas dos materiais que compõe a cobertura do estádio e estamos num domínio de incerteza sobre os valores utilizados na modelação, o modelo foi calibrado com os resultados do acelerômetro piezoelétrico. Os resultados numéricos também se aproximaram dos resultados obtidos com o equipamento de baixo custo, mostrando que este equipamento tem capacidade de medir a vibração de estruturas mais flexíveis.

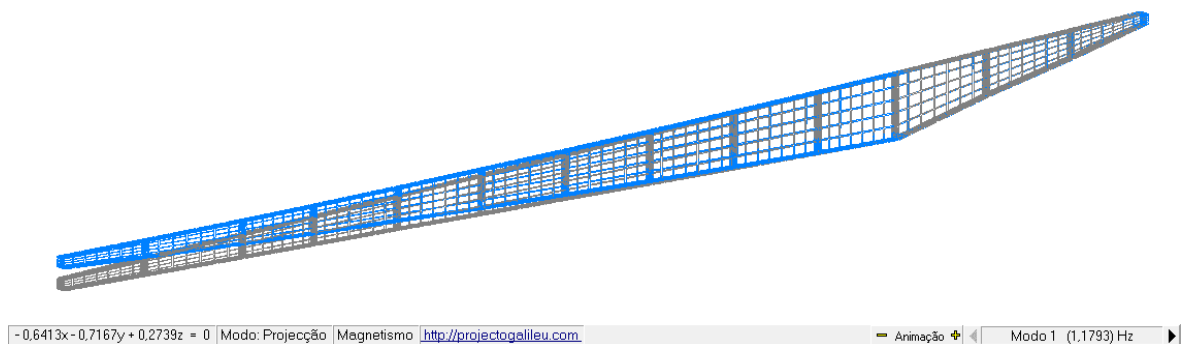


Figura 62 – Frequência da viga 39E no Galileu

6. Conclusão

6.1. Considerações finais

Levando em consideração que as estruturas de engenharia sofrem com a degradação ao longo do tempo, em que podem comprometer com a funcionalidade e até com a estabilidade do edifício, é necessário que as estruturas tenham uma manutenção periódica. Essa manutenção é importante principalmente para que o seu desempenho projetado seja alcançado à função pretendida.

No seguimento dessa dissertação, observamos que a monitorização da integridade estrutural vem surgindo a fim de verificar o desempenho dos mesmos através de medições de várias grandezas. O sistema de monitorização abordado nesse trabalho foi a medição das frequências próprias de vibração através do sensor de baixo custo a fim de avaliar se o equipamento tem potencial adequado para aferir uma eventual alteração do comportamento dinâmico de uma estrutura de engenharia.

Através de todos os ensaios realizados para essa dissertação, tanto o ensaio de estudo de sensibilidade do sensor nas três situações distintas, quanto do ensaio da cobertura do Estádio Municipal de Leiria, é possível concluir que o sensor de baixo custo STWINKT1B não possui capacidade suficiente para medir vibração em estruturas rígidas e de baixa aceleração ambiental (aceleração inferior a 0,05g). Observou-se isso, através dos acelerogramas e espectros de potência gerados pelas medições do sensor de baixo custo, do estudo de sensibilidade do massageador e da ponte metálica, em que o sensor obteve uma capacidade melhor para medir a vibração comparada com o ensaio realizado no DEC da Universidade de Aveiro. E isso foi concluído também pelo acelerograma e espectro de potência do acelerômetro piezoelétrico.

Através do estudo de sensibilidade, concluiu-se também que, há interferência nas frequências encontradas nos espectros de potência ocasionados por ruídos, como por exemplo, no caso da ponte metálica, houve interferência nas frequências do andar do pedestre, como se observou-se nos espectros de potência em que houve a retirada de ruído. E, para esses estudos realizados, não foi possível quantificar a influência da temperatura medida na frequência, pois não houve variação nas frequências medidas pelo sensor de baixo custo ao longo das horas em que ocorreram os ensaios.

Por fim, conclui-se que sensor de baixo custo tem capacidade de realizar medições das frequências próprias de vibração em estruturas mais flexíveis. Isso se deve principalmente pela comprovação dos valores encontrados pelo sensor que vai em conforme a modelação realizada no Software Projeto Galileu e os valores encontrados pelo Acelerômetro Piezoelétrico. Essa capacidade do sensor de baixo custo é de grande importância para a monitorização da integridade estrutural, pois, assim, é possível avaliar as alterações do comportamento dinâmico das estruturas de engenharia.

6.2. Desenvolvimentos futuros

No âmbito de realizações de trabalhos futuros, sugere-se:

- Um estudo mais aprofundado em relação a programação do sensor. É importante saber programar o software do sensor para que o mesmo consiga realizar medições de forma automática com um período de intervalo maior entre uma medição e outra.
- Ainda sobre a programação do sensor, é válido programar o equipamento para realizar medição com um tempo de duração maior a fim de se melhorar na leitura da frequência quando se realiza a transformada de Fourier.
- É importante analisar o consumo de bateria do sensor de baixo custo com objetivo de que o equipamento consiga medir a estrutura em estudo por vários dias seguidos. Uma alternativa seria uma bateria nova com alta capacidade de duração ou ligar o equipamento na rede elétrica.
- É importante levar em consideração sensores de baixo custo que possuem acelerômetros com uma maior sensibilidade.
- E levar em consideração a capacidade de sincronismo com outros sensores do mesmo tipo para realizar medições simultaneamente e assim obter uma análise mais detalhada.

Referências Bibliográficas

- [1] Figueiras, J.A.; BE2008 – Encontro Nacional Betão Estrutural 2008 Guimarães: Monitorização da integridade estrutural de obras de arte; Portugal; Guimarães; novembro 2008.
- [2] Albuquerque, N.P.C.; Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas: Desenvolvimento de um Sistema de Monitorização de Vibração de Baixo Custo; Instituto Politécnico de Leiria; Portugal; Leiria; setembro 2019.
- [3] Bisby, L.A.; Briglio, M.B. - ISIS and Samco Educational Module 5: An Introduction to Structural Health Monitoring, Department of Civil Engineering - Queen's University; Agosto 2005.
- [4] Suleyman, N.E.; Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Estruturas: Monitorização Dinâmica da Ponte Ferroviária de São João; Instituto Superior de Engenharia de Lisboa; Portugal; Lisboa; dezembro 2016.
- [5] Taveres, B. et al; Congresso Nacional LNEC Novembro 2021: Conceção de um modelo laboratorial de uma ponte para o desenvolvimento de um sistema SHM; Laboratório Nacional de Engenharia Civil; Portugal; Lisboa; novembro 2021.
- [6] Marques, L.N.M.V.; Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Materiais e Reabilitação da Construção: Monitorização Estática e Dinâmica: Aplicações; Universidade do Minho; Portugal; Braga; dezembro 2017.
- [7] União de Leiria; O Estádio de Leiria: Estádio Municipal de Leiria. Disponível em <<https://www.uniaodeleiria.pt/estadio-municipal-de-leiria/>>. Acesso em junho 2022.
- [8] Monteiro, E.S.; Galileu v2004: Utilização.
- [9] Manual de explicação de configuração e como utilizar o DeviceConfig.json & execution_config.json.
- [10] User Manual - How to use the STEVAL-STWINKT1B SensorTile Wireless Industrial Node for condition monitoring and predictive maintenance applications.
- [11] HTS221 - Capacitive digital sensor for relative humidity and temperature. Disponível em <<https://www.st.com/en/mems-and-sensors/hts221.html?rt=um&id=UM2777>>. Acesso em outubro 2022.
- [12] IIS3DWB - Ultra-wide bandwidth, low-noise, 3-axis digital vibration sensor. Disponível em <<https://www.st.com/en/mems-and-sensors/iis3dwb.html?rt=um&id=UM2777>>. Acesso em outubro de 2022.

- [13] Ostetto, L. S.; Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Guião de caracterização e inspeção de Obras de Arte. Estudo de caso aplicado a Leiria; Instituto Politécnico de Leiria; Portugal; Leiria; setembro; 2019.
- [14] NTi Audio; Transformação rápida de Fourier FFT - Noções básicas; Disponível em <<https://www.nti-audio.com/pt/suporte/saber-como/transformacao-rapida-de-fourier-fft>>. Acesso em outubro de 2022.
- [15] Almeida, G. R.; Sistema de baixo custo para monitoramento de vibração. Centro Universitário de Volta Redonda; Brasil; Rio de Janeiro; Volta Redonda; Disponível em <https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/gustavo_rogel_artigo_0.pdf>. Acesso em 01 de fevereiro de 2023.
- [16] Tresseno. M; Dissertação de Mestrado de Modelagem Matemática – Modelagem matemática não paramétrica de elastomassas MEMS em colapso utilizando assinatura. Universidade Regional do Noreoeste do Estado do Rio Grande do Sul; Brasil; Rio Grande do Sul; Ijuí; agosto; 2014.
- [17] Reimbold, R.M.P.; Tese parcial de Doutorado em Micro eletrônica – Otimização da síntese do projeto de atuadores MEMS baseados em deformação elástica e estrutura comb-drive. Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Brasil; Rio Grande do Sul; Porto Alegre; dezembro; 2008.
- [18] Toledo Júnior, E. G.; Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Acelerômetro sem fio de baixo custo para monitoramento dinâmico estrutural. Universidade Federal de Juiz de Fora; Brasil; Minas Gerais; Juiz de Fora; novembro; 2018.
- [19] Xu, N., Rangwala, S., Chintalapudi, K., Ganesan, D., Broad, A., Govindan, R., Estrin, D.; A wireless sensor network for structural monitoring. Estados Unidos da América; Maryland; Batimore; novembro; 2004.
- [20] Feldbusch A., Sadegh-Azar H., Agne P. Vibration analysis using mobile devices (smartphones or tablets)”. X International Conference on Structural Dynamics, EURODDYN 2017, Procedia Engineering, 2017.
- [21] Feng, M., Fukuda, Y., Mizuta, M., Ozer, E. Citizen Sensors for SHM: Use of Accelerometer Data from Smartphones, Departamento de Engenharia Civil e Engenharia Mecânica, Universidade de Columbia, Estados Unidos da América, New York, 2015.
- [22] Martinelli L., Racic V., Dal Lago A. and Foti, F. Testing Walking-Induced Vibration of Floors Using Smartphones Recordings. Robotics 2020, 9, 37.
- [23] Zabielski J. and Srokosz, P. Monitoring of Structural Safety of Buildings Using Wireless Network of MEMS Sensors. Buildings 2020, 10.

- [24] Liao W, Chen X, Lu X, Huang Y and Tian Y Deep Transfer Learning and Time-Frequency Characteristics- Based Identification Method for Structural Seismic Response. *Frontiers in Built Environment*, 2021.
- [25] Moutinho, C. M. R.; Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Estruturas – Controlo passivo e activo de vibrações em pontes de peões. Universidade do Porto; Portugal; Porto; novembro; 1998.
- [26] Silva, R. N. F.; Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica – Monitoramento de Integridade Estrutural Utilizando a Técnica da Impedância Eletromecânica Aplicada em Estruturas de Concreto. Universidade Federal de Uberlândia; Brasil; Uberlândia; 2017.
- [27] Cavalini Junior, A. A.; Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Monitoramento da Integridade Estrutural de Sistemas Mecânicos via Observador de Estado Modal. Unesp; Brasil; Ilha Solteira; setembro; 2009.

Anexos

Anexo A - Resultados das medições do massagedor

A.1) Medições de duração de 5 minutos nas três direções

A.1.1) 1ª Medição

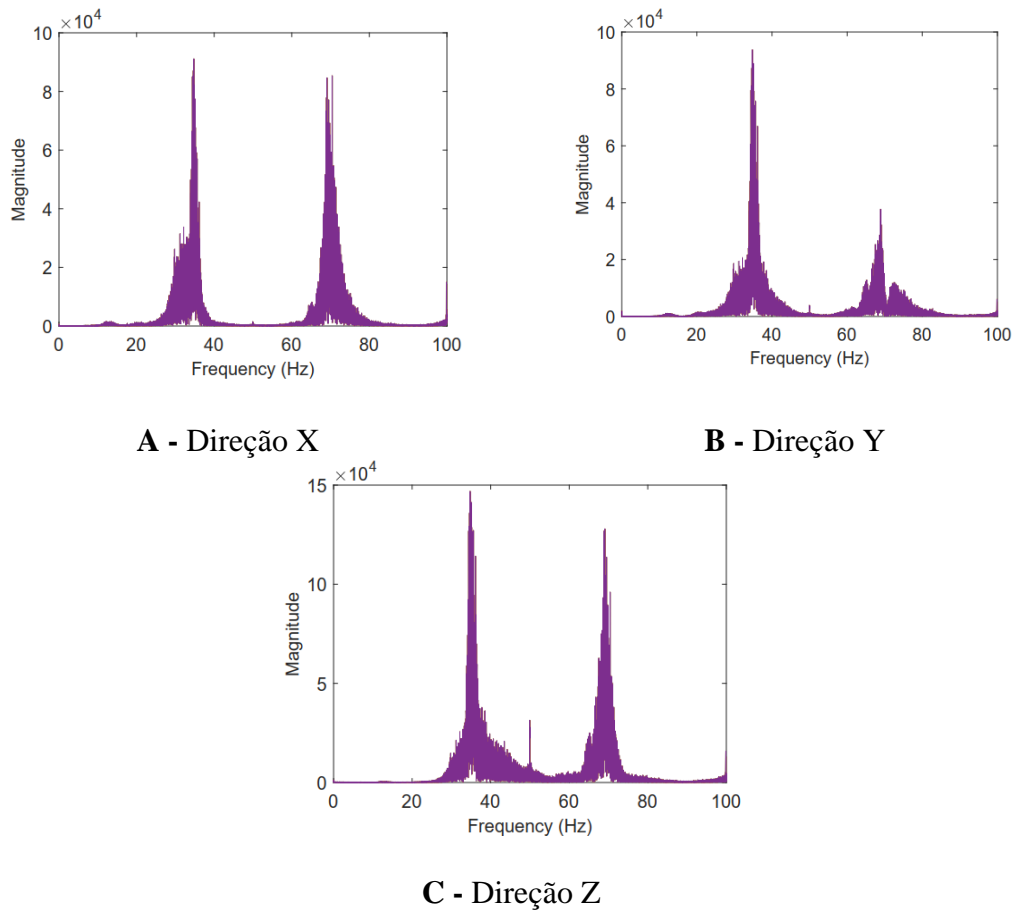


Figura 63 - Espectro de potência da primeira medição de 5 minutos do massagedor

A.1.2) 2ª medição

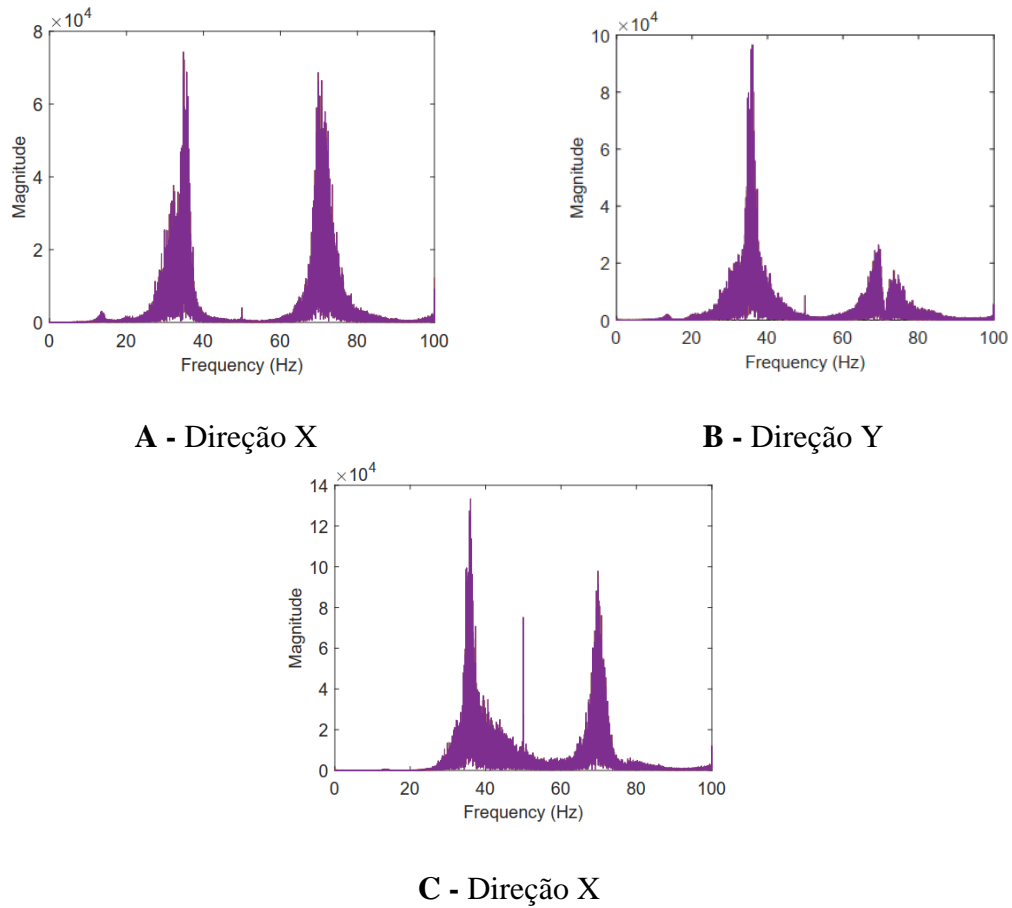
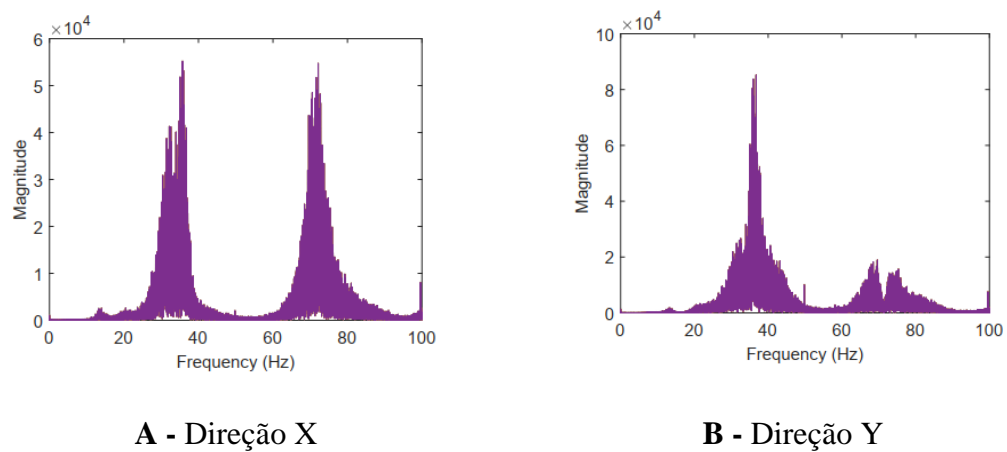
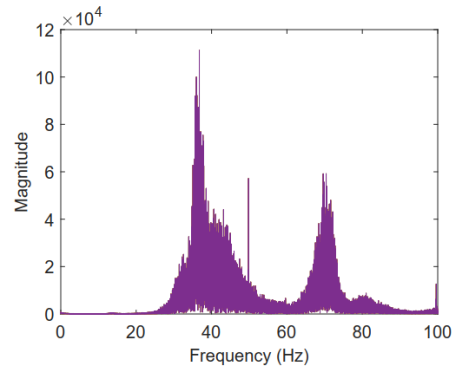


Figura 64 - Espectro de potência da segunda medição de 5 minutos do massageador

A.1.3) 3ª medição

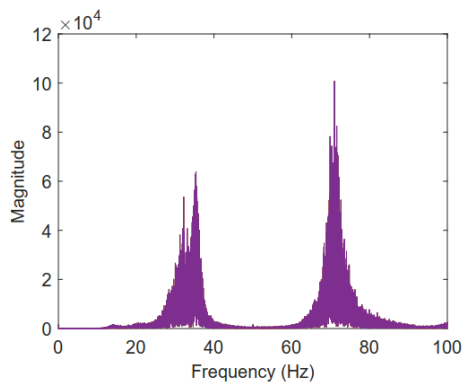




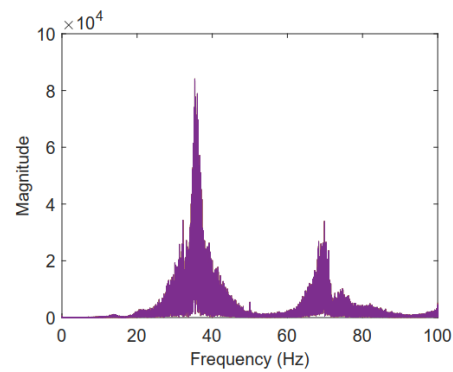
C - Direção Z

Figura 65 - Espectro de potência da terceira medição de 5 minutos do massagedor

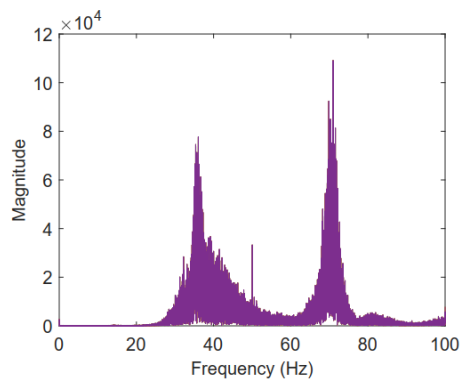
A.1.4) 4ª medição



A - Direção X



B - Direção Y

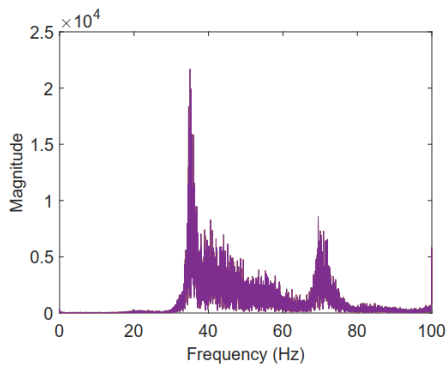


C - Direção Z

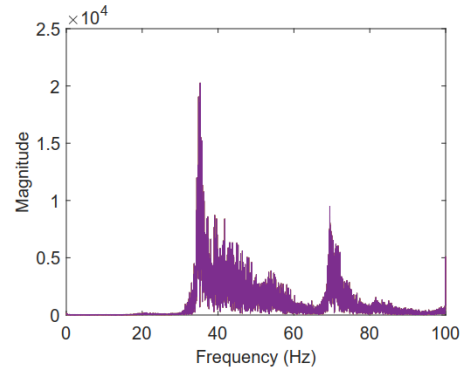
Figura 66 - Espectro de potência da quarta medição de 5 minutos do massagedor

A.2) Medições na direção Z

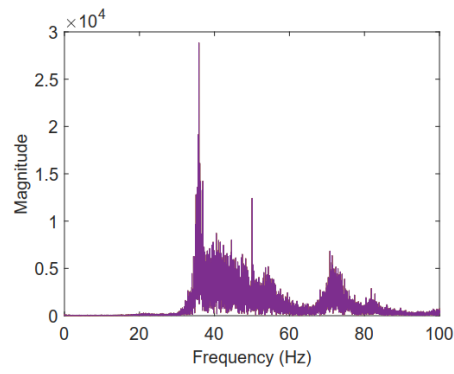
- MEDIÇÃO DE DURAÇÃO DE 1 MINUTO



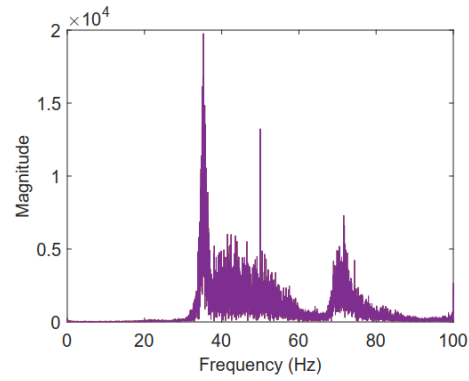
A - 1ª Medição



B - 2ª Medição



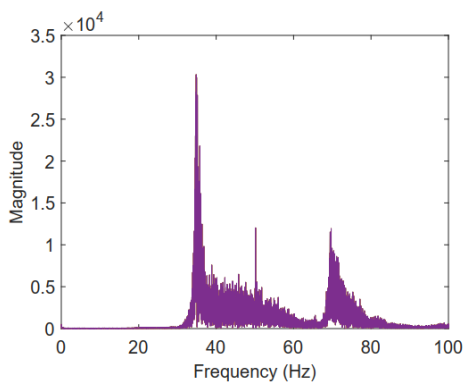
C - 3ª Medição



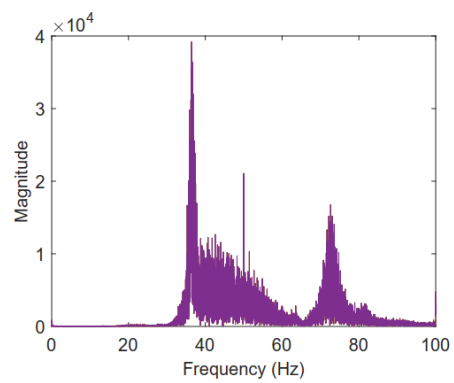
D - 4ª Medição

Figura 67 - Espectro de potência da medição de 1 minuto na direção Z do massagedor

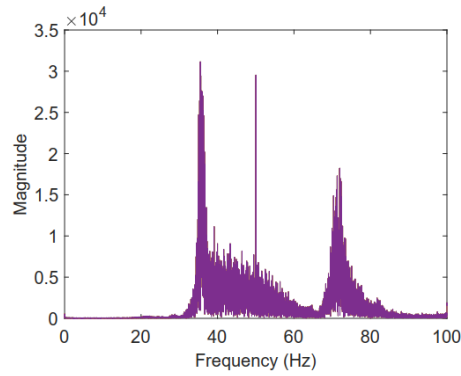
- **MEDIÇÃO DE DURAÇÃO DE 2 MINUTOS**



A - 1ª Medição



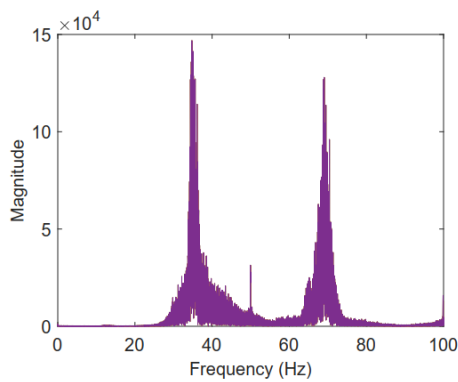
B - 2ª Medição



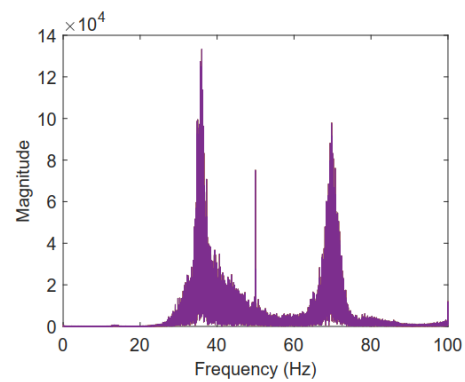
C - 3ª Medição

Figura 68 - Espectro de potência da medição de 2 minutos na direção Z do massageador

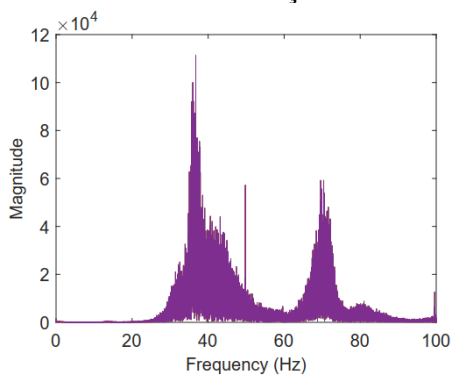
- MEDIÇÃO DE DURAÇÃO DE 5 MINUTOS



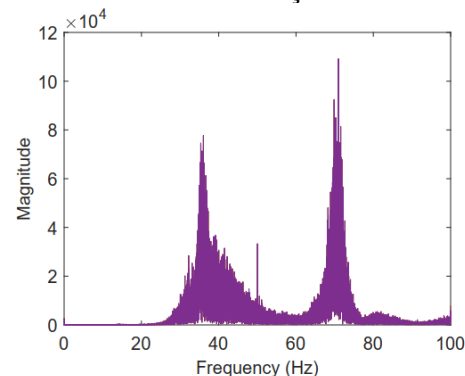
A - 1ª Medição



B - 2ª Medição



C - 3ª Medição

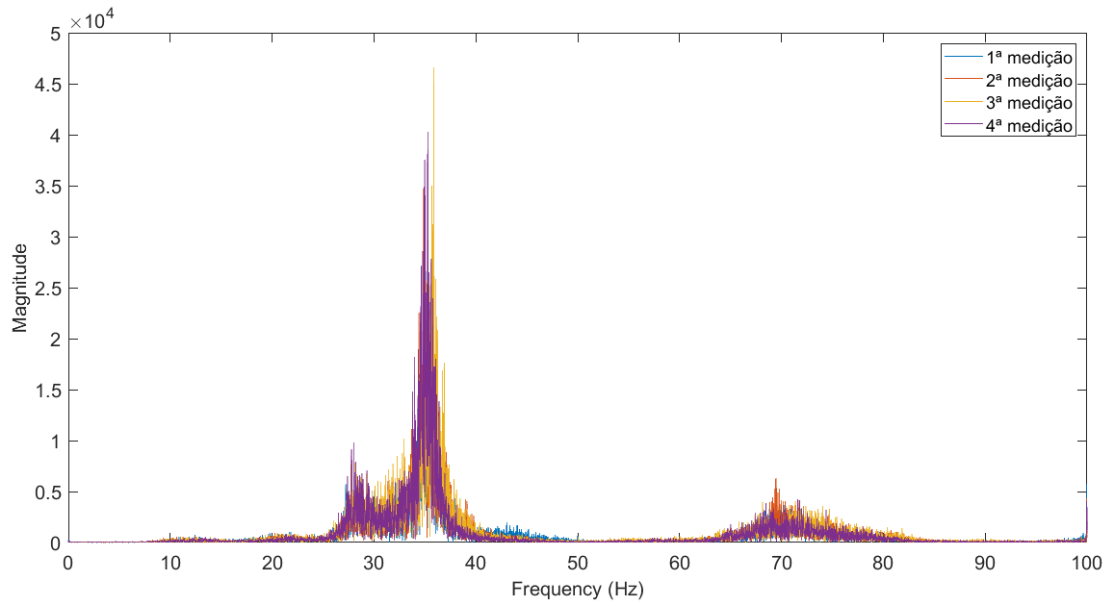


D - 4ª Medição

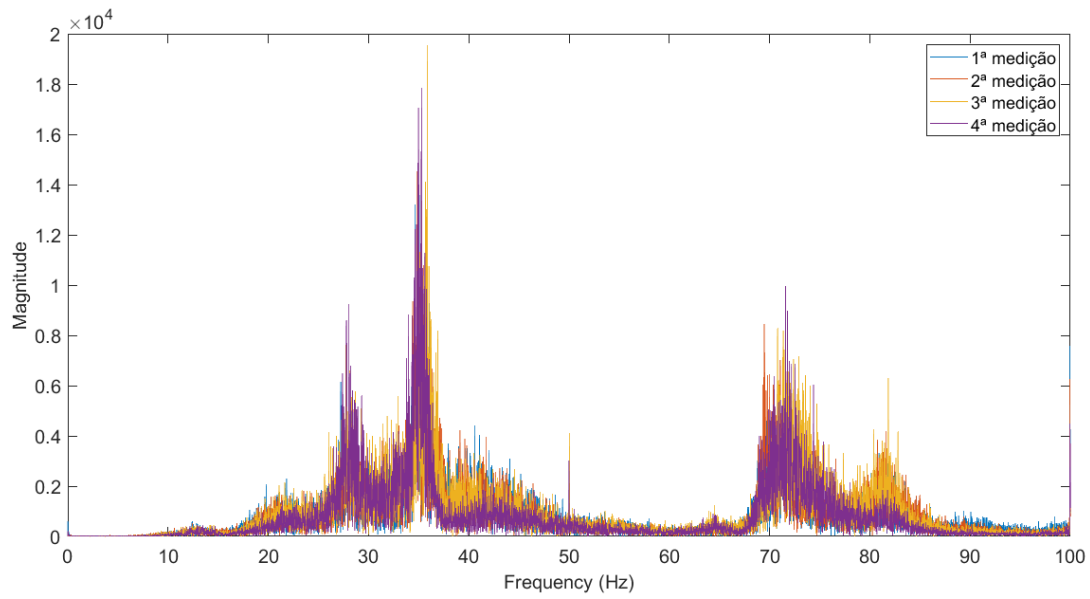
Figura 69 - Espectro de potência da medição de 5 minutos na direção Z do massageador

A.3) Agrupamentos das quatro medições em cada situação

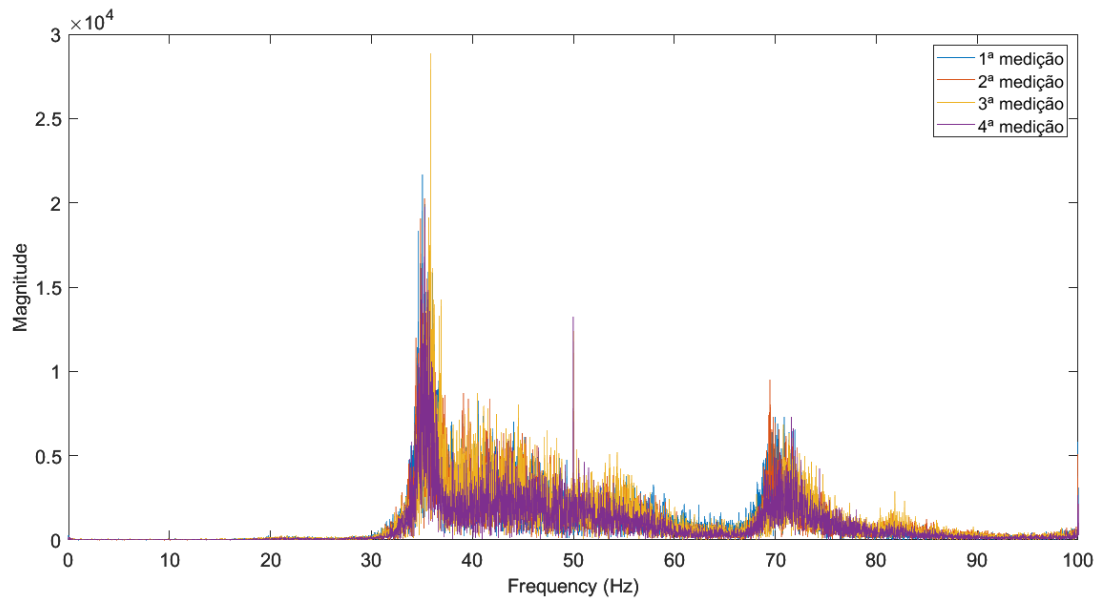
A.3.1) Medição de duração de 1 minuto



A - Direção X



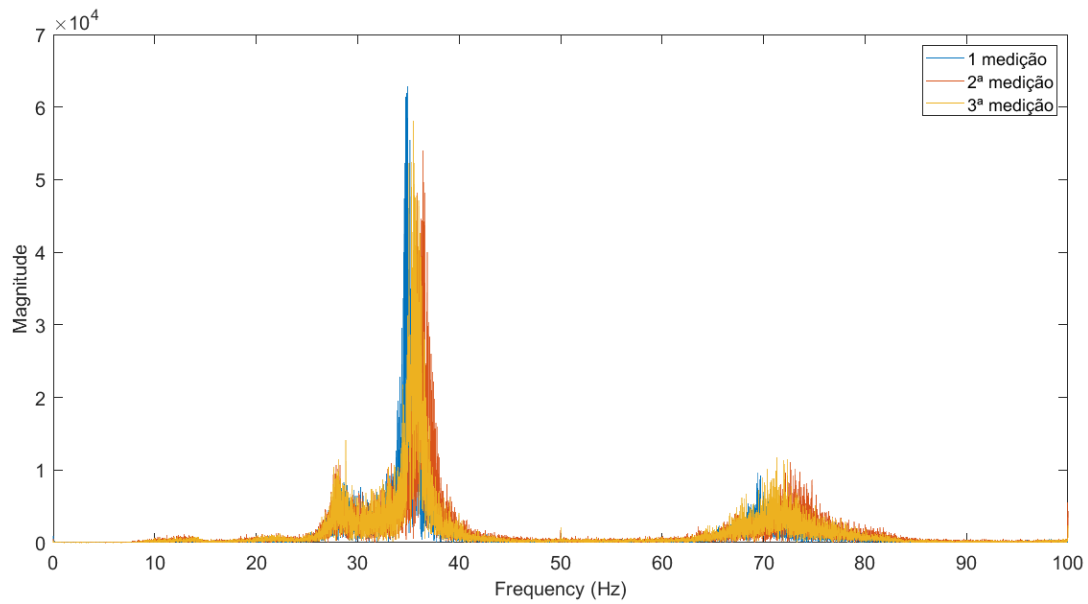
B - Direção Y



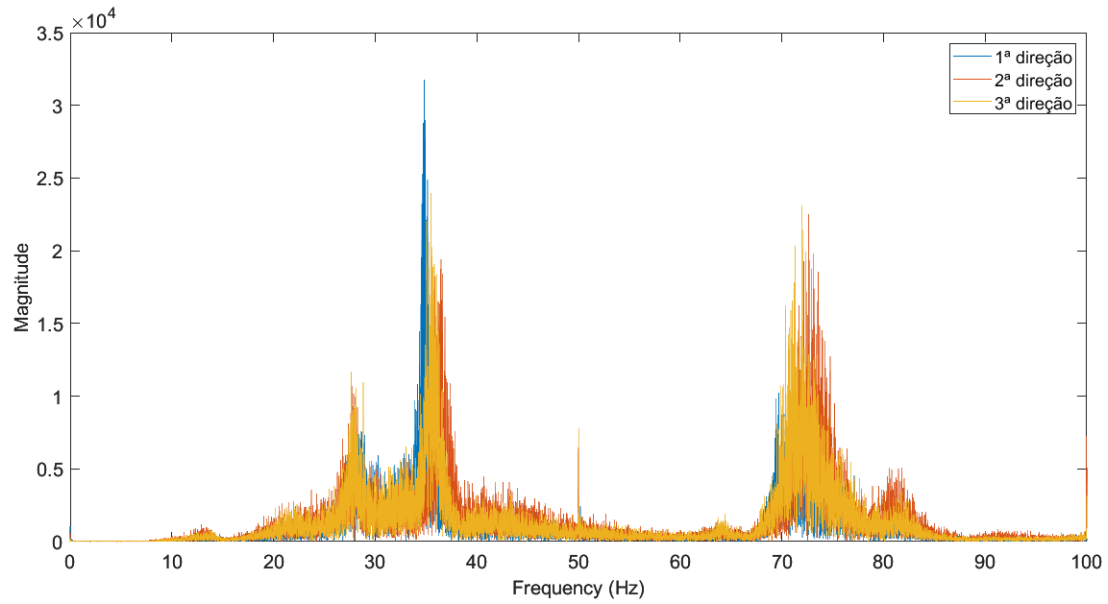
C - Direção Z

Figura 70 - Espectro de potência das medições de 1 minuto do massagedor

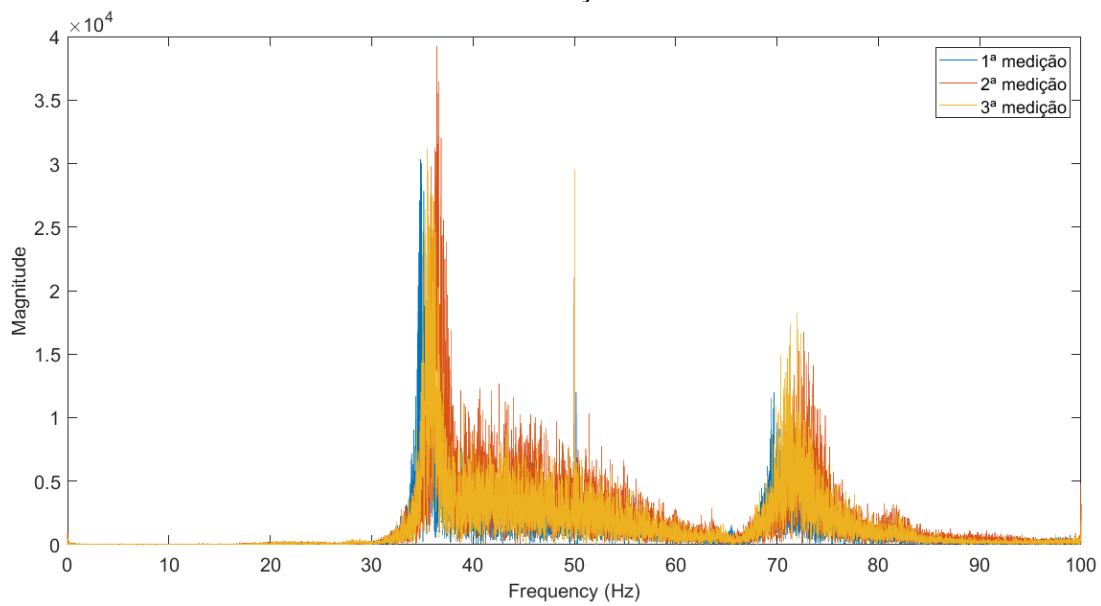
A.3.2) Medição de duração de 2 minutos



A - Direção X



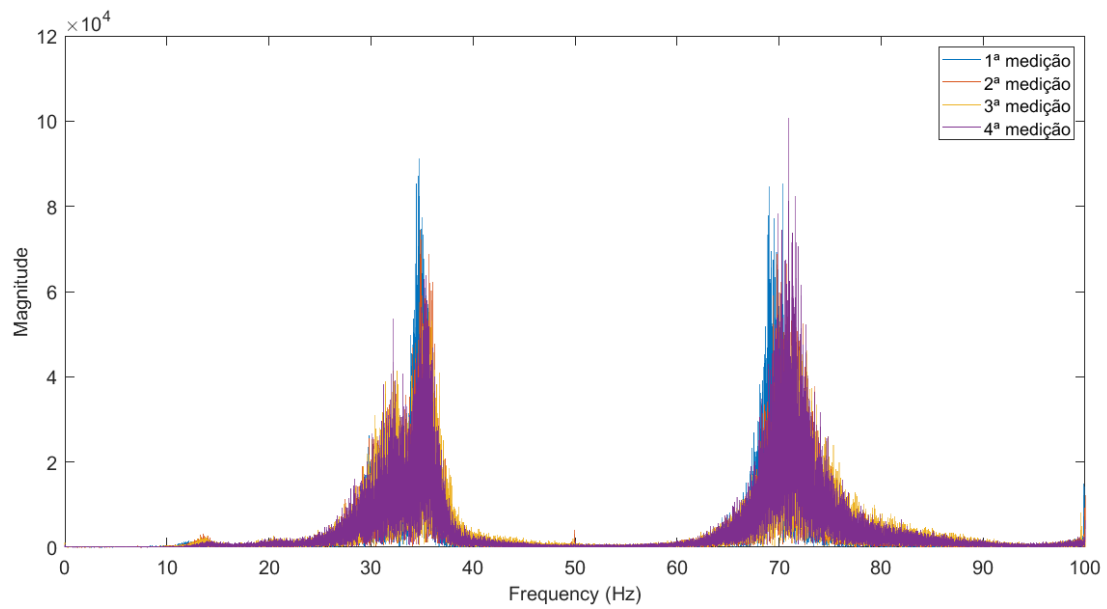
B - Direção Y



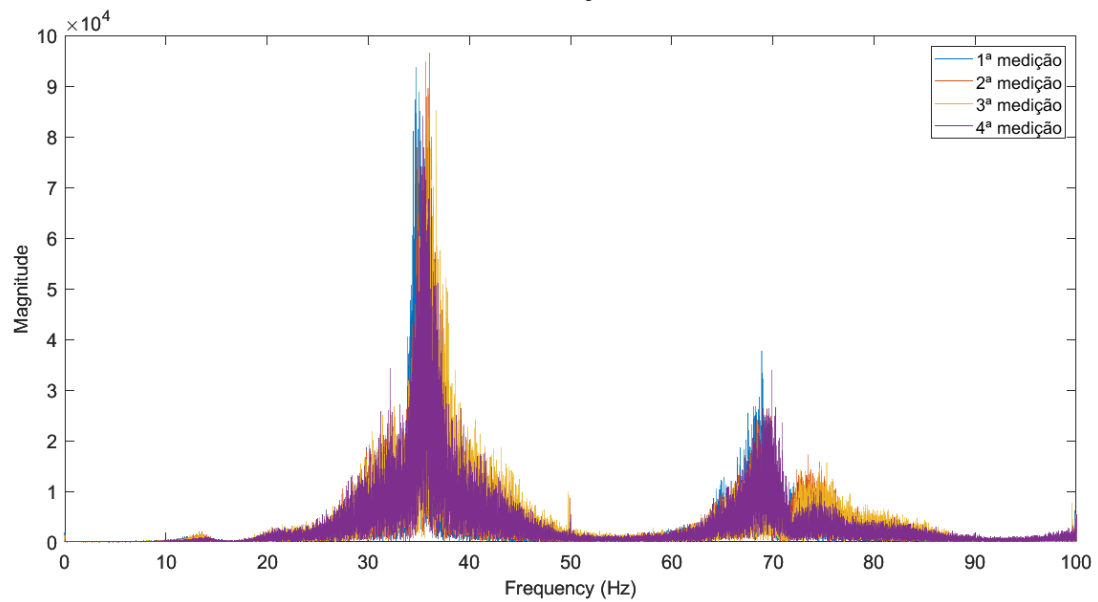
C - Direção Z

Figura 71 - Espectro de potência das medições de 2 minutos do massageador

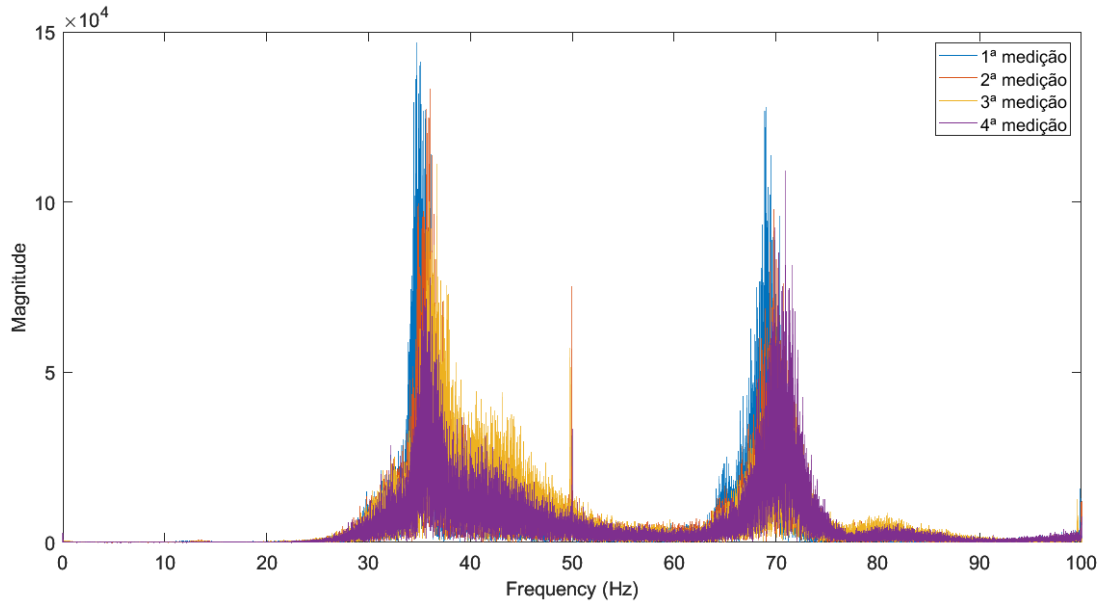
A.3.3) Medição de duração de 5 minutos



A - Direção X



B - Direção Y



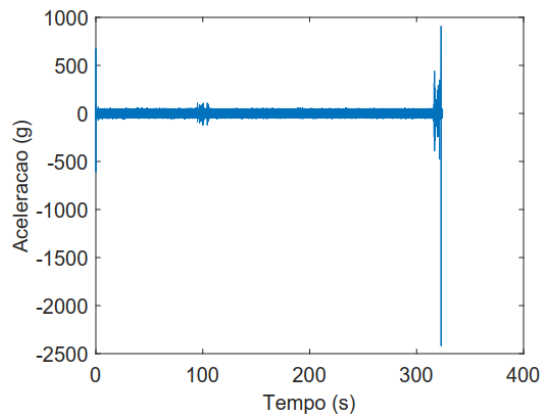
C - Direção Z

Figura 72 - Espectro de potência das medições de 5 minutos do massageador

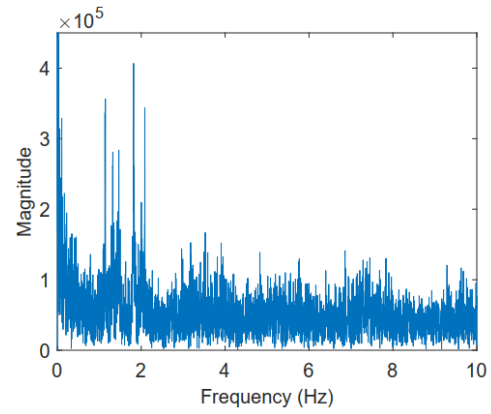
Anexo B – Resultado das medições na cobertura do Estádio de Leiria

B.1) Resultados da Viga 35E

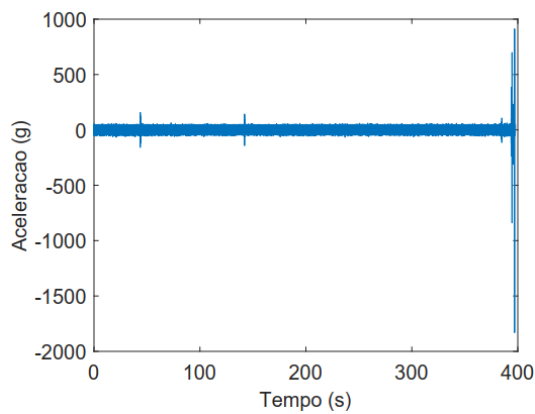
B.1.1) Resultados na Vertical



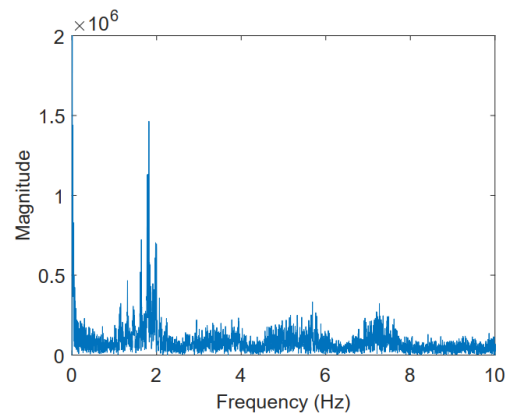
**A - Tempo (s) x Aceleração (g)
8h40**



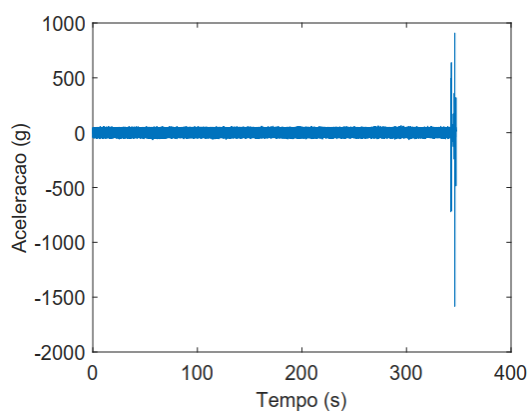
**B - Frequência (Hz) x Amplitude
8h40**



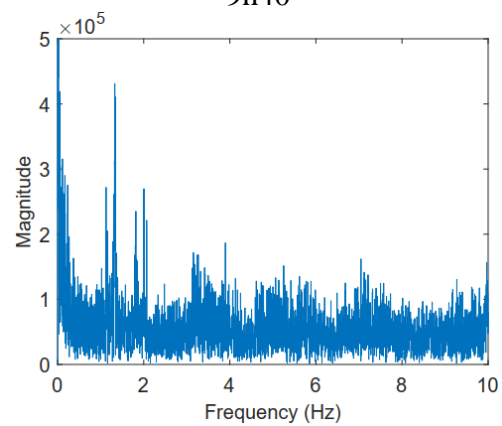
**C - Tempo (s) x Aceleração (g)
9h40**



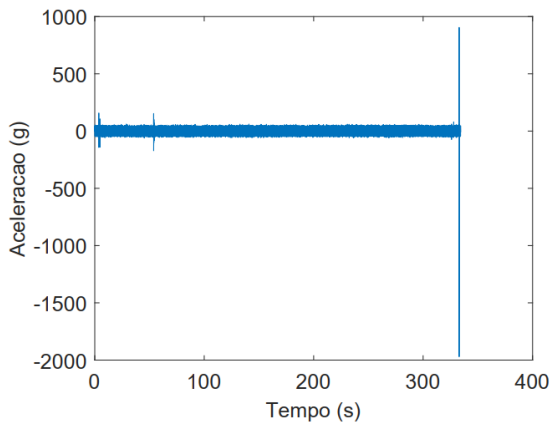
**D - Frequência (Hz) x Amplitude
9h40**



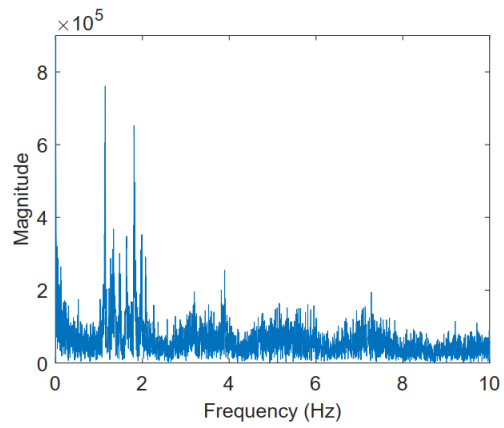
**E - Tempo (s) x Aceleração (g)
10h40**



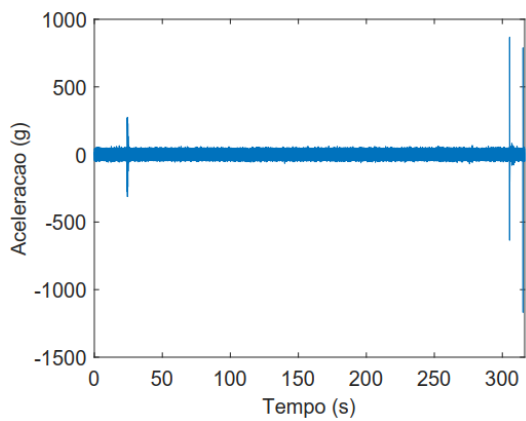
**F - Frequência (Hz) x Amplitude
10h40**



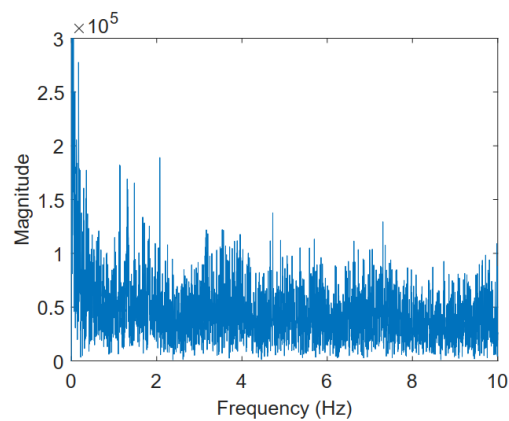
G - Tempo (s) x Aceleração (g)
11h40



H - Frequência (Hz) x Amplitude
11h40



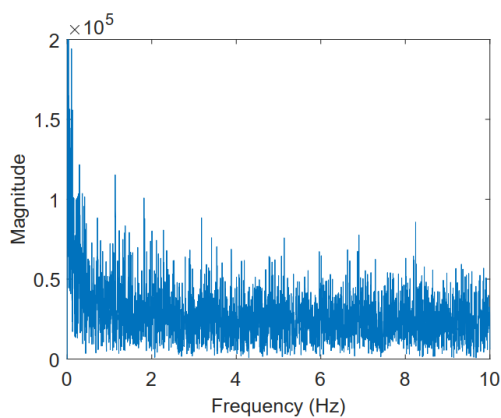
I - Tempo (s) x Aceleração (g)
12h40



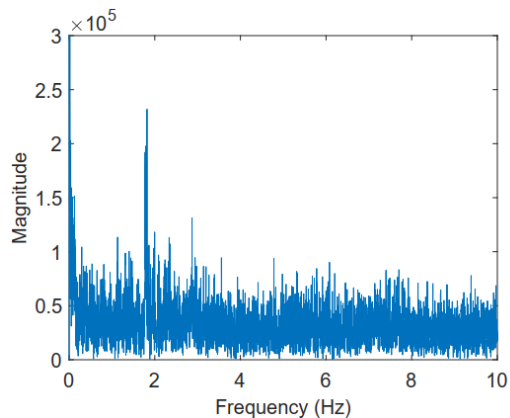
J - Frequência (Hz) x Amplitude
12h40

Figura 73 - Espectro de potência da viga 35E na vertical

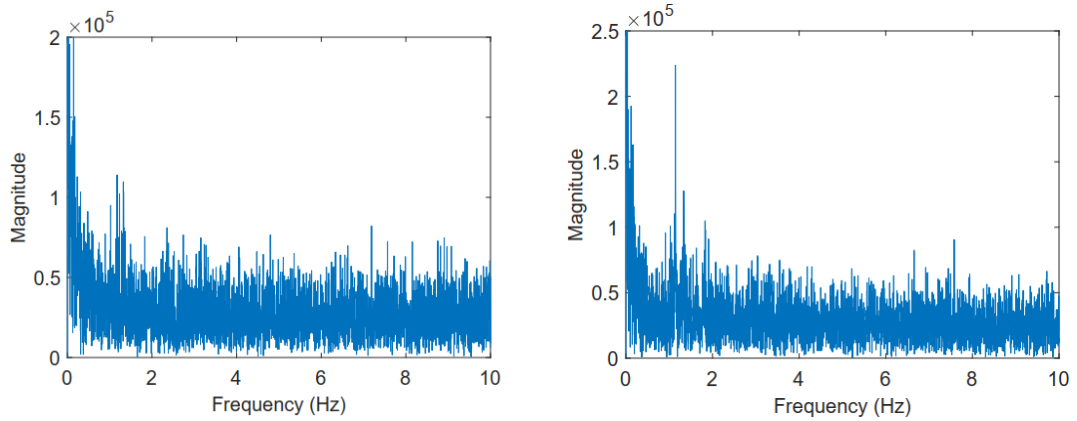
B.1.2) Resultados na Horizontal na Direção Perpendicular da Viga



A - Frequência (Hz) x Amplitude
8h40

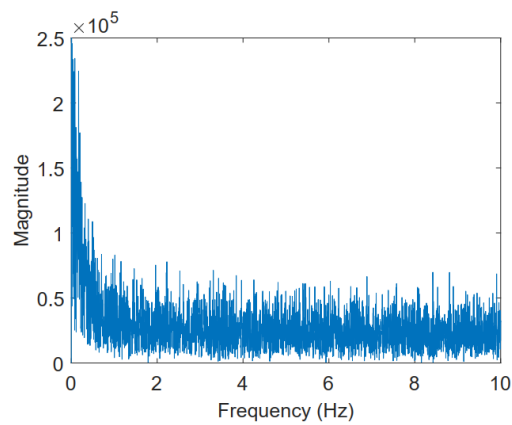


B - Frequência (Hz) x Amplitude
9h40



C - Frequência (Hz) x Amplitude
10h40

D - Frequência (Hz) x Amplitude
11h40

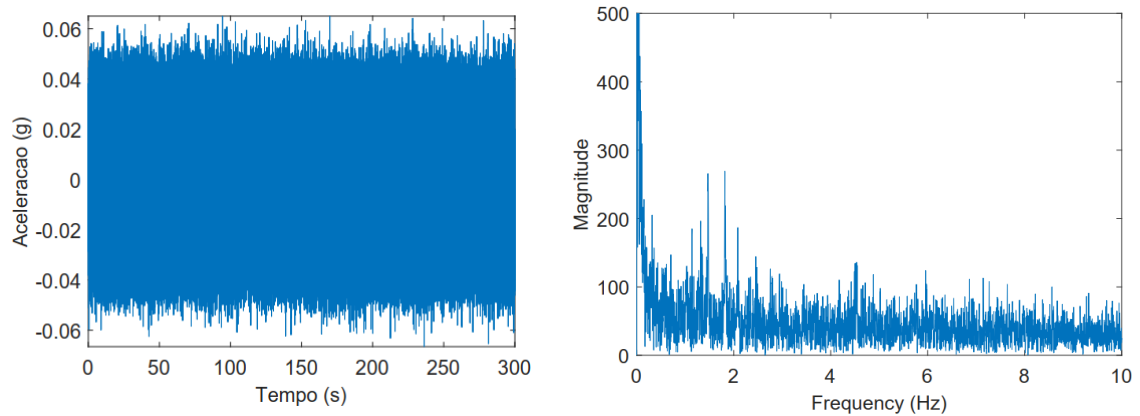


E - Frequência (Hz) x Amplitude
12h40

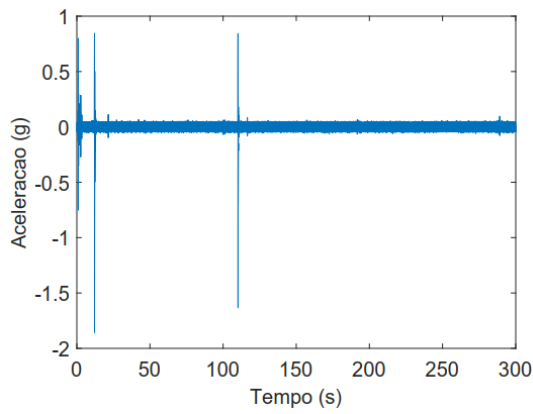
Figura 74 - Espectro de potência da viga 35E na largura da viga

B.2) Resultado da Viga 39E

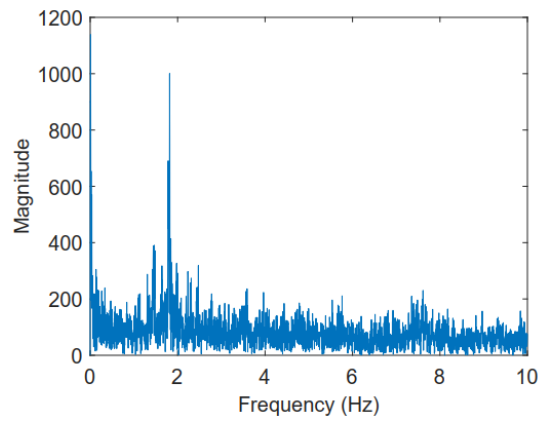
B.2.1) Resultados na Vertical



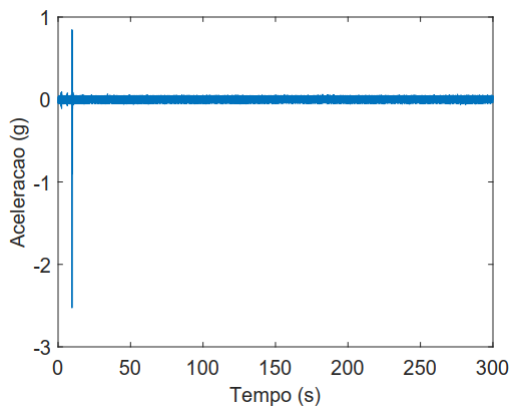
A - Tempo (s) x Aceleração (g)
8h40



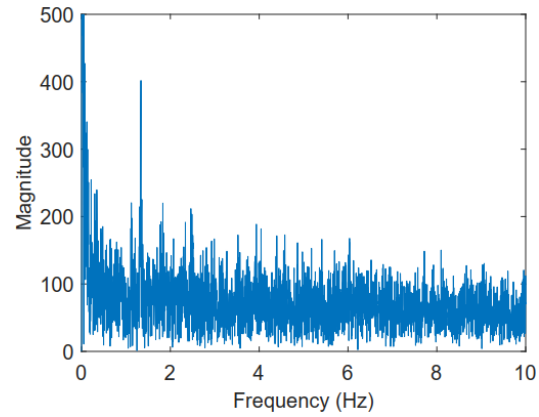
B - Frequência (Hz) x Amplitude
8h40



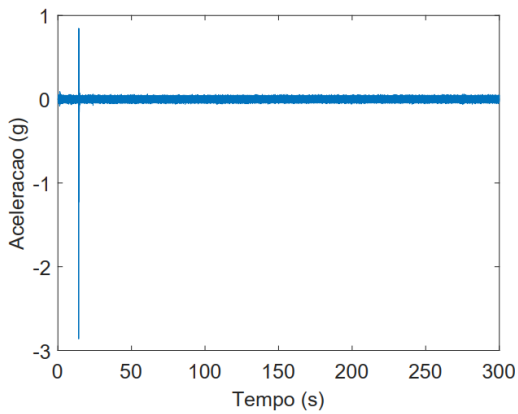
C - Tempo (s) x Aceleração (g)
9h40



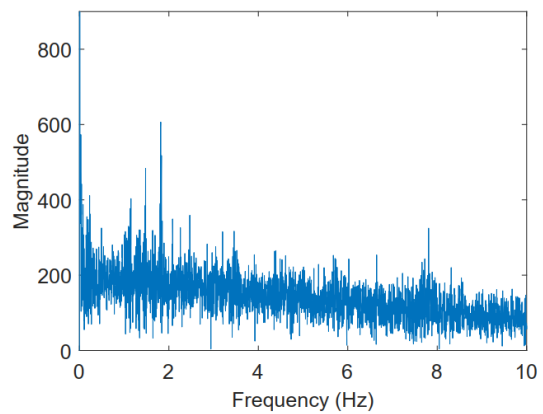
D - Frequência (Hz) x Amplitude
9h40



E - Tempo (s) x Aceleração (g)
10h40

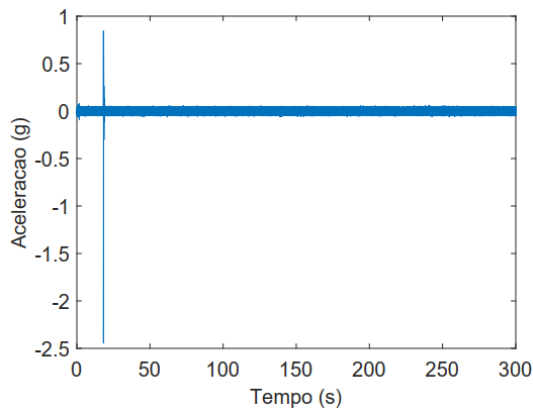


F - Frequência (Hz) x Amplitude
10h40

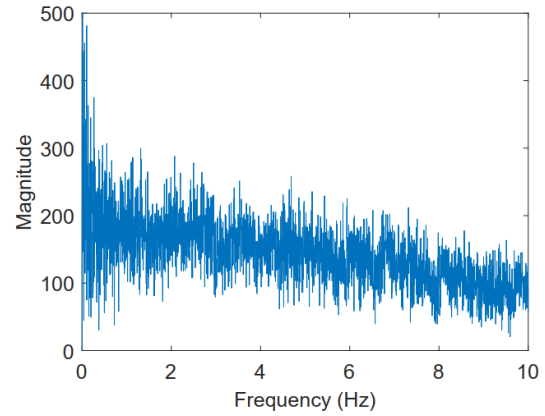


G - Tempo (s) x Aceleração (g)
11h40

H - Frequência (Hz) x Amplitude
11h40



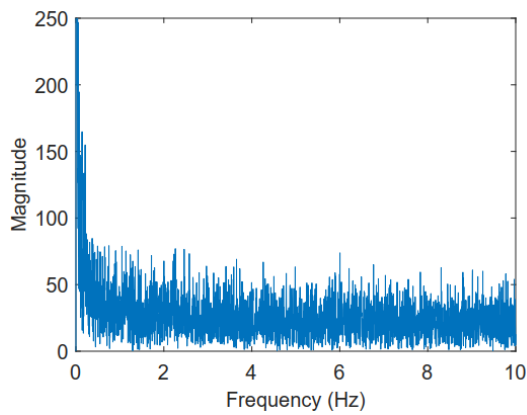
I - Tempo (s) x Aceleração (g)
12h40



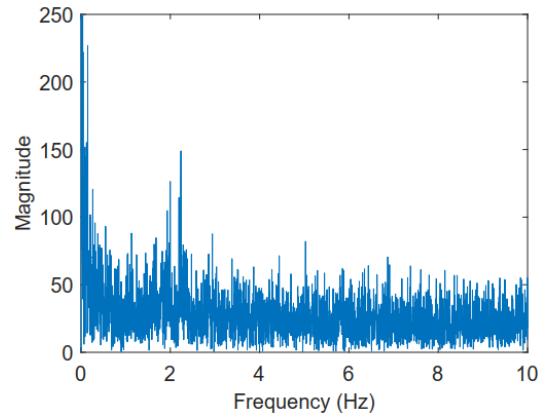
J - Frequência (Hz) x Amplitude
12h40

Figura 75 - Espectro de potência da viga 39E na vertical

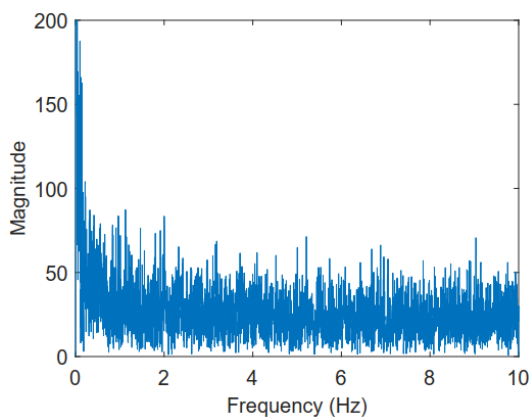
B.2.2) Resultados na Horizontal na Direção Perpendicular da Viga



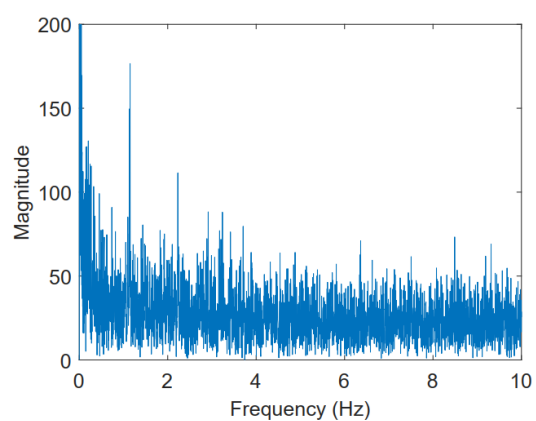
A - Frequência (Hz) x Amplitude
8h40



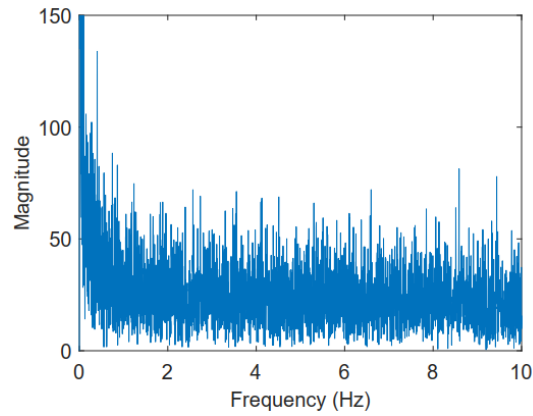
B - Frequência (Hz) x Amplitude
9h40



C - Frequência (Hz) x Amplitude
10h40



D - Frequência (Hz) x Amplitude
11h40

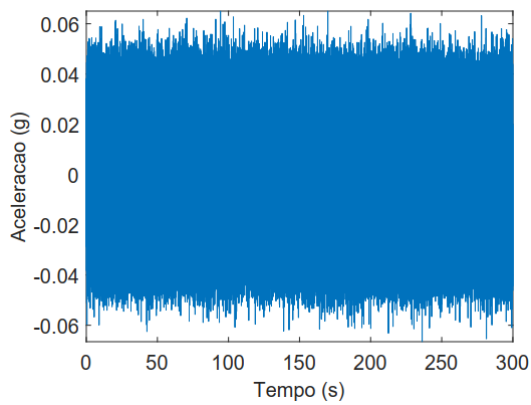


E - Frequência (Hz) x Amplitude
12h40

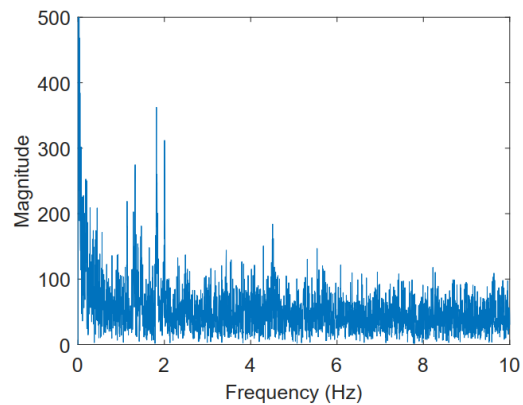
Figura 76 - Espectro de potência da viga 39E na largura da viga

B.3) Resultado da Viga 32D

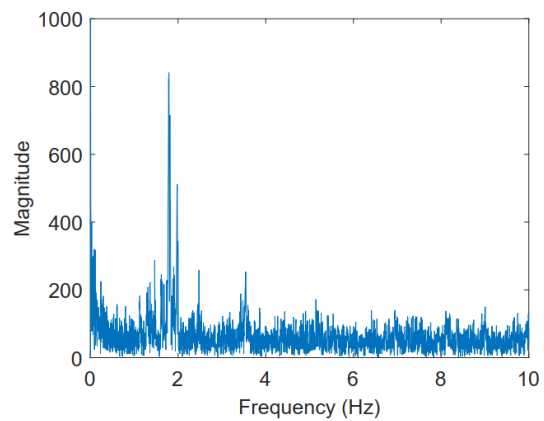
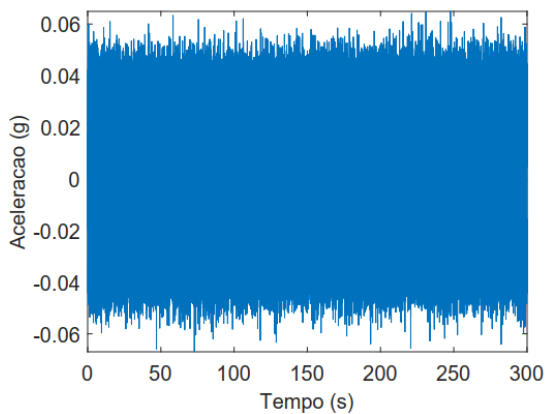
B.3.1) Resultados na Vertical



A - Tempo (s) x Aceleração (g)
8h40



B - Frequência (Hz) x Amplitude
8h40



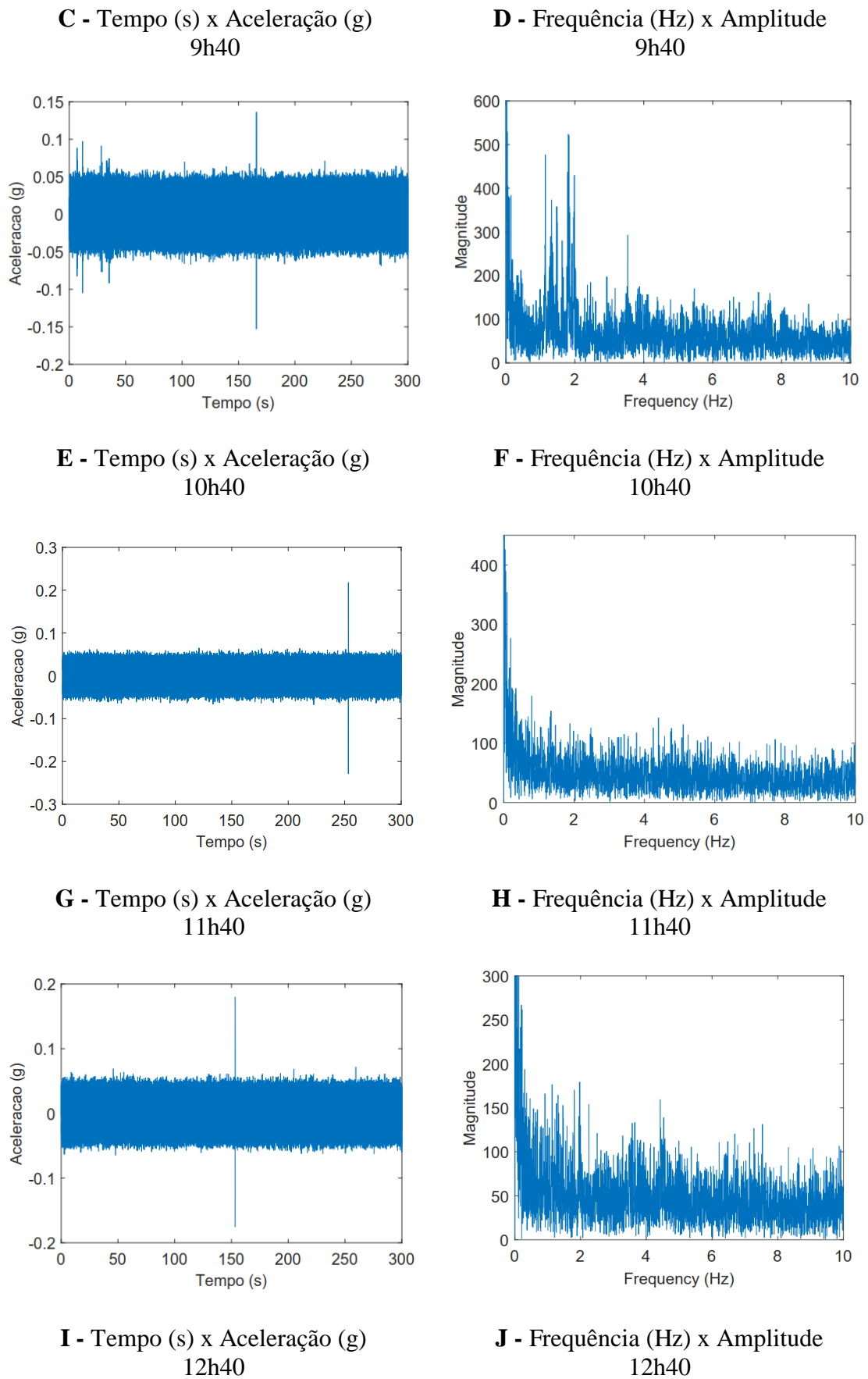
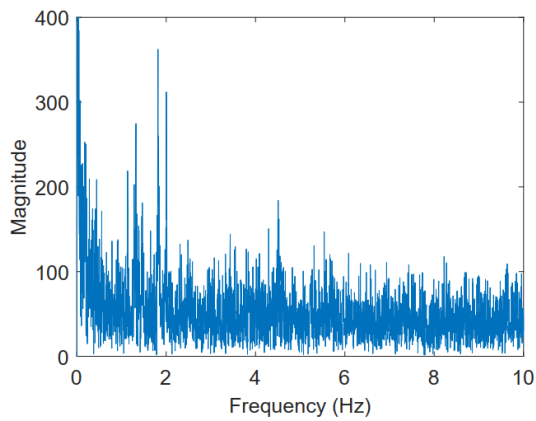
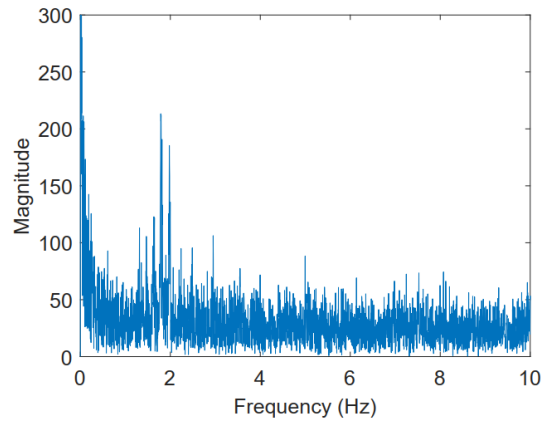


Figura 77 - Espectro de potência da viga 32D na vertical

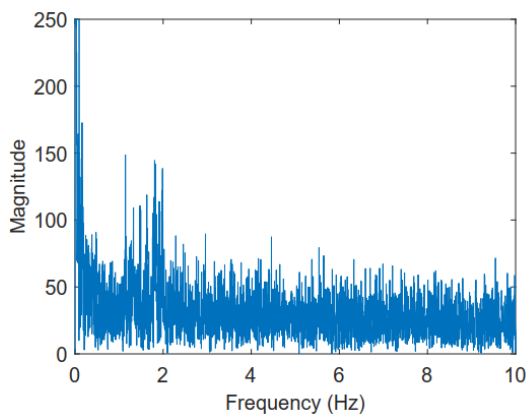
B.3.2) Resultados na Horizontal na Direção da Perpendicular da Viga



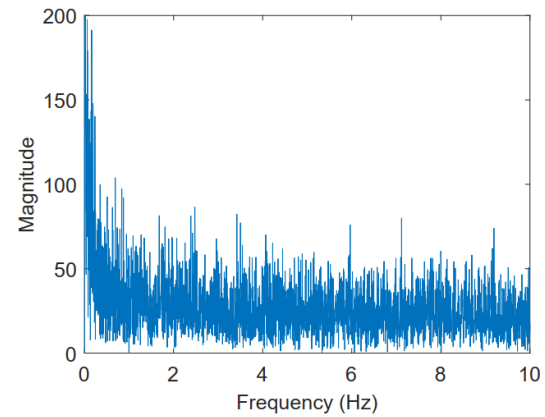
A - Frequência (Hz) x Amplitude
8h40



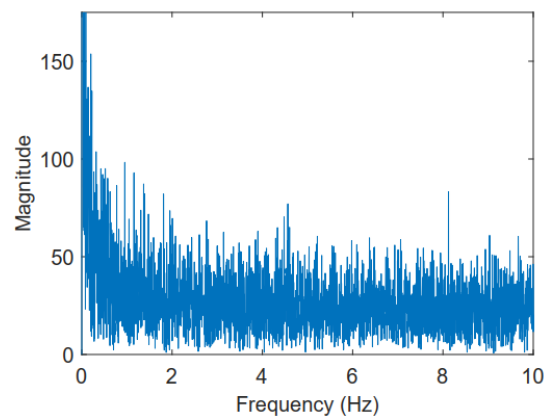
B - Frequência (Hz) x Amplitude
9h40



C - Frequência (Hz) x Amplitude
10h40



D - Frequência (Hz) x Amplitude
11h40



E - Frequência (Hz) x Amplitude
12h40

Figura 78 - Espectro de potência da viga 32D na largura da viga