



AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DINÂMICOS DA AÇÃO DO VENTO NA TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES DO MONTE DA VIRGEM

RAFAEL AUGUSTO DE PAULI

Outubro de 2016

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DINÂMICOS DA AÇÃO DO VENTO NA TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES DO MONTE DA VIRGEM

RAFAEL AUGUSTO DE PAULI

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL –ESTRUTURAS

Orientador: Dr. Diogo Rodrigo Ferreira Ribeiro

Co-Orientador: Dr. Marcelo Rodrigo Carreira (Universidade Tecnológica Federal do Paraná)

15 DE NOVEMBRO DE 2016

ÍNDICE GERAL

Índice Geral	iii
Resumo.....	v
Abstract	vii
Agradecimentos	ix
Índice de Texto	xi
Índice de Figuras.....	xiii
Índice de Tabelas.....	xvii
Glossário.....	xix
Abreviaturas	xxi
1 Introdução.....	1
2 Torre de telecomunicações do Monte da Virgem	15
3 Ensaio de vibração ambiental da torre do Monte da Virgem.....	23
4 Sistema de monitoramento contínuo da torre Monte da Virgem.....	36
5 Conclusões e desenvolvimentos futuros	63
Referências Bibliográficas	67

RESUMO

O principal objetivo desta dissertação prende-se a experimentação do comportamento dinâmico de uma torre de telecomunicação, englobando um ensaio de vibração ambiental e a concepção, desenvolvimento e implantação de um sistema de monitoramento contínuo.

Neste contexto são apresentados alguns fundamentos teóricos a ter em conta nestes domínios, visando uma melhor compreensão dos fenómenos existentes no comportamento dinâmico de torres com dimensões elevadas. São descritos os ensaios dinâmicos utilizados com vista a identificação de parâmetros modais das estruturas, técnicas de identificação modal e a modelagem de um modelo numérico para uma posterior calibração através de técnicas de algoritmo genético.

Este trabalho se enquadra em uma parceria técnica realizada entre o Instituto Superior de Engenharia do Porto e a Portugal Telecom. O caso de estudo teve como foco a torre de telecomunicações do Monte da Virgem, uma torre de estrutura mista constituída por um fuste de betão de 126 metros de altura e um palito metálico com 55 metros de altura, localizada em Vila Nova de Gaia.

Com o intuito de fornecer as ferramentas necessárias para uma calibração de um modelo numérico previamente elaborado, foi realizado um ensaio dinâmico de vibração ambiental, onde foram identificadas as frequências naturais, os modos de vibração e os coeficientes de amortecimento de quatro modos de vibração por aplicação da versão melhorada do método de decomposição no domínio da frequência (EFDD), com recurso ao programa ARTeMIS.

Para a avaliação do comportamento dinâmico da torre sob a acção do vento, foi desenvolvido um sistema de monitoramento contínuo composto por acelerômetros, anemômetros e um sistema de aquisição de dados, que ficará operante durante um período mínimo de um ano fornecendo dados necessários para elaboração de um perfil do vento atuante na região, possibilitando assim o desenvolvimento de intervenções para atenuar problemas gerados por um deslocamento excessivo da estrutura.

Palavras-chave: Vibração ambiental; Torre Monte da Virgem; Monitoramento contínuo; Comportamento dinâmico.

ABSTRACT

The main objective of this work is linked into a experimentation of dynamic behavior of a telecommunication tower, encompassing an environmental vibration testing and conception, development and implementation of a monitoring system continue.

In this context are presented some theoretical basis to take part of these areas, aiming a better comprehension of the phenomena existent in the dynamic behavior of towers with higher dimensions. Dynamic tests used are described in order to identify modal parameters of structures, modal identification techniques and the modeling of a numerical model for later calibration using genetic algorithm techniques.

This work fits into a technical partnership held between the Institute of Engineering of Porto and Portugal Telecom. The case study focused on the telecommunications tower of Mount Virgin, a mixed structure tower composed by a concrete shaft of 126 meters height and a metal stick with 55 meters height, located in Vila Nova de Gaia.

In order to provide the necessary tools for calibration of a numerical model previously elaborated, there was a dynamic environmental vibration test, where there were identified the natural frequencies, vibration modes and the damping coefficients of four vibration modes by application of the improved version of decomposition method in the frequency domain (EFDD) using the program ARTEMIS.

To evaluate the dynamic behavior of the tower under the wind action, it developed a monitoring system still consisting of accelerometers, anemometers and a data acquisition system, which will be operative for a minimum period of one year providing data needed for drafting a wind profile active in the region, thus enabling the development of interventions to alleviate problems caused by excessive displacement of the structure.

Keywords: Environmental vibration, Monte da Virgem Tower, continue monitoring, Dynamic behavior

AGRADECIMENTOS

Ao longo desta jornada tive momentos de desalento e desânimo, mas também de alegria e de conquista. Em todos estes momentos estiveram presentes todos aqueles que tanto contribuíram para o concretizar deste trabalho, e a quem quero manifestar o meu profundo e sincero agradecimento, nomeadamente:

- Ao meu orientador, Dr. Diogo Rodrigo Ferreira Ribeiro, pela oportunidade de poder trabalhar ao seu lado e pela forma dedicada que partilhou os ensinamentos e conhecimentos transmitidos, pela motivação e disponibilidade sempre presentes ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho. Por me possibilitar entrar em contato com uma área tão pouco abordada em meu país e por não hesitar em ajudar em nenhum momento de dificuldade.

- Ao meu co-orientador, Dr. Marcelo Rodrigo Carreira, que mesmo distante sempre se mostrou empolgado e disposto a auxiliar no que fosse preciso.

- Agradeço ao Jorge Leite, por todo apoio fornecido durante todo trabalho, como também ao Tiago Gabriel e Maria Beatriz pelo auxílio na realização dos ensaios.

- Ao Professor Paulo Guedes, responsável pelo Laboratório de Estruturas do ISEP, pela disponibilidade do material necessário para a realização dos ensaios dinâmicos e pela proatividade em solucionar qualquer problema.

- Agradeço ao LESE - Laboratório de Engenharia Sísmica Estrutural - da FEUP, pela disponibilidade das instalações e equipamentos, bem como ao colaborador Nuno Pinto pelo acolhimento e permanente disponibilidade com que me recebeu na fase de desenvolvimento do software de aquisição.

- Agradeço a todos os colegas do ISEP e da UTFPR-CM que me acompanharam neste percurso, pela amizade, camaradagem e partilha de aspirações e expectativas.

- Agradeço tanto a UTFPR-CM quanto ao ISEP pela oportunidade única que me propiciaram com este intercâmbio, por me abrirem novos horizontes e me fornecerem a melhor formação possível.

- Por fim gostaria de agradecer aos meus pais, os quais me possibilitaram a realização deste sonho que sem a sua ajuda e incentivo nunca teria sido possível, através de seus exemplos de amor e coragem me deram forças para seguir em frente após cada deslize e me ensinaram a sempre dar o melhor de mim.

ÍNDICE DE TEXTO

1.1	Considerações Iniciais	1
1.2	Revisão Bibliográfica	2
1.2.1	Design and Installation of a Permanent Monitoring System for Pallazo Lombardia in Milano, Italy - (Berardengo, 2016)	2
1.2.2	Dynamic monitoring and numerical modelling of communication towers with FBG based accelerometers - (Antunes, Travanca, Varum, & André, 2012)	4
1.2.3	Response of tall buildings to weak long distance earthquakes - (Brownjohn & Pan, 2001)..	6
1.2.4	Dynamic investigation of tv towers - (Beirow & Osterrieder, 2001)	8
1.2.5	The Stuttgart TV Tower — displacement of the top caused by the effects of sun and wind - (Breuer, Chmielewski, Górski, Konopka, & Tarczyński, 2008).	9
1.2.6	Theoretical and experimental modal analysis of the Guangzhou New TV Tower - (Chen et al., 2011).....	11
1.3	Objetivos	13
2.1	Descrição	15
2.2	Modelo numérico	17
2.3	Parâmetros modais	21
3.1	Descrição	23
3.2	Ensaio anteriores	28
3.3	Identificação de frequências e modos de vibração	29
3.4	Comparação entre modelo numérico e dados experimentais	32
4.1	Plano de monitoramento	37
4.2	Software de aquisição	46
4.3	Validação do sistema de aquisição	49

ÍNDICE DE TEXTO

4.4	Instalação do sistema na torre Monte da Virgem	53
4.5	Análises preliminares do sistema de monitoramento contínuo.....	56
4.5.1	Direção do vento.....	57
4.5.2	Velocidade do vento	58
4.5.3	Aceleração da estrutura	59
5.1	Conclusões	63
5.2	Desenvolvimentos futuros.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Posições dos sensores no edifício Palazzo Lombardia.....	3
Figura 1.2 - Espectro de densidades de potência no piso 37, 37CXY acelerações do núcleo, 37EXY acelerações das extremidades.....	3
Figura 1.3 – Dia Ventoso, a) Acelerações do piso 37, b) Velocidade do vento.....	4
Figura 1.4 – Espectro de frequências (FFT).....	5
Figura 1.5 - Modos de vibração e respectivas frequências no modelo numérico.....	6
Figura 1.6 - - Modo A1 (superior) e modo A2 (inferior) a resposta de aceleração RMS em setembro de 1999.....	7
Figura 1.7 - Disposição do sistema de monitoramento da torre Cottbus.....	8
Figura 1.8 – Disposições de antenas investigadas e influencia no coeficiente de arrasto.....	9
Figura 1.9 – Resposta dinâmica da estrutura gerada por uma tempestade de ventos e esboço da tração diária da estrutura devido a temperatura.....	10
Figura 1.10 - Design da Torre de TV New Guangzhou e modelo numérico.....	12
Figura 1.11 - Frequências naturais em diferentes estágios de construção.....	13
Figura 2.1 - Torre de telecomunicações do Monte da Virgem.....	15
Figura 2.2 – Estrutura metálica de suporte.....	16
Figura 2.3 – Pormenores da torre metálica.....	16
Figura 2.4 - Projetos arquitetônicos iniciais da torre Monte da Virgem.....	17
Figura 2.5 - Modelo numérico em elementos finitos.....	18
Figura 2.6 - Estrutura de suporte da escadaria metálica.....	19
Figura 2.7 – Módulo 4 do fuste de betão.....	20
Figura 2.8 – Modelagem das plataformas elevadas.....	20
Figura 2.9 – Modos de vibração em estudo na direção X.....	21

Figura 3.1 – Sismógrafo móvel.	25
Figura 3.2 – Sincronização de base temporal com sensor GPS.	26
Figura 3.3 – Plano de ensaio de vibração ambiental.	27
Figura 3.4 – Posicionamento dos sismógrafos para ensaio de vibração ambiental.	28
Figura 3.5 - Modos de vibração da estrutura obtidos através de ensaio de vibração ambiental.	29
Figura 3.6 – Espectro de densidade de potência na direção X.	30
Figura 3.7 – Modos de vibração da estrutura na direção X.	31
Figura 3.8 - Espectro de densidade de potência na direção Y.	31
Figura 3.9 - Modos de vibração da estrutura na direção Y.	32
Figura 3.10 – Matrix MAC para a direção X.	33
Figura 3.11 – Correlação ideal de parâmetro MAC.	34
Figura 3.12 – Principais parâmetros MAC analisados.	34
Figura 3.13 – Comparação entre as deformadas na direção X.	36
Figura 4.1 – Modelo de sistema de aquisição de dados.	38
Figura 4.2 – Proposta inicial de localização dos anemômetros.	39
Figura 4.3 – Disposição dos anemômetros na estrutura na cota 320.	40
Figura 4.4 – Proposta inicial de suporte para instalação do anemômetro.	40
Figura 4.5 – Teste do suporte inicial em laboratório.	41
Figura 4.6 – Suporte final para anemômetros.	42
Figura 4.7 – Representação do funcionamento da gaiola de Faraday.	43
Figura 4.8 – Posicionamento dos acelerômetros.	44
Figura 4.9 – Suporte de fixação para acelerômetros.	45
Figura 4.10 – Plano de monitoramento implementado.	46
Figura 4.11 – Layout do software de aquisição.	47
Figura 4.12 – Algoritmo do software de aquisição.	49
Figura 4.13 – Disposição dos anemômetros para o primeiro teste de validação	50
Figura 4.14 – Análise de direção e velocidade do vento para o primeiro ensaio 24/03/2016.	51

Figura 4.15 – Disposição dos anemômetros para o segundo teste de validação.	52
Figura 4.16 - Análise de direção e velocidade do vento para o segundo ensaio 30/03/2016.	52
Figura 4.17 – Instalação dos anemômetros.	53
Figura 4.18 – Conexão dos cabos coaxiais.....	54
Figura 4.19 – Instalação dos anemômetros da cota 255,04.	55
Figura 4.20 - Instalação dos anemômetros da cota 312,65.	55
Figura 4.21 – Sistema de aquisição de dados.....	56
Figura 4.22 – Análise da direção do vento para os dois anemômetros no dia 16/08/2016.	57
Figura 4.23 – Turbulência gerada por ventos Sudeste.....	58
Figura 4.24 – Análise das velocidades dos anemômetros no dia 16/08/2016.....	59
Figura 4.25 – Acelerações da estrutura no dia 16/08/2016 na direção X.....	60
Figura 4.26 – Acelerações nas direções X e Y na cota 312.65m no dia 16/08/2016.....	61
Figura 4.27 - Espectro de densidade de potência na direção X referente ao dia 16/08/2016.	61
Figura 4.28 – Principais modos de vibração na direção X.	62

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Parâmetros modais estudados.	22
Tabela 3.1 – Sismógrafo GeoSIG GMS Plus+	24
Tabela 3.2 – Comparação entre frequências do modelo numérico e ensaio de vibração ambiental.	35
Tabela 4.1 – Anemômetro Vaisala WM302 inserido no sistema de monitoramento.	38
Tabela 4.2 – Acelerômetros inseridos no sistema de monitoramento	43
Tabela 4.3 - Sistemas de aquisição de dados da National Instruments.	45

GLOSSÁRIO

Betão – Concreto

Encastrado – engastado

V – Volts

Hz – Hertz

m – metros

s – segundos

ABREVIATURAS

FEC - Finitiy Elements Calculation

FBG - Fiber Bragg Gratings

FFT - Fast Fourier Transform

EFDD - Enhanced Frequency Domain Decomposition

FDD - Frequency Domain Decomposition

CFDD - Curve Fit Frequency Domain Decomposition

MAC - Modal Assurance Criterion

CC – Corrente continua

ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Desde os primórdios da humanidade, o ser humano tem a necessidade de se comunicar com outras pessoas. Neste cenário nasce a telecomunicação, que é definida como a transmissão de informações a distância, quer através de correntes elétricas, quer através de ondas eletromagnéticas.

As telecomunicações desempenham um papel muito importante, não apenas na sociedade em geral, permitindo e facilitando a comunicação entre pessoas, mas também na economia dos países, sendo um dos segmentos de mercado com maior crescimento, tanto em nível nacional, como em nível internacional.

Com um mundo cada vez mais globalizado e uma rápida evolução tecnológica, a demanda por meios de telecomunicação mais eficientes vem crescendo significativamente, obrigando as grandes empresas do setor a desenvolverem redes de distribuição de sinais mais complexas.

Desta maneira, para a transmissão de ondas eletromagnéticas através de grandes distâncias, vem se tornando necessário a criação de suportes para fixação das antenas cada vez mais complexos, capazes de vencer os mais variados tipos de obstáculos, tanto geográficos como físicos.

Atualmente, as torres são um dos principais suportes físicos para a instalação de equipamentos utilizados para a emissão de ondas eletromagnéticas que permitem serviços diversos, tais como rádio, televisão ou comunicações móveis.

Com a busca permanente por parte das operadoras para abranger o maior território possível e um sinal de melhor qualidade, as torres de suporte para os equipamentos de transmissão vem ganhando dimensões cada vez maiores.

Esse aumento na demanda por estruturas altas não é mais somente associado a necessidades técnicas, mais também estão atrelados a outros fatores como turismo ou demonstração de poder econômico.

Essa constante busca por estruturas cada vez mais elevadas na construção civil, também trouxe novos desafios na área de engenharia civil, onde fatores que antes eram irrelevantes, agora passam a ter um efeito significativo, mais especificamente, fatores naturais como vento e sismos passaram a ser preponderantes tanto para a geometria dos edifícios como para o seu dimensionamento.

Segundo (Oliveira, 2014):

No domínio das ações horizontais, o vento assume especial relevância e da sua interação com os edifícios altos surgem forças dinâmicas que podem induzir fenómenos de excitação dinâmica capazes de, em termos de segurança, comprometer a integridade estrutural dos edifícios e, em termos de serviço, provocar desconforto aos seus utilizadores.

O modo de vibração de uma estrutura é a forma deslocada da mesma quando excitada por forças dinâmicas ou em vibração livre. Um fenómeno de vibração caracteriza-se por um movimento oscilatório de um corpo em torno de uma situação de equilíbrio, que resulta de uma transferência entre a energia potencial e a energia cinética associadas.

Na área da construção civil, as vibrações excessivas em estruturas de elevada altura e esbeltes são potencialmente causadoras de danos estruturais, se fazendo assim necessário um estudo mais detalhado das possíveis causas, com o intuito de minimizar os danos e desenvolver métodos de prevenção.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Progressivamente, o comportamento das estruturas vem sendo questionados, em face ao aumento das exigências por parte dos usuários que requerem construções mais seguras e mais duradouras. Como exemplo, em estruturas como ginásios de esportes, estádios, salas de dança, indústrias, pontes e passarelas, as vibrações excessivas geradas pelo grande número de cargas dinâmicas podem ocasionar grandes inconvenientes, caso não sejam devidamente previstas em projeto.

Visto isso, a monitorização de estruturas vem se tornando uma das mais populares áreas de investigação no domínio da engenharia civil atualmente, sendo abordada em diversos artigos ao redor do mundo.

A seguir é apresentado um levantamento de casos semelhantes ao proposto neste trabalho de ensaios de vibração ambiental e monitoramento contínuo de estruturas elevadas.

1.2.1 Design and Installation of a Permanent Monitoring System for Pallazo Lombardia in Milano, Italy - (Berardengo, 2016)

No ano de 2015, um grupo de pesquisadores liderados por Marta Berardengo da Universidade de Parma, realizou um ensaio dinâmico no edifício Pallazo Lombardia, com 162 metros de altura. Este edifício está localizado na cidade de Milão e atualmente é a sede do governo regional.

Inicialmente, foi realizado um ensaio de vibração ambiental ainda na fase de construção, com o qual se obteve os principais modos de vibração e suas respectivas frequências, que possibilitaram a calibração do modelo de FEC.

Devido a elevada importância dos prédios públicos em casos de eventos excepcionais como por exemplo terremotos, também foi desenvolvido um sistema de monitoramento contínuo a fim de detectar e prevenir possíveis problemas em termos de conforto e falhas estruturais.

O sistema de monitoramento contínuo é composto por 24 acelerômetros piezelétricos PCB de fundo de escala $\pm 0.5g$, sensores de inclinação Singer TS de resolução $\pm 5^\circ$ e anemômetros NESA ANS-VV1-A. Todos os sensores são conectados através de caixas de ligação e cabos multipolares até o sistema de aquisição de dados, e suas disposições podem ser observadas na Figura 1.

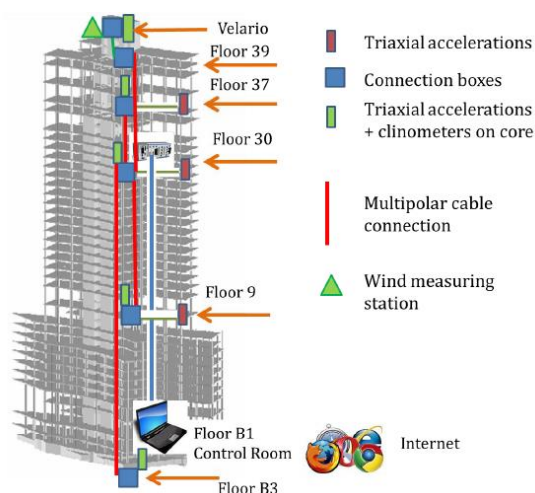


Figura 1.1 - Posições dos sensores no edifício Palazzo Lombardia.

O sistema de aquisição de dados foi desenvolvido para armazenar os dados 24 horas por dia e é composto por uma unidade de aquisição de dados National Instrument C-RIO, que recebe o sinal analógico e o transforma em um sinal digital e um sistema de armazenamento e visualização, que recebe os dados da unidade de aquisição e os armazena no disco rígido. A taxa de amostragem utilizada para o sinal analógico foi de 2000 Hz, e os ficheiros foram gravados em intervalos de 10 minutos.

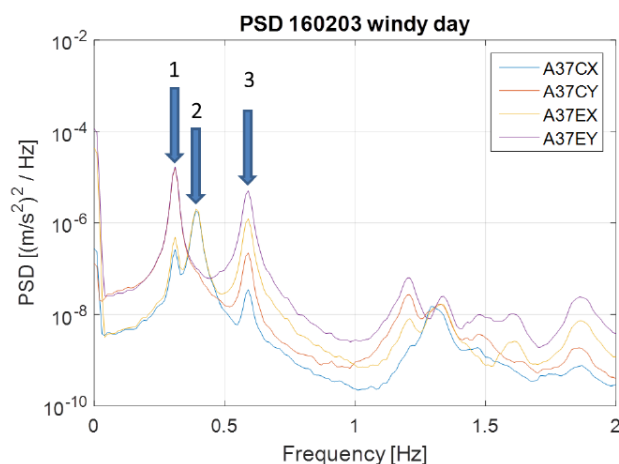


Figura 1.2 - Espectro de densidades de potência no piso 37, 37CXY acelerações do núcleo, 37EXY acelerações das extremidades.

Os principais valores de frequência e os modos de vibração associados se mostraram em muito boa concordância aos encontrados durante os testes do ensaio ambiental.

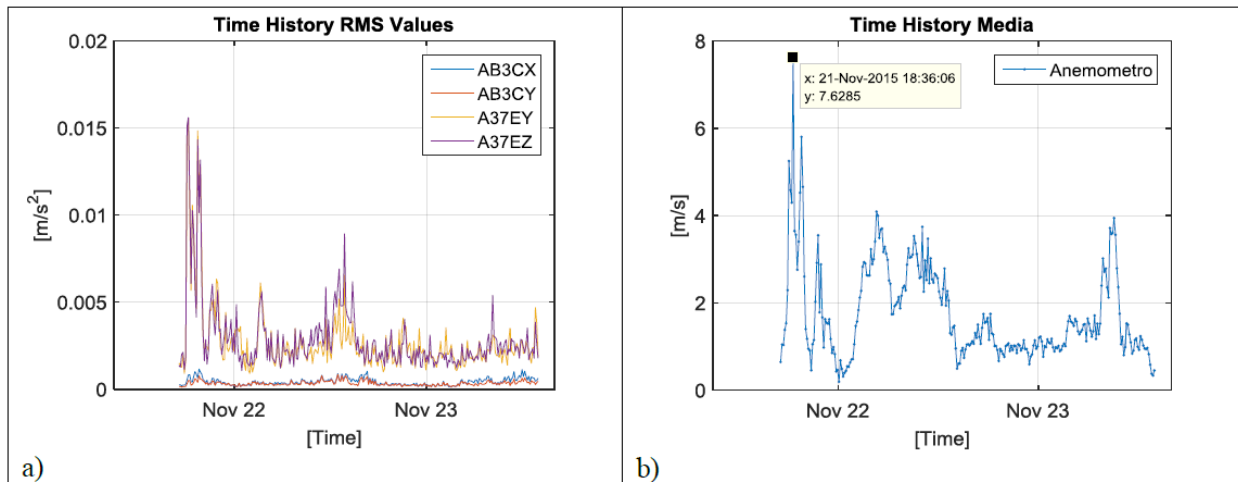


Figura 1.3 – Dia Ventoso, a) Acelerações do piso 37, b) Velocidade do vento.

Observou-se que as acelerações aumentam à medida que a velocidade do vento aumenta, mesmo que os níveis atingidos sejam muito abaixo dos limites de conforto.

Os primeiros resultados mostraram a capacidade do sistema para acompanhar o comportamento estático e dinâmico da construção, fornecendo uma base de dados válida para o monitoramento da integridade da estrutura. Além disso, o sistema provou ser capaz de pôr em evidência um certo número de acontecimentos não usuais ligados a terremotos que ocorreram longe do local da construção.

1.2.2 Dynamic monitoring and numerical modelling of communication towers with FBG based accelerometers - (Antunes, Travanca, Varum, & André, 2012)

Em 2011, Rui Travanca (Universidade de Aveiro) e sua equipe de investigação, realizaram ensaios de vibração baseados em acelerómetros de fibra de rede (FBG). Os objetos de análise foram duas torres de telecomunicação distintas, com aproximadamente 50 metros de altura cada, localizadas em Portugal. A primeira torre é formada por cinco módulos de aço com secção circular interligados por ligações aparafusadas, fixada a um bloco de fundação de 4,00 x 4,00 m e 2,25 m de profundidade. Já a segunda torre é composta por sete módulos em aço com secção hexadecagonal que variam em altura, interligados por ligações forçadas através de cabos pré-esforçados, fixada a um bloco de fundação de 3,30 x 3,30 m e 3,60 m de profundidade.

A utilização da tecnologia FGB possibilitou diversas vantagens, como :

- Baixo custo
- Imunidade a interferências eletromagnéticas

- Não interferem no funcionamento de antenas
- Possibilita a junção de diversos sensores em uma única fibra optica
- Cabos de ligação extremamente leves

Foram fixados dois sensores em cada ponto de medição de forma perpendicular, garantindo que cada sensor obtenha as acelerações em uma direção pré-definida. Neste caso em particular, os sensores foram fixados em suportes fixos e placas. Quando a fibra é esticada ou comprimida, o sensor FBG irá medir deformação. Isso ocorre devido a deformação da fibra ótica ocasionar uma variação da constante foto-elástica da fibra e uma mudança no período da microestrutura, o que resulta numa variação do comprimento de onda de Bragg (Bragg wavelength).

Impulsos mecânicos foram aplicados nas secções das entreturas durante a fase de obtenção de dados. Os dados foram recolhidos durante um periodo de 105 segundos através de um sistema de aquisição I-MON E-USB Interrogation Monitor Unit from Ibsen, a uma taxa de amostragem de 950 Hz. Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 1.4.

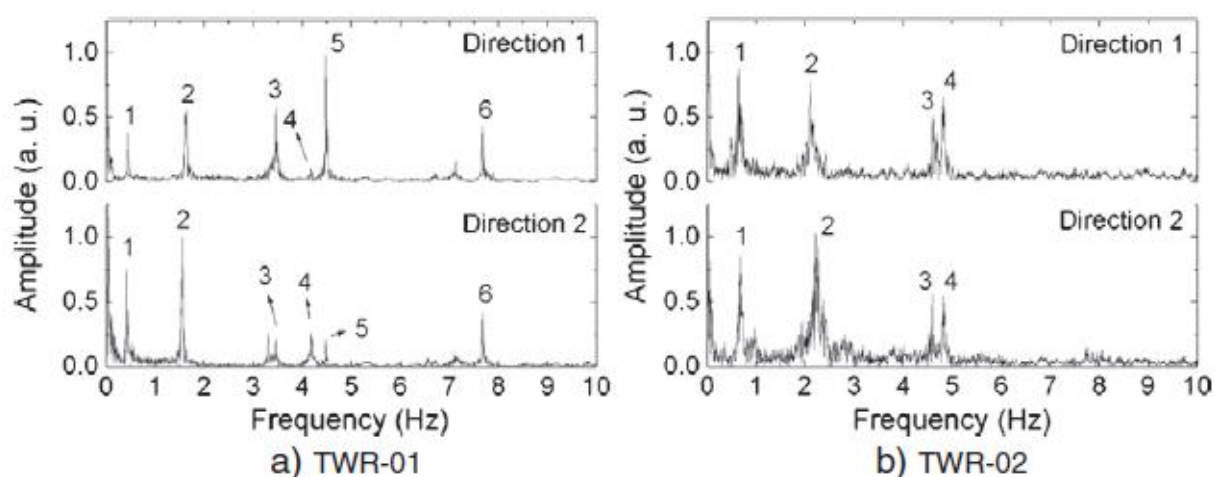


Figura 1.4 – Espectro de frequências (FFT).

Após o tratamento e processamento dos dados, obtiveram os principais modos de vibração das estruturas e suas respectivas frequências. Neste estudo, desenvolveram um modelo numérico usando o software SAP2000 e desconsideraram a interação entre solo-estrutura devido às incertezas nesta interação. Realizaram um levantamento preciso da distribuição de massas pela estrutura para as duas torres, garantindo uma análise mais refinada do comportamento. Os modos de vibração obtidos através do ensaio estão representados na Figura 1.5.



Figura 1.5 - Modos de vibração e respectivas frequências no modelo numérico.

Foi concluído que os valores experimentais e numéricos das frequências naturais das torres são consistentes principalmente nos primeiros modos de vibração que apresentaram erros relativos de aproximadamente 10%. Esses erros podem estar relacionados a diversos fatores, como por exemplo uma distribuição de massas divergente, uma perda de rigidez devido a conexões, degradação dos materiais existentes, entre outros fatores que dificultam a obtenção exata das frequências de vibração com o modelo numérico.

1.2.3 Response of tall buildings to weak long distance earthquakes - (Brownjohn & Pan, 2001)

Em meados do ano de 1994, James Mark William Brownjohn e Tso Chien Pan, iniciaram um estudo com o intuito de utilizar prédios de elevadas alturas como uma forma de sismógrafo para identificarem eventos sísmicos que ocorreram a milhares de quilômetros da localização dos edifícios e também para atualizar normas de dimensionamento á esforços laterais vigentes na época em Singapura.

Para isso, instrumentaram dois prédios distintos localizados em Singapura. O primeiro é composto por uma torre de 26 andares de apartamentos residenciais construída por volta de 1982 em betão armado convencional. O segundo (Republic Plaza) é formado por uma torre de 66 andares em betão armado com um sistema estrutural frame-tube e uma parede de núcleo interno ligado as colunas externas por um sistema horizontal de steel-framing, com outriggers estrategicamente posicionados para aumentar a rigidez do edifício.

Em torno de 1994, se iniciou o processo de instrumentação do primeiro edifício, onde foram instalados um par de acelerômetros QA-700 ao nível da torre de observação, um anemômetro tipo hélice no topo do edifício, um condicionador de sinais para os acelerômetros e um PC com um conversor analógico digital responsável por analisar e gravar os dados através do software de aquisição. O sistema foi projetado para adquirir nove ficheiros diários com uma taxa de amostragem de 4Hz, contendo acelerações, velocidade e direção do vento.

Após um período significativo de coleta de dados, por volta de 1997 o sistema de monitoramento foi transferido para o segundo edifício (Republic Plaza), onde recebeu melhorias como outro par de acelerômetros instalados nas caves e um novo conjunto de anemômetros tipo hélice instalados em faces opostas do edifício. Desde então, o sistema vem recebendo atualizações constantes a fim de melhorar os resultados, como uma ligação a rede telefônica para verificação do status e novos softwares de aquisição. A nova taxa de aquisição adotada é de 60Hz por canal.

A Figura 1.6, referente aos dados de setembro de 1999, mostra as acelerações modais no nível 65, confirmando a possibilidade de se captar eventos excepcionais ocorridos a grande distancias. Por exemplo, se verifica um único pico no dia 18 que provavelmente é devido a um terremoto Ms5.2, com epicentro localizado a 590 km do edifício. Há também picos incharacterísticos, tanto em A1 como em A2 em torno de duas horas no dia 21 de setembro que certamente corresponder ao terremoto Ji Ji (Taiwan).

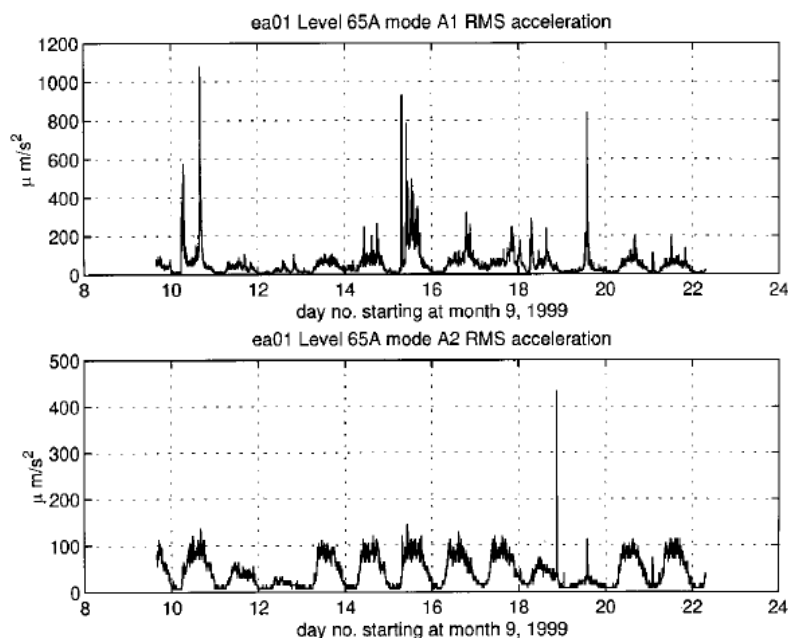


Figura 1.6 - - Modo A1 (superior) e modo A2 (inferior) a resposta de aceleração RMS em setembro de 1999.

Os pesquisadores concluíram que a instrumentação destes dois edifícios em Singapura forneceu dados limitados para o estudo, mas valiosos não só sobre as condições de vento e seus efeitos, mas também sobre os efeitos dos tremores de longa distância que atingem a cidade constantemente, sendo os dados uma diretriz para os projetos sísmicos de edifícios da região.

1.2.4 Dynamic investigation of tv towers - (Beirow & Osterrieder, 2001)

Com o intuito de verificar a viabilidade de uma mudança operacional através de um monitoramento da resposta estrutural, em abril de 1997, B. Beirow e P. Osterrieder instalaram um sistema de monitoramento contínuo na torre de telecomunicações Cottbus, na Alemanha. A torre possui uma altura de 137,86 metros de altura, composta por um fuste de betão armado e uma antena de aço no topo do mesmo.

O sistema de monitoramento é composto por dois geofones localizados na parte superior do fuste de betão e a medição da velocidade e direção do vento é realizada de forma independente a uma altura de 10 metros do chão por uma estação meteorológica. Através da Figura 1.7, podemos verificar a posição dos sensores na estrutura.

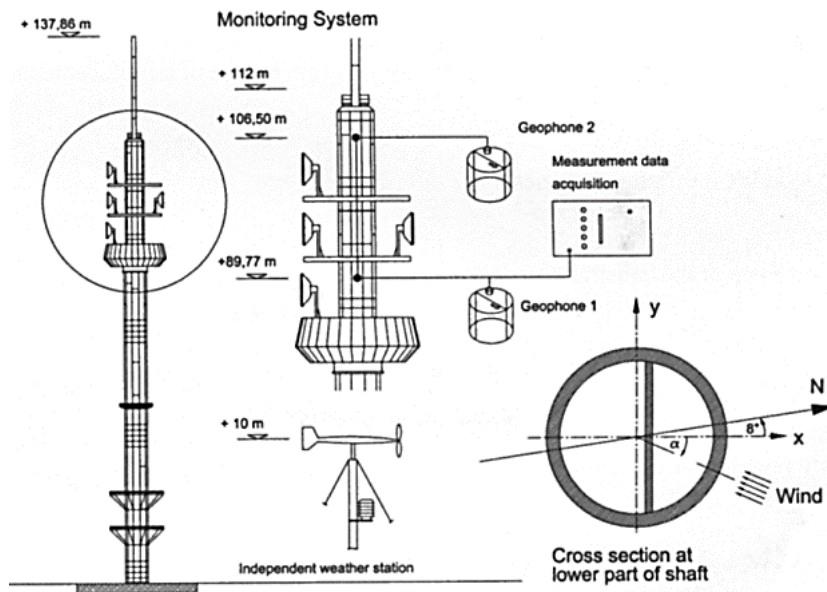


Figura 1.7 - Disposição do sistema de monitoramento da torre Cottbus.

Para refinar ainda mais o modelo numérico com o comportamento real da estrutura, também foi realizado neste estudo uma análise em túnel de vento de um protótipo. O modelo foi concebido levando em consideração os diversos arranjos de antenas possíveis para a determinação mais precisa do coeficiente

de arrasto. Na Figura 1.8, podemos verificar as diferentes combinações de antenas adotadas e sua influência no coeficiente de arrasto.

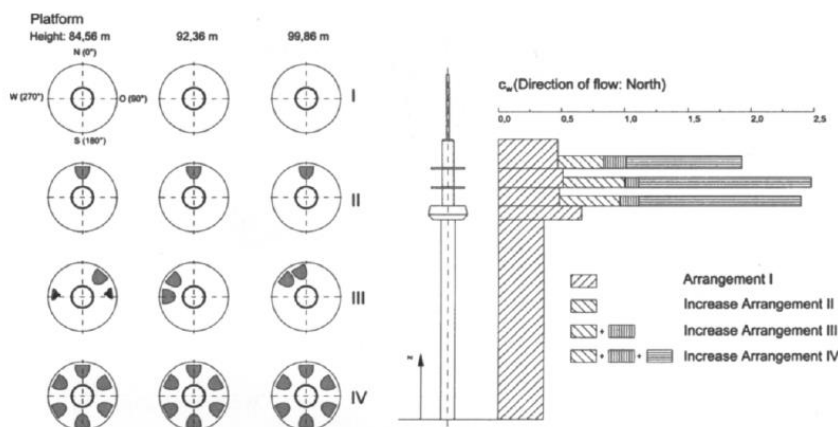


Figura 1.8 – Disposições de antenas investigadas e influencia no coeficiente de arrasto.

Nesse estudo, foi possível obter além de dados fundamentais para manutenção e modos de vibração da estrutura, dados valiosos para novas investigações científicas, como por exemplo a correlação entre vento e vibrações se utilizando de redes neurais, uma previsão confiável da vida da estrutura considerando a fadiga e a verificação de cargas de projetos e cálculos numéricos.

1.2.5 The Stuttgart TV Tower — displacement of the top caused by the effects of sun and wind - (Breuer, Chmielewski, Górski, Konopka, & Tarczyński, 2008).

Liderados pelo pesquisador Tadeusz Chmielewski, no ano de 1998, uma equipe de pesquisadores da Universidade de Tecnologia de Opole e da Universidade de Ciências Aplicadas, realizou um monitoramento contínuo na torre de TV Stuttgart, localizada em Stuttgart, Alemanha.

A Torre de TV em Stuttgart foi projetada e construída pelo Professor Fritz Leonhardt entre 1953-1955. Foi a primeira torre de televisão em todo o mundo, que foi construída como um tubo de betão. O eixo de betão tem 161 metros de altura, e o palito metálico fixado no topo do fuste é de aproximadamente 51 metros. O diâmetro do fuste de betão é de 10,8 metros na base, alcançando cerca de 5,04 metros no topo. Durante o período de concessão do projeto, se estimou o período fundamental da torre em 4,71 segundo considerando a base da torre fixa e 6 segundos se considerado a flexibilidade do solo sob a fundação.

O comportamento dinâmico da torre foi determinado em diversos períodos ao longo de sua vida útil usando-se técnicas de medição distintas. Em 1956, foi realizado um ensaio fixando um sensor Lemag-Seismo-Schwingschreibers na sala dos elevadores a uma altura de 155 metros, que conseguiu coletar dados do comportamento dinâmico sobre a acção do vento na direção Leste-Oeste. Três anos mais tarde,

CAPÍTULO 1

foi realizado um novo ensaio, adicionando mais um sensor Lemag- Seismo-Schwingschreibers a mesma cota, permitindo assim a captação dos dados nas duas direções principais.

Buscando metodologias mais precisas e atuais, em 1998, foi realizada a instrumentação da torre com um Sistema de Posicionamento Global (GPS). Utilizando equipamentos sofisticados com dois receptores de dupla frequência, foi possível rastrear os sinais de satélite a uma taxa de dados de 0,05 segundos. Para evitar problemas com bloqueio nos sinais, o sistema de monitoramento foi instalado em uma área mais aberta no extremo sul da estrutura, o mais afastado possível da parede da torre. O monitoramento através de GPS é mantido até os dias atuais, apenas sofrendo atualizações com equipamentos cada vez mais precisos.

Como podemos observar na Figura 1.2.5.1, um vento de Sudoeste com uma velocidade de cerca de 17m/s provocou um deslocamento Nordeste (componente estático) de cerca de 6 cm. A principal direção da vibração é em um ângulo reto com a direção do vento com um deslocamento de 9-14 cm (05 de julho de 2006).

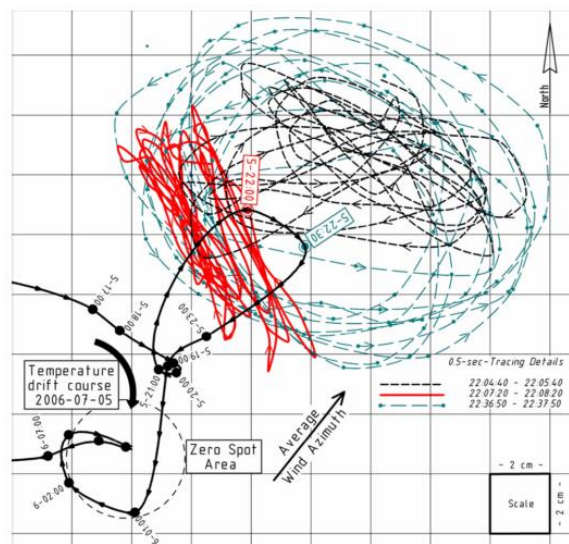


Figura 1.9 – Resposta dinâmica da estrutura gerada por uma tempestade de ventos e esboço da tração diária da estrutura devido a temperatura.

Através do monitoramento contínuo se concluiu que os principais deslocamentos da torre foram gerados por dois fatores. Os deslocamentos quase estáticos foram causados pela influência combinada de radiação solar e variação de temperatura diária do ar durante as diferentes estações do ano e as condições meteorológicas, e os deslocamentos dinâmicos foram causados pelo vento.

Este artigo descreveu os testes de campo realizados sobre a torre de TV Stuttgart para medir os deslocamentos no topo da torre causado pelo vento e pela influência combinada de radiação solar e variação diária de temperatura do ar durante as diferentes estações do ano e condições climáticas. Estes

testes apresentaram dados indicando que não houve qualquer deslocamento excessivo e nenhuma alteração na primeira frequência natural, uma vez que foi estimada experimentalmente em 1959. Assim, a Torre de TV de Stuttgart, após 50 anos de vida útil aparenta não ser danificada estruturalmente.

1.2.6 Theoretical and experimental modal analysis of the Guangzhou New TV Tower - (Chen et al., 2011).

A Torre de TV New Guangzhou em Guangzhou, China, é uma estrutura com secção transversal tubular com uma altura total de 600 m, sendo 454 metros em betão armado com uma estrutura em aço externa e um palito metálico de 146 metros. Desde sua concepção inicial, um complexo sistema de monitoramento da saúde estrutural da torre foi desenvolvido por Z.R. Lu e sua equipe de investigação, constituído por mais de 800 sensores, entre eles estações meteorológicas, anemômetros, teodolitos, sensores de nível, termômetros, GPS, acelerômetros, sismógrafos, sensores de corrosão, etc. Até o final de agosto de 2010, a torre foi concluída e todos os 16 tipos de sensores foram instalados.

Baseado em um conceito de design modular, o sistema de monitoramento é composto por seis módulos. Se trata de uma pratica pioneira no que se diz respeito a monitorização da saúde estrutural de edifícios, que integra um monitoramento em fase de construção e em fase de serviço.

Além de detecção de anomalias durante a construção, a instalação prévia dos sensores permite uma facilidade na implantação dos sensores e viabiliza a obtenção do histórico completo do comportamento estrutural. Também cabe salientar, que este tipo de monitoramento, viabiliza estudos mais aprofundados dos sistemas implementados nos edifícios, como por exemplo a validação de dispositivos de controle de vibração, através da análise de dados anteriores e posteriores a ativação dos mesmos. Na Figura 1.10, pode-se observar a geometria da estrutura em questão.



a) Torre de TV New Guangzhou



b) Modelo numérico da Torre de TV
New Guangzhou

Figura 1.10 - Design da Torre de TV New Guangzhou e modelo numérico.

O sistema de aquisição foi projetado para trabalhar a uma taxa de amostragem de 50Hz, e amplifica o sinal das acelerações em 1000 vezes para transmissão. Após a orientação de cada acelerômetro ser ajustada, os sensores foram fechados em uma caixa metálica a fim de se reduzir a interferência com ruídos.

Uma vez que o sistema de aquisição de dados é operado automaticamente e continuamente para adquirir dados de monitoramento, o sistema tem monitorado com sucesso as respostas de acelerações em diferentes etapas de construção, captando também durante este intervalo 2 tremores de terra (terremoto Hualien, Taiwan em 19 de Dezembro de 2009; e o terremoto Kaohsiung, Taiwan em 4 de Março de 2010) e 6 tufões (tufão Neoguri em 19 de abril 2008; tufão Kammuri em 6 de Agosto de 2008; tufão Nuri em 22 de Agosto de 2008; tufão Hagupit em 24 de Setembro de 2008; Molave tufão em 18 de Julho de 2009; e tufão Koppu em 15 de Setembro 2009). Estes dados de monitoramento são extremamente úteis para avaliar a integridade estrutural, segurança, facilidade de manutenção e confiabilidade.

O modelo numérico foi sendo construído simultaneamente a construção do edifício, o que possibilitou uma análise modal do edifício em diferentes etapas. Na Figura 1.11, é possível realizar uma comparação entre os resultados obtidos através do modelo numérico e os resultados do monitoramento contínuo.

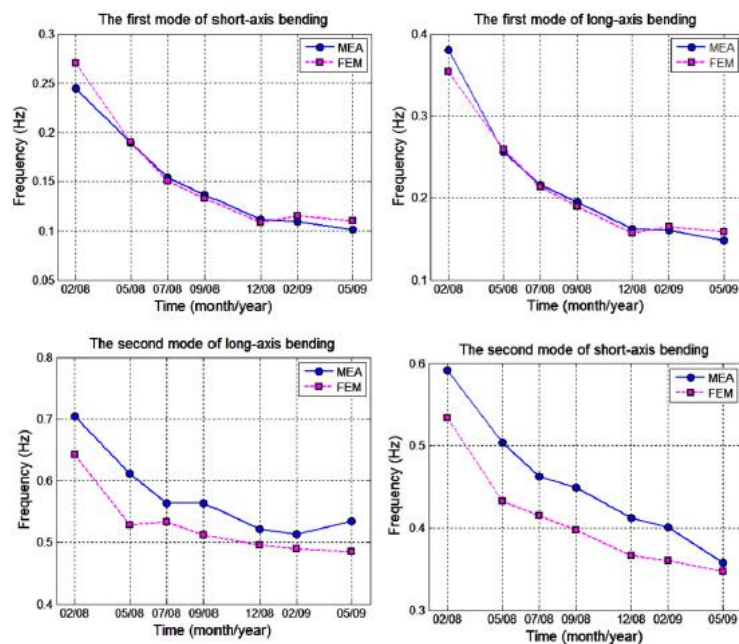


Figura 1.11 - Frequências naturais em diferentes estágios de construção.

A Figura 1.11 ilustra as frequências naturais dos quatro primeiros modos com o progresso da construção. Observou-se que as frequências naturais diminuem conjuntamente com o desenvolvimento da construção. Assim concluíram que a previsão do modelo e a medição de campo têm uma boa concordância particularmente nas frequências naturais dos dois primeiros modos. Isto verifica a confiabilidade e a precisão do modelo de design.

1.3 OBJETIVOS

Com o constante desenvolvimento dos recursos computacionais na área da engenharia civil, se tornou viável a análise de estruturas já existentes através de modelos numéricos computacionais, que geralmente se utilizam do método dos elementos finitos e conseguem reduzir de forma significativa os custos das intervenções.

Estes modelos têm se apresentado extremamente eficientes quando se diz respeito a reparação ou reabilitação de estruturas já existentes, levando em consideração que se corretamente ajustados, representam de forma aceitável os esforços aplicados na estrutura.

Um dos grandes problemas encontrados nestes modelos são a quantidade elevada de variáveis que interferem no comportamento de uma estrutura, como por exemplo os tipos de apoios, estruturas que auxiliam no contraventamento da estrutura, as propriedades dos materiais, a umidade, a velocidade e

CAPÍTULO 1

direção do vento no caso de edifícios altos, e como se tratam de modelos simplificados, podem apresentar alguma certa divergência entre o comportamento real da estrutura.

Para minimizar estas divergências, é possível ser realizado um refinamento do modelo numérico através de pequenos ajustes, mais especificamente através da correção de dados de projetos com dados experimentais obtidos na própria estrutura.

Neste cenário, através de uma parceria entre a Portugal Telecom e o Instituto Superior de Engenharia do Porto, se firmou uma parceria técnica para análise dinâmica da torre de telecomunicações do Monte da Virgem, em Vila Nova de Gaia. A torre Monte da Virgem, desde a sua entrada em operação e com alguma regularidade, tem registado um número significativo de eventos de vibração excessiva da sua estrutura, os quais são normalmente associados à atuação de regimes de ventos específicos. Essas vibrações geram um desgaste excessivo dos parafusos de ligação entre o fuste de betão armado e a torre metálica, que precisam ser constantemente substituídos.

Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo a análise experimental de uma torre de telecomunicações localizada em Vila Nova de Gaia, que servirá de base para a calibração de um modelo numérico já desenvolvido, possibilitando uma aproximação do modelo numérico ao que se é observado na própria estrutura. Esta calibração permitirá realizar uma avaliação mais real da estrutura, possibilitando o desenvolvimento de intervenções mais eficazes.

Também será objetivo deste trabalho a caracterização experimental do comportamento dinâmico da torre sob a acção do vento, que será feito através da instalação de um sistema permanente de monitorização da estrutura.

2 TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES DO MONTE DA VIRGEM

2.1 DESCRIÇÃO

A torre de telecomunicações do Monte da Virgem é uma torre de transmissão construída pela Portugal Telecom no ano de 1995. Este complexo de transmissão é dotado de um emissor TDT que difunde os sinais pertencentes à RTP, SIC e TVI. É também um ponto de recepção de sinais das delegações destes operadores de TV existentes na zona Norte do país. O Centro Emissor do Monte da Virgem comporta uma torre de 177 metros de altura, a mais alta estrutura do género existente em Portugal (ver Figura 2.1).

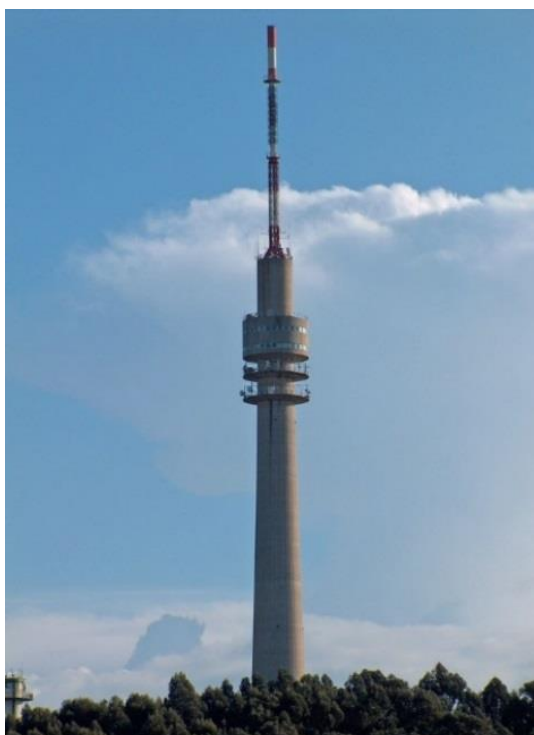


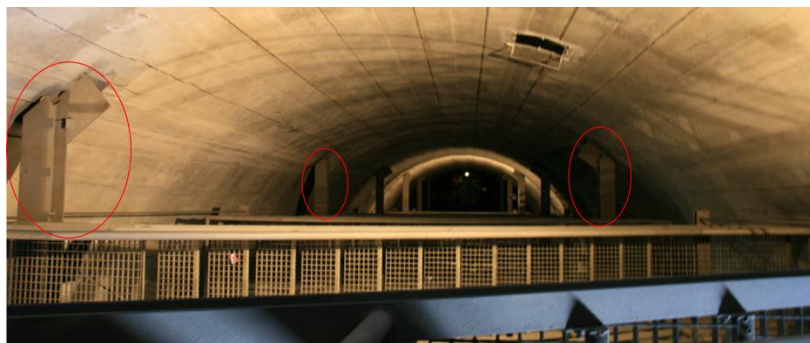
Figura 2.1 - Torre de telecomunicações do Monte da Virgem.

A estrutura da torre é composta por um fuste de betão armado com secção circular de 126 metros de altura, com um diâmetro variável de 14,3 metros na base até 7,7 metros no topo do fuste, medidos pela face exterior. A torre é dotada de 5 pisos localizados entre 94,9 metros e 112 metros de altura a partir da base, sendo que dois dos pisos em questão são cobertos.

Todos os pisos são constituídos por uma laje de betão armado em consola. Os dois pisos cobertos possuem fachadas exteriores e são onde se encontram instalados os equipamentos de telecomunicações.

Os demais pisos possuem um guarda-corpos em seu contorno e recebem estruturas que dão suporte as antenas. Todos os pisos permitem o acesso e circulação de pessoas autorizadas.

No interior do fuste, se nota a presença de uma estrutura metálica compostas por perfis HEA apoiados em consolas metálicas fixadas nas paredes, dando suporte as escadas, suporte a caixa do elevador e contraventando as paredes da estrutura, como pode ser observado na Figura 2.2.



a) Vista superior do interior do fuste de betão.



b) Consola para fixação do perfil HEA.

Figura 2.2 – Estrutura metálica de suporte.

Acima do fuste, existe uma estrutura metálica com barras reticuladas, formando uma torre, que suporta antenas e outros equipamentos de comunicação. A torre metálica é do tipo base octogonal e encontra-se apoiada por 8 montantes.

No total, a torre metálica tem 51 metros de altura e é constituída por 2 troços cuja continuidade se dá por ligações aparafusadas dos prumos. Os prumos são constituídos por perfis tipo H e encontram-se travados por diagonais em U. A seguir na Figura 2.3, pode-se observar imagens do palito metálico.



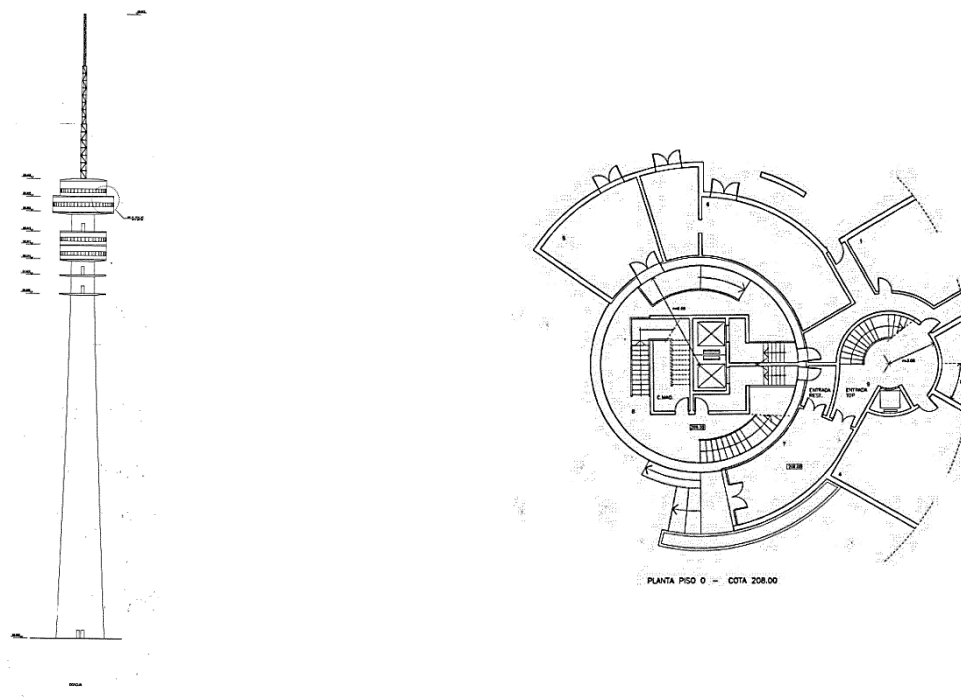
a) Vista inferior do palito metálico.



b) Fixação do palito metálico ao fuste de betão.

Figura 2.3 – Pormenores da torre metálica

A cota de referência do projeto é a cota 208, localizada imediatamente acima do bloco de fundação. Inicialmente era previsto a construção de mais dois pisos entre as cotas 325,2 e 329,35, destinados a um restaurante e uma cozinha, como se pode observar na Figura 2.4. Entretanto, por motivos não divulgados se optou pela não execução dos mesmos na época.



a) Vista poente da torre do Monte da Virgem.

b) Planta baixa do pavimento térreo.

Figura 2.4 - Projetos arquitetônicos iniciais da torre Monte da Virgem.

Atualmente, estão se levantando questões sobre a viabilidade de implementação de um restaurante panorâmico no topo do fuste de betão armado como previsto em projeto inicialmente, transformando a estrutura em um marco turístico da cidade do Porto, mas até o momento não se foi iniciado nenhum estudo neste sentido.

2.2 MODELO NUMÉRICO

Para o projeto de novas obras da construção civil é necessário a consideração do efeito dinâmico das ações, a garantia de frequências naturais de vibração mínimas para a estrutura e a obediência a limites máximos de velocidade e aceleração. No caso da verificação de uma construção já existente, enfrentam-se primeiramente, antes mesmo da fase de análise propriamente dita, dificuldades na elaboração do modelo numérico da estrutura que seja condizente com o comportamento real, passando pelo processo de identificação estrutural, de calibração do modelo propriamente dita, de determinação dos danos

localizados e generalizados, e de estabelecimento das reais condições de vinculação dos elementos estruturais.

Em uma fase inicial desta parceria técnica, foi desenvolvido pelo engenheiro Bruno Daniel de Castro Oliveira, um modelo numérico no qual tentou-se representar da forma mais realista possível a estrutura, representado na Figura 2.5. Para a modelagem numérica foi utilizado o software de análise estrutural Robot Structural Analysis, da Autodesk.

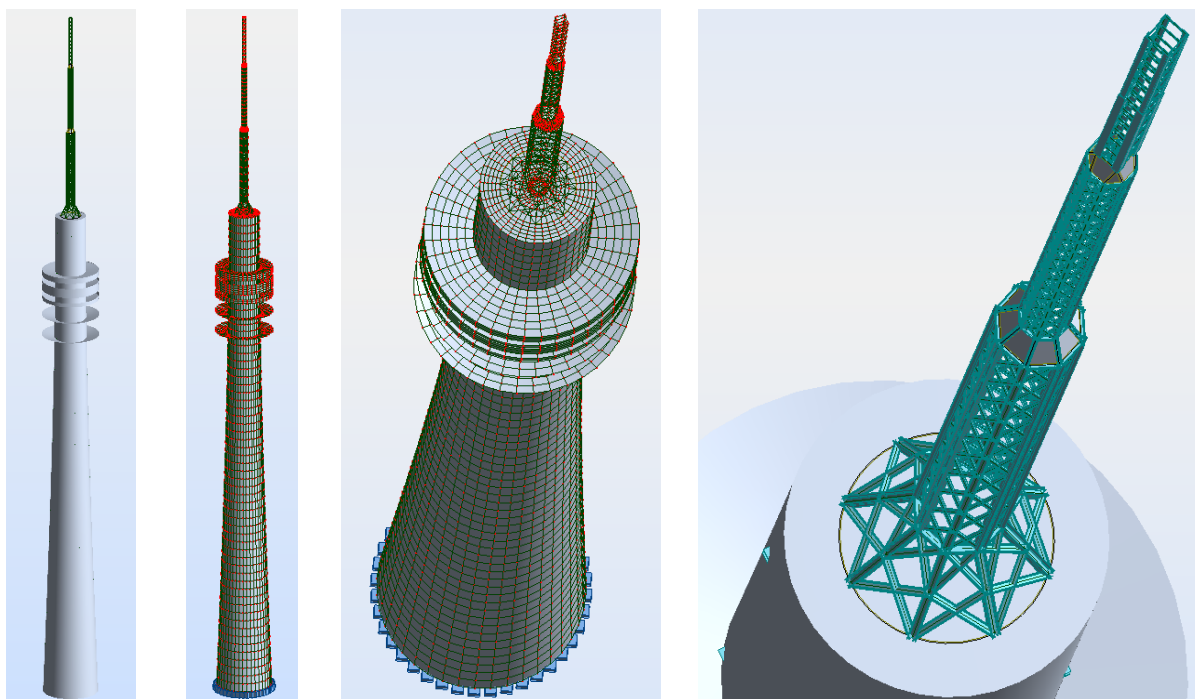


Figura 2.5 - Modelo numérico em elementos finitos da Torre Monte da Virgem.

Para a elaboração do modelo numérico, inicialmente foram utilizados os projetos reais da torre fornecidos pela PT Telecom e todas as secções dos elementos construtivos e materiais foram respeitados. Em relação as ligações da superestrutura com a fundação, foi desconsiderado o comportamento do solo e possíveis recalques da fundação e considerado um encastramento total ao longo de toda a base.

Ao decorrer do trabalho se constatou que haviam divergências entre o apresentado nos projetos e o que realmente foi executado, como por exemplo o fuste de betão, que em projeto constava possuir uma altura de 126 m e na prática foram obtidas medidas de aproximadamente 126,77 metros de altura, representando assim uma variação 0,6%. Esta variação representa uma diferença significativa nas frequências naturais da torre e conseqüentemente na localização dos pontos nodais. Como o objetivo do modelo numérico era se aproximar o mais fielmente possível da estrutura real, se optou pela utilização das dimensões aferidas na prática ao invés das que constavam em projeto.

Outra divergência constatada diz respeito a locação da escadaria e do foço do elevador ao longo do fuste de betão. Entretanto, como estes elementos não oferecem grande influência na rigidez da estrutura de uma forma geral, foram desconsiderados no modelo.

Em uma análise mais aprofundada, foram levantadas questões sobre a estrutura secundária de apoio das escadarias, que poderiam influenciar na rigidez da estrutura devido ao contraventamento das paredes. Desta forma, se optou pela modelagem da estrutura secundária no modelo numérico. A estrutura é basicamente constituída por perfis metálicos HEA de diferentes dimensões ao longo da altura, como descrito anteriormente. Na modelagem se considerou a ligação dos perfis metálicos ao fuste de betão através de um encastramento, a viga da estrutura secundária de apoio das escadas pode ser observada na Figura 2.6.

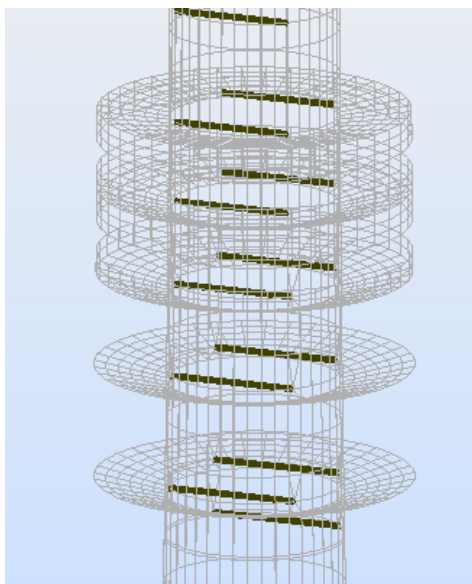


Figura 2.6 - Estrutura de suporte da escadaria metálica.

As paredes do fuste de betão foram modeladas em elementos finitos tipo casca. As paredes foram divididas em 20 módulos, cada módulo representado por um painel circular de aproximadamente 6,34 metros de altura. Os módulos possuem espessuras de painéis diferentes, variando de 0,4 metros no módulo da base até 0,3 metros no módulo do topo. Em todos os módulos foi admitido betão C25/30 com módulo de elasticidade longitudinal de 31 GPa. A título de ilustração, a Figura 2.7 mostra um módulo do fuste de betão. A junção de 20 módulos semelhantes ao mostrado na figura formam o fuste de betão.

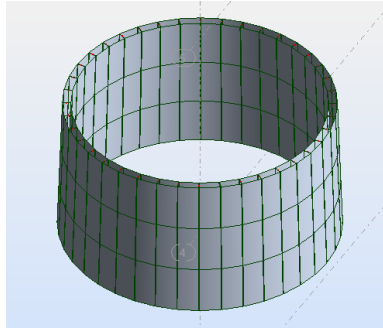
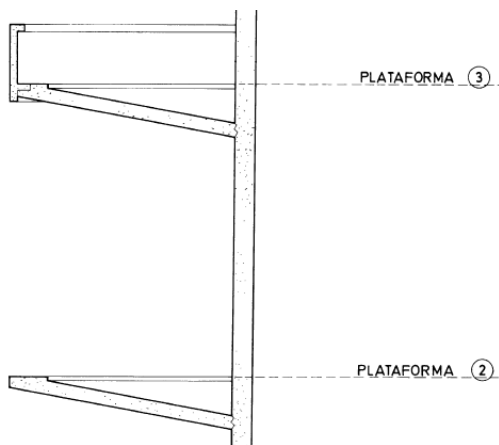
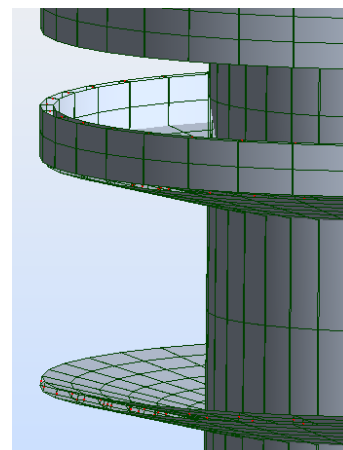


Figura 2.7 – Módulo 4 do fuste de betão.

Para os pisos elevados, foi realizada apenas a modelagem da laje principal em um único elemento do tipo casca e se desconsiderou o peso da regularização, foi admitida uma espessura de 0,18 metros para as lajes. Nos pisos fechados, se adicionou um elemento do tipo casca na vertical com espessura de 0,25 metros representando as paredes de vedação, como pode ser observado na Figura 2.8. Em ambos os elementos se utilizou um betão C35/45 com módulo de elasticidade longitudinal de 34 GPa.



a) Corte pelo eixo do fuste na zona das plataformas.



b) Modelagem das plataformas no modelo estrutural.

Figura 2.8 – Modelagem das plataformas elevadas.

O topo do fuste de betão, por receber todos os esforços provenientes do palito metálico e garantir a correta ligação entre as estruturas, foi dimensionado em duas espessuras distintas. A partir da face exterior das paredes até 1,92 metros em direção ao centro, temos uma laje com 1,20 metros de espessura, que suportará os apoios da torre metálica, e a parte central, como não receberá cargas consideráveis é constituída por uma laje de 0,20 metros de espessura. A modelagem também foi realizada através de elementos de casca e a ligação entre os perfis metálicos e a laje foi considerada como encastramento.

Em geral, o modelo numérico é composto por 5618 nós, 702 barras e 49 painéis. O método utilizado para a criação da malha de elementos finitos foi do tipo coons, e foi definida um tamanho de malha de 5x5, recomendando a utilização de quadriláteros de 4 nós.

2.3 PARÂMETROS MODAIS

Através do modelo elaborado, foi realizada uma análise modal prévia da estrutura. Para determinação dos modos de vibração que contribuam significativamente para a resposta global da estrutura, se utilizou da normativa NP EN 1998-1, 2010, secção 4.3.3.3.1 que afirma que para uma análise modal por espectro de respostas, a soma das massas modais efectivas dos modos considerados devem ser iguais ou superiores a 90 % e que devem ser considerados todos os modos com massa modal superior a 5% da massa total da estrutura.

Por se tratar de uma estrutura muito complexa, composta por materiais distintos, após uma análise inicial se constatou que seria necessário a consideração de 66 modos de vibração distintos para cumprir o estabelecido em norma nas duas direções. Sendo assim, para cumprir os requisitos propostos neste trabalho e simplificar os métodos de análise, se optou por trabalhar apenas com os 4 primeiros modos de vibração que mobilizam uma parte mais significativa da massa. Os quatro modos em questão podem ser vistos na Figura 2.9.

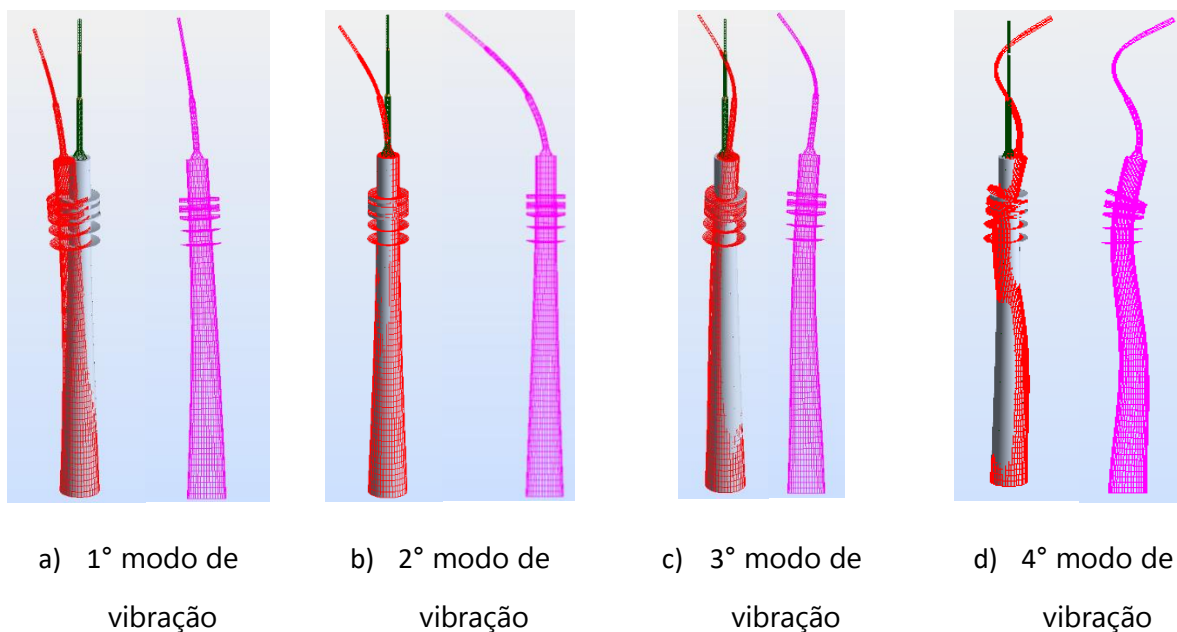


Figura 2.9 – Modos de vibração na direção X usado no estudo.

Como a torre possui uma arquitetura duplamente simétrica, os modos de vibração nas duas direções são idênticos. Para efeito de estudo, foi admitido os modos de vibração na direção X. As massas deslocadas por cada modo, as respectivas frequências e períodos podem ser vistas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Parâmetros modais estudados.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)	Massa deslocada na direção X (%)
1	0,4921	2,0320	49,0606
2	0,8967	1,1152	2,4691
3	2,4565	0,4071	17,5030
4	5,8070	0,1722	8,6606

Para as análises modais acima discriminadas, se considerou um coeficiente de amortecimento de 5% para a estrutura.

3 ENSAIO DE VIBRAÇÃO AMBIENTAL DA TORRE DO MONTE DA VIRGEM

3.1 DESCRIÇÃO

A identificação modal de estruturas com base na realização de ensaios de vibração ambiental tem ganho espaço ao longo dos últimos anos, possibilitando uma estimativa dos parâmetros dinâmicos mais representativos da estrutura.


A seleção adequada do equipamento de medição é essencial para garantir a veracidade dos resultados. Para a captação de acelerações, são utilizados sensores aos quais se dão o nome de transdutores de vibração mecânica. Existem diversos tipos de sensores, sendo o acelerómetro o mais utilizado devido à sua grande versatilidade.

Sendo assim, para a identificação experimental dos principais modos de vibração da estrutura em questão, se realizou um ensaio de vibração ambiental na torre do Monte da Virgem. A medição da resposta dinâmica da estrutura a ações de carácter ambiental foram efetuadas com recurso a dois sismógrafos, munidos de acelerómetros tri-axiais de tipo “force-balance”.

Sismógrafos são equipamentos que possuem um acelerómetro tri-axial capaz de medir a aceleração em três eixos distintos. A gama de medição pode ser regulada conforme o tipo de estudo realizado e seu sistema já realiza a conversão do sinal analógico dos sensores em um sinal digital, não sendo necessário a utilização de conversores A/D.

O ensaio foi realizado no dia 18 de abril de 2016, e para sua realização foram utilizados dois sismógrafos GeoSIG GMS Plus + novos e devidamente calibrados. Estes sismógrafos possuem um sistema de rede Wifi, o que possibilita a interação entre diversos sismógrafos simultaneamente, e também um sistema de sincronização por GPS, que permite a atualização da base temporal em tempo real. Algumas das especificações do sismógrafo em questão podem ser observadas na Tabela 3.1 a seguir.

Tabela 3.1 – Sismógrafo GeoSIG GMS Plus+

AC-73 Force Balance Accelerometer						
	Fabricante	Sensibilidade	Faixa de medição	Saída	Frequência	Alimentação
	GeoSIG	2.5 a 20 V/g	$\pm 0.5 \text{ g}$, $\pm 1 \text{ g}$, $\pm 2 \text{ g}$, $\pm 3 \text{ g}$ e $\pm 4 \text{ g}$	20 VPP (Diferencial)	200 Hz DC	9,5 a 18 V DC

Além das vantagens abordadas anteriormente, estes sismógrafos contam com uma extensão para os sensores separadamente do sistema de processamento, o que reduz significativamente o tamanho do compartimento de proteção dos sensores e também o peso do mesmo, possibilitando assim a experimentação de lugares de difícil acesso ou com espaços reduzidos.

Os ensaios ambientais com sismógrafos são realizados recorrendo a diferentes disposições dos sismógrafos sobre a estrutura (“setups”). Em cada “setup”, um dos sismógrafos é posicionado de forma fixa sobre um ponto de referência, enquanto os restantes funcionam como sensores móveis, sendo sucessivamente colocados ao longo dos restantes pontos de medida.

Devido as condições de acesso e disposições arquitetônicas das estruturas no interior do fuste de betão, o acesso as paredes da estrutura não eram garantidos em diferentes alturas, inviabilizando a colocação dos sismógrafos diretamente no elemento estrutural. Após um levantamento, se concluiu que os perfis HEA de suporte das escadas ligados as paredes representavam um bom indicador dos deslocamentos da estrutura. Desta forma, se optou pela realização das medições na parte superior dos perfis metálicos ao lado das escadarias, o que garantiria fácil acesso em diferentes níveis ao longo do fuste de betão e garantiria resultados aceitáveis, como pode ser notado na Figura 3.1.



Figura 3.1 – Sismógrafo móvel.

Para realização do ensaio, foi utilizado um sismógrafo móvel com um extensor para os sensores, como pode ser observado na imagem acima para garantir o acesso ao topo dos perfis e evitar acidentes como a queda do equipamento, e um sismógrafo fixo com sensor interno localizado na cota 312 metros.

Com o intuito de representar fielmente as acelerações da estrutura nos dois sismógrafos simultaneamente e em diferentes cotas, foi necessário a realização de uma sincronização dos mesmos para garantir que trabalhavam na mesma base temporal.

O distanciamento dos sismógrafos em determinadas cotas de análise e a ausência de sinais GPS no interior do fuste de betão inviabilizavam a utilização destas técnicas de sincronização. Sendo assim foi necessário o desenvolvimento de uma nova técnica que garantisse a simultaneidade temporal dos dois equipamentos.

Através de uma consulta aos fornecedores do equipamento, se constatou que após uma sincronização da base temporal dos equipamentos por GPS e uma posterior remoção do sensor GPS, as bases temporais só começariam a apresentar divergências após semanas de utilização. Como o ensaio tem duração de apenas um dia, essas divergências não influenciariam os resultados. Diante disso, no dia anterior a realização do ensaio, os sensores GPS dos sismógrafos foram instalados e colocados a céu aberto, e após alguns minutos de sincronização, se observou através de um computador ligado aos sismógrafos que o relógio interno dos dois equipamentos trabalhavam exatamente iguais. Isso garantiria que as acelerações captadas pelos sismógrafos fossem referentes ao mesmo instante de tempo. O sensor GPS (módulo branco) pode ser visualizado na Figura 3.2.

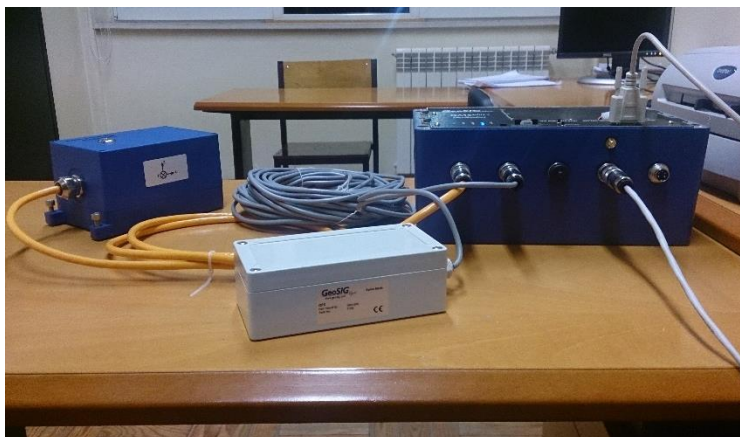


Figura 3.2 – Sincronização de base temporal com sensor GPS.

Com as bases temporais internas de cada equipamento sincronizadas, era necessário garantir que cada setup começasse exatamente no mesmo tempo. Para isso, foram estabelecidos triggers que foram pré-definidos antes de cada setup e estabeleciam o horário exato em que os dois sismógrafos começariam a realizar as leituras.

Apesar dos sismógrafos trabalharem de forma autônoma e não necessitarem de um computador para entrarem em execução, para a visualização das frequências de vibração em tempo real e definição dos triggers, se utilizou de um notebook conectado a cada equipamento e do programa de análise GeoDAS. O plano de ensaio pode ser verificado na Figura 3.3.

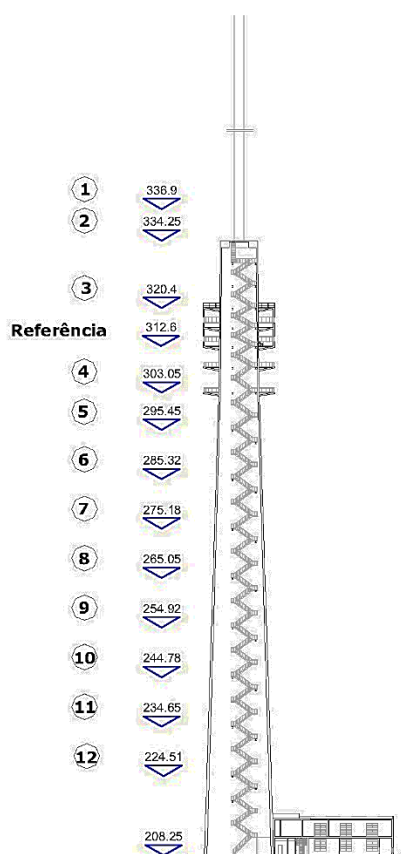


Figura 3.3 – Plano de ensaio de vibração ambiental.

Devido aos altos níveis de radiação emitidos por antenas de transmissão, não é possível a realização do ensaio de vibração ambiental em patamares muito elevados do palito metálico. Para tentar caracterizar a contribuição do palito metálico nos modos de vibração do fuste de betão, foi realizado uma única medição a uma altura de 2,65 metros acima do topo do fuste.

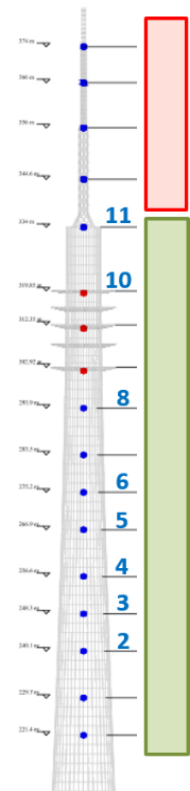
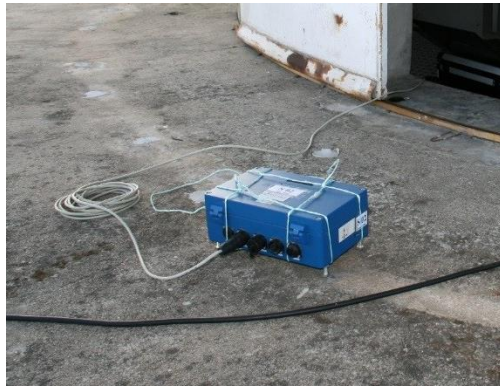
Para a realização do ensaio, se adotou a cota 312,6 referente ao primeiro piso fechado da estrutura para a fixação do sismógrafo fixo, e outras 12 cotas de referência como pode ser observado na imagem acima para a medição do sismógrafo móvel alinhadas verticalmente. Cada setup é composto por uma medição do sismógrafo de referência e uma medição do sismógrafo móvel. O tempo de medição de cada setup foi de 8 minutos a uma taxa de aquisição de 200 Hz.

Durante os períodos de aquisição de dados, se manteve o cuidado de não transitar pelas escadarias metálicas e em não utilizar o elevador, visto que como estão diretamente ligados aos perfis HEA onde estavam fixos os sensores, poderiam gerar ruídos indesejados. Outro cuidado que se levou em consideração foi o nivelamento dos sensores e a adoção do mesmo sistema de eixo para todos os setups.

3.2 ENSAIOS ANTERIORES

Anteriormente a este trabalho, um ensaio de vibração ambiental foi realizado na estrutura de estudo em questão, com o mesmo objetivo. O ensaio procedeu da mesma forma que mencionada anteriormente, alinhando diferentes sismógrafos sobre o mesmo eixo.

Para realização deste ensaio, foram utilizados um par de sismógrafos GeoSIG de uma versão ultrapassada, que não possuíam a extensão para os sensores nem a possibilidade de conexão Wifi, e cuja calibração não estava condizente devido ao grande intervalo de tempo da última atualização, podendo gerar dados inconsistentes. Algumas imagens tiradas durante a realização do ensaio podem ser verificadas na Figura 3.4.



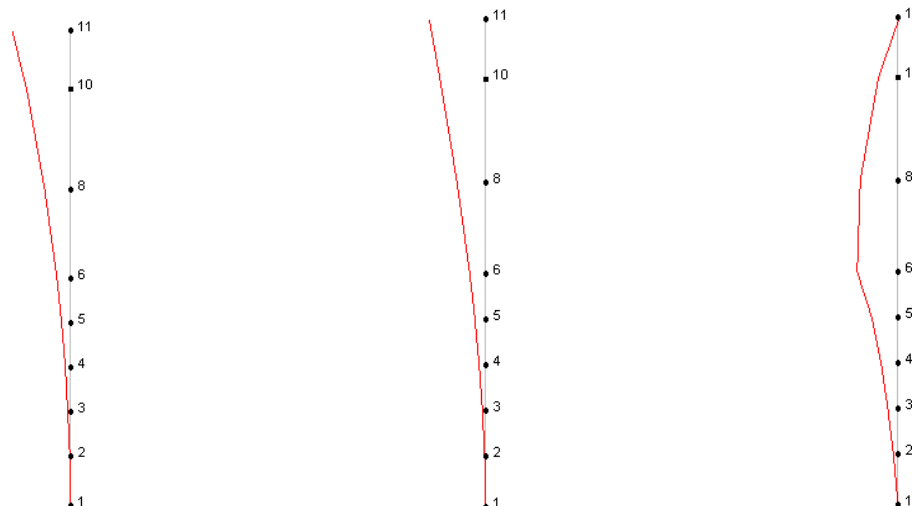
a) Sismógrafo móvel.

b) Sismógrafo fixo.

c) Plano de ensaio.

Figura 3.4 – Posicionamento dos sismógrafos para ensaio de vibração ambiental.

Inicialmente o ensaio obteve 13 medições em diferentes posições em altura, porem após uma análise, foram descartados dois valores por apresentarem dados inconsistentes. Com os dados obtidos, foi possível através do programa ARTEMIS Extractor, se definir os modos fundamentais de vibração da estrutura como pode ser observado na Figura 3.5.



a) Modo 1 | $f_1 = 0,475$ Hz

b) Modo 2 | $f_2 = 0,702$ Hz

c) Modo 3 | $f_3 = 2,346$ Hz

$$\xi = 4,32\% \pm 0,28$$

$$\xi = 2,26\% \pm 0,09$$

$$d) \xi = 0,95\% \pm 0,43$$

Figura 3.5 - Modos de vibração da estrutura obtidos através de ensaio de vibração ambiental.

Devido à baixa quantidade de pontos analisados e a inconsistência de alguns dados, se viu necessário a repetição do ensaio para obter dados mais concretos para a calibração do modelo numérico.

Além do ensaio ambiental, empresas particulares já realizaram outros ensaios na torre em questão, como por exemplo uma análise em túnel de vento de um modelo do palito metálico, uma análise dos parafusos de fixação do palito metálico ao fuste e ensaios das propriedades do betão. Todos os ensaios realizados anteriormente a torre foram levados em consideração no momento de concepção do modelo numérico.

3.3 IDENTIFICAÇÃO DE FREQUÊNCIAS E MODOS DE VIBRAÇÃO

Como mencionado anteriormente, a definição dos triggers foi realizada através do software GeoDAS v2.27, como também a gravação dos dados. Os setups foram gravados em ficheiros .msd específicos para GeoDAS e como a compilação e interpretação dos dados foi realizada através do software ARTeMIS Extractor 5.3 que realiza a leitura apenas de arquivos .asc, foi necessário o desenvolvimento de ferramentas que realizassem esta conversão.

Para simplificar a análise dos dados, se optou pela separação das acelerações nos eixos principais definidos pelo sismógrafo e a análise de cada eixo separadamente, sendo que o eixo Z referente ao eixo vertical da torre foi descartado nesta fase do estudo.

O software GeoDAS oferece uma ferramenta que possibilita salvar os valores das leituras das acelerações em um ficheiro .txt e também fornece a opção de salvar os valores dos três eixos medidos em um único

ficheiro ou separadamente. Desta forma, como a análise decorreria de uma forma individual para cada eixo, se optou pela separação dos dados gerando um ficheiro de texto para o eixo X e um para o eixo Y.

Em seguida, foi desenvolvida uma rotina através do programa Matlab 2015 que realiza a leitura dos ficheiros de texto, retira linhas e colunas indesejadas do arquivo, plota os gráficos das acelerações em função do tempo, fornece uma opção para decimação do sinal caso necessário e ao final salva os dados em um ficheiro do tipo .asc. Neste ensaio se optou pela utilização do sinal original sem decimação.

Existem diversas técnicas de análise modal e dentre elas está inserida a Frequency Domain Decomposition (FDD). A ideia da técnica FDD é realizar uma decomposição aproximada da resposta do sistema em um conjunto de um único grau de liberdade independente para cada modo de vibração. A decomposição é executada simplesmente pela decomposição de cada uma das matrizes de densidade espectral estimada. Segundo (Brincker, Xiang, & Andersen, 2000), os valores singulares são estimativas da densidade espectral automática dos sistemas SDOF em coordenadas modais, e na vizinhança do pico de ressonância os vectores singulares são estimativas dos modos de vibração do modo.

Também existem duas variantes desta técnica, o Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD) que utiliza a transformação no domínio do tempo para derivação da frequência natural e amortecimento e a Curve Fit frequency Domain Decomposition (CFDD) que utiliza uma SDOF no domínio da frequência para ajustar e obter as frequências naturais e o amortecimento.

Neste trabalho se optou pela utilização do método EFDD, pois além de ter demonstrado uma boa precisão na obtenção das frequências naturais, também nos fornece o coeficiente de amortecimento da estrutura.

Após uma análise prévia dos dados e modos de vibração, se notou uma inconsistência nos dados do setup 3. Desta forma, se optou por desconsiderar os dados da medição do setup na análise modal da estrutura. Na Figura 3.6, podemos observar a seleção dos picos no espectro de densidade.

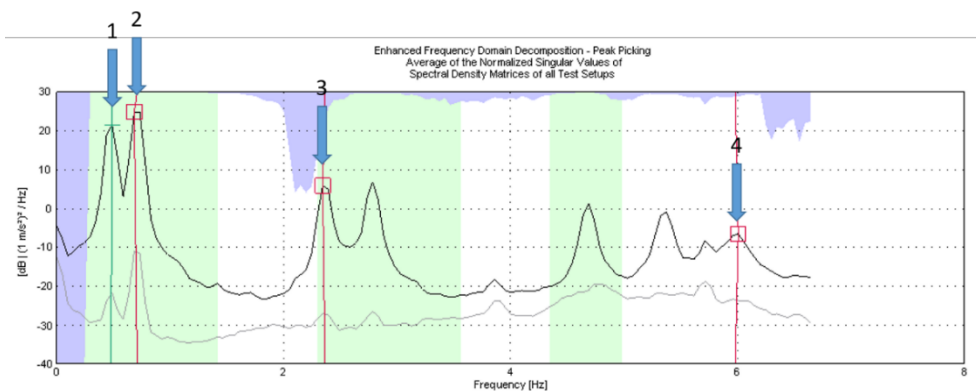


Figura 3.6 – Espectro de densidade de potência na direção X.

ENSAIO DE VIBRAÇÃO AMBIENTAL DA TORRE DO MONTE DA VIRGEM

Os modos de vibração na direção X podem ser observados na Figura 3.7, como também as frequências e os coeficientes de amortecimento de cada modo.

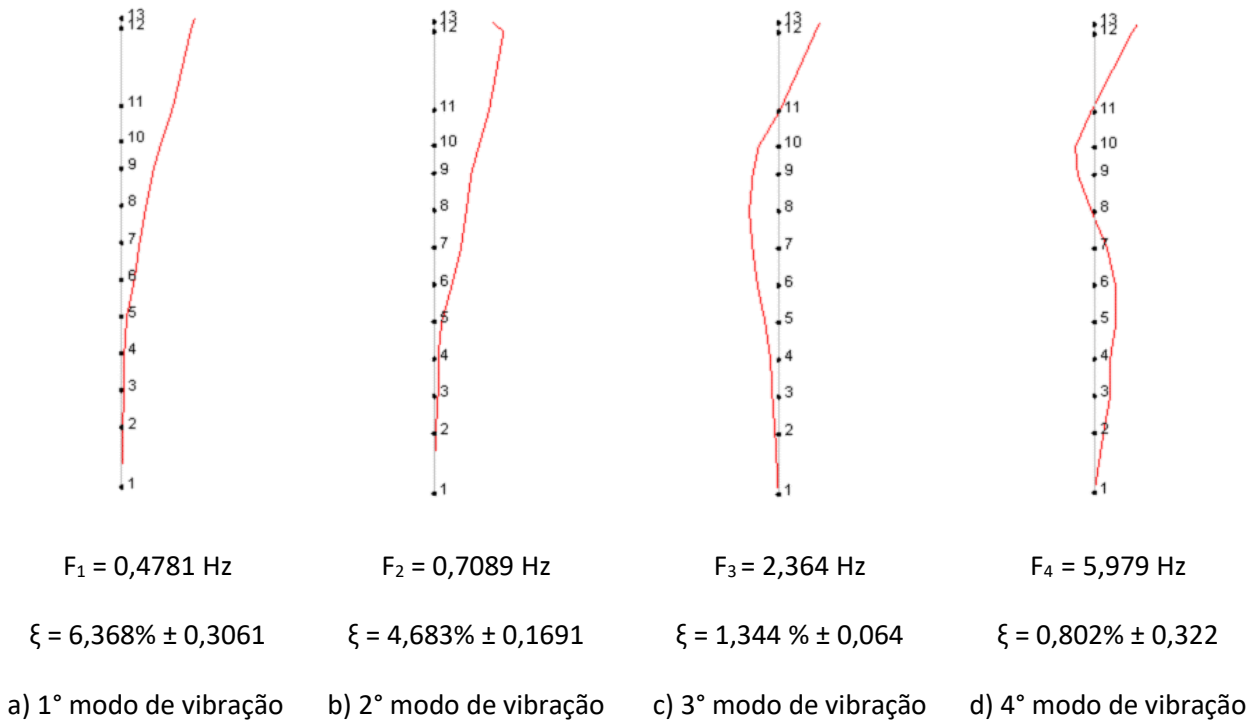


Figura 3.7 – Modos de vibração da estrutura na direção X.

Também se realizou uma análise dos modos de vibração na direção Y. O que se pode observar através dos resultados, foi que as medições realizadas na direção Y apresentam um nível menor de estímulos ambientais, tornando mais difícil a determinação dos modos. Com isso concluímos que durante a realização do ensaio, os deslocamentos preponderantes da estrutura se realizavam na direção X, representada pelo eixos Norte-Sul. Na Figura 3.8 podemos observar a análise EFDD realizada.

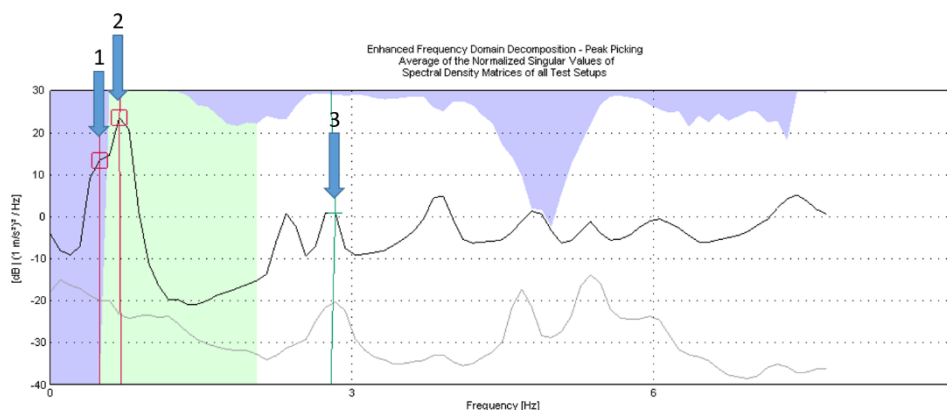


Figura 3.8 - Espectro de densidade de potência na direção Y.

Devido à baixa qualidade dos dados obtidos nesta direção, pode-se notar que se foi possível obter apenas três modos bem definidos, cujos modos de vibração podem ser observados na Figura 3.9.

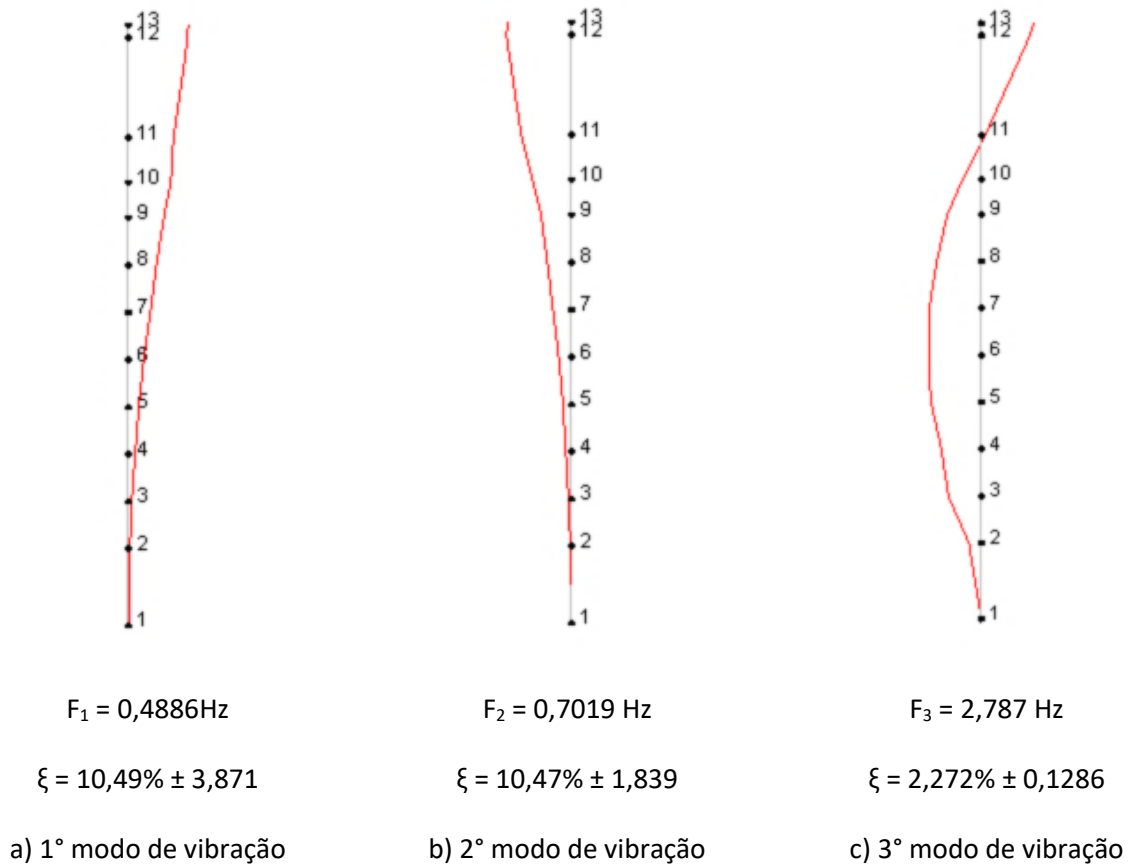


Figura 3.9 - Modos de vibração da estrutura na direção Y.

3.4 COMPARAÇÃO ENTRE MODELO NUMÉRICO E DADOS EXPERIMENTAIS

Um dos objetivos do presente trabalho é fornecer os dados necessários para uma posterior calibração do modelo numérico através de um algoritmo genético. Através do ensaio de vibração ambiental, foi possível a obtenção de dados para este efeito como também para diversos estudos que poderão ser desenvolvidos relacionados ao comportamento dinâmico de torres elevadas.

Com o intuito de uma validação inicial dos modos de vibração experimentais, foi realizada uma comparação entre os modos obtidos através do ensaio e os modos obtidos através do modelo numérico. Para isto, foi utilizado um indicador estatístico conhecido como Modal Assurance Criterion (MAC).

Segundo (Pastor & Binda, 2012), o parâmetro MAC é um indicador estatístico que é mais sensível a grandes diferenças e relativamente insensível a pequenas diferenças nos modos de vibração. Isso produz um bom indicador estatístico e um grau de coerência entre modos de vibração. O MAC considera apenas formas modais, o que significa que uma comparação de frequência deve ser usada em conjunto com os valores de MAC para determinar os pares de modos correlacionados. O parâmetro é muitas vezes utilizado para emparelhar modos de formas derivadas de modelos analíticos com os obtidos

experimentalmente. É de fácil aplicação e não requer uma estimativa das matrizes do sistema. É limitado entre 0 e 1, sendo o parâmetro 1 referente a formas de modos totalmente consistentes. Ele só indica consistência e não indica validade ou ortogonalidade, sendo que um valor próximo de 0 indica que os modos não são consistentes.

O parâmetro MAC é calculado como o produto escalar normalizado dos dois conjuntos de vectores $\{\varphi_A\}$ e $\{\varphi_X\}$. Os resultados escalares estão dispostos dentro da matriz MAC e o parâmetro pode ser expresso através de:

$$MAC(r, q) = \frac{|\{\varphi_A\}_r^T \{\varphi_X\}_q^T|^2}{(\{\varphi_A\}_r^T \{\varphi_A\}_r)(\{\varphi_X\}_q^T \{\varphi_X\}_q)} \quad 3.1$$

Onde:

$\{\varphi_A\}_r$ = vetor compatível analítico modal, modo r

$\{\varphi_X\}_q$ = vetor teste modal, modo q

$\{\varphi_A\}_r^T$ = transposto de $\{\varphi_A\}_r$

$\{\varphi_X\}_q^T$ = transposto de $\{\varphi_X\}_q$

Através de uma rotina desenvolvida no software Matlab especialmente para geração da matriz MAC, foram processados os dados obtidos através do modelo numérico e do ensaio experimental, gerando um gráfico do coeficiente para cada modo de vibração como pode ser observado na Figura 3.10

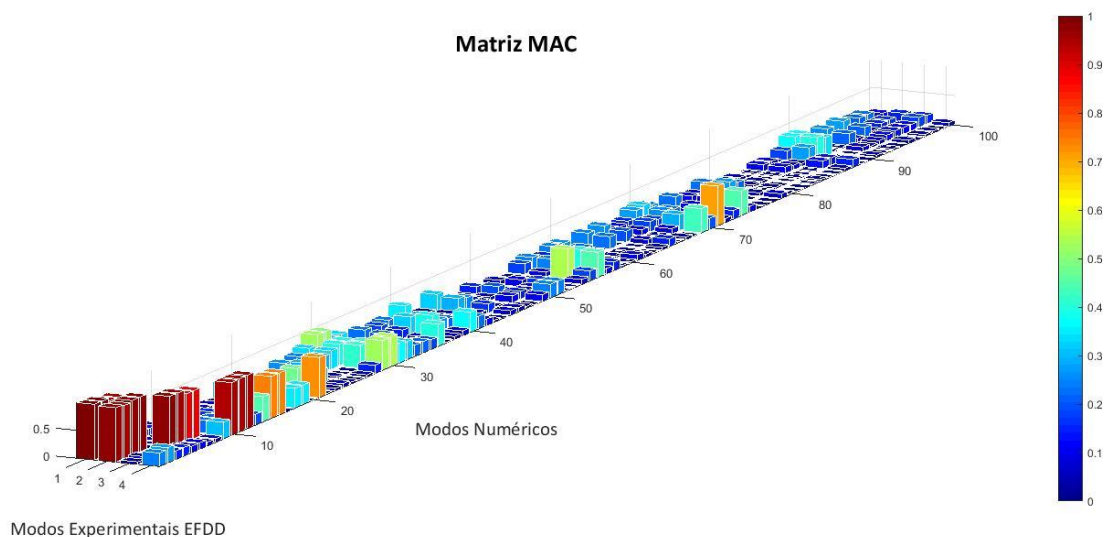


Figura 3.10 – Matrix MAC para a direção X.

Foram analisados os cem primeiros modos de vibração gerados pelo modelo numérico comparativamente aos quatro modos experimentais obtidos através do ensaio de vibração ambiental. Ainda segundo (Pastor

& Binda, 2012), a matriz MAC indica que os modos individuais a partir dos dois conjuntos se correlacionam. O MAC só pode indicar a consistência, não validade, por isso é usado principalmente no modo de pré-teste de emparelhamento. O parâmetro MAC é incapaz de distinguir entre erros sistemáticos e discrepâncias locais, não podendo identificar se os vectores são ortogonais ou incompletos. A correlação ideal entre os modos numéricos e experimentais seria considerada sendo o valor da diagonal da matriz um valor unitário, como pode ser observado na Figura 3.11.

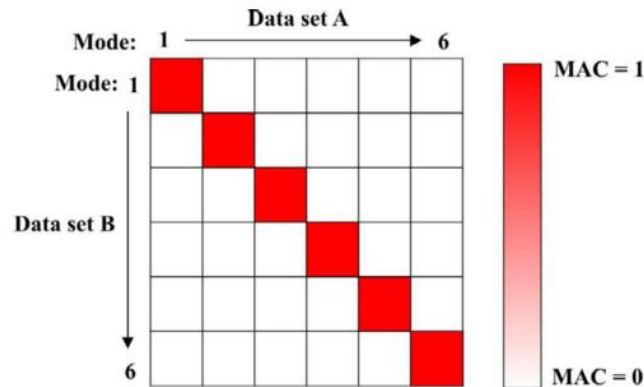


Figura 3.11 – Correlação ideal de parâmetro MAC.

Ao analisarmos os primeiros treze modos numéricos comparados aos quatro experimentais, obtivemos resultados satisfatórios com parâmetros MAC superiores a 0,95, como pode ser observado mais facilmente na Figura 3.12.

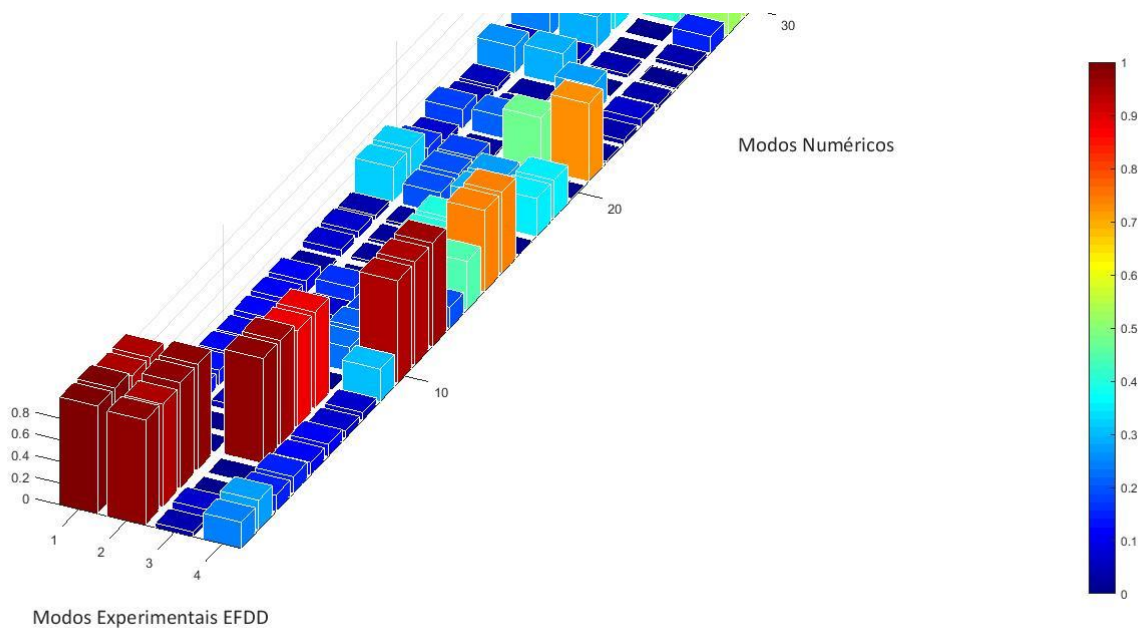


Figura 3.12 – Principais parâmetros MAC analisados.

Pode-se observar uma grande singularidade entre os dois primeiros modos experimentais. Acredita-se que o primeiro modo de vibração seja referente ao fuste de betão e o segundo ao fuste juntamente com o palito metálico. Como os pontos de ensaio no palito metálico não representam um número significativo para representar o modo de vibração da estrutura metálica, conclui-se que o segundo modo de vibração obtido recebe significativa influência do primeiro modo, justificando a singularidade. Ainda assim podemos observar uma correlação muito satisfatória na linha diagonal do gráfico.

Neste trabalho, foi analisado um método para a comparação e correlação quantitativa entre as propriedades dinâmicas medidas em um teste modal. É possível determinar o par modal correlacionado. Durante as duas últimas décadas, o Modal Assurance Criterion tem sido demonstrado como um conceito estatístico simples, que pode tornar-se uma ferramenta extremamente útil em análise modal experimental.

Uma vez que o parâmetro MAC não dá nenhuma informação sobre a correspondência em frequências e pode demonstrar uma boa correlação entre os modos que têm separação de frequências significativa, é também necessária uma comparação das frequências naturais, conforme pode ser observado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Comparação entre frequências do modelo numérico e ensaio de vibração ambiental.

Modos de vibração	Frequências do modelo numérico (Hz)	Frequências do ensaio de vibração ambiental (Hz)
Modo 1	0,4921	0,4781
Modo 2	0,8967	0,7019
Modo 3	2,4565	2,364
Modo 4	5,8070	5,979

Apesar da boa correlação entre modos de vibração ambiental do modelo numérico e do ensaio experimental, observamos uma discrepância significativa entre as frequências de vibração dos respectivos modos, justificando assim a necessidade de uma calibração do modelo numérico.

Com os dados obtidos através deste trabalho, foi traçada uma comparação entre as deformadas dos primeiros quatro modos de vibração, conforme pode ser observado na Figura 3.13.

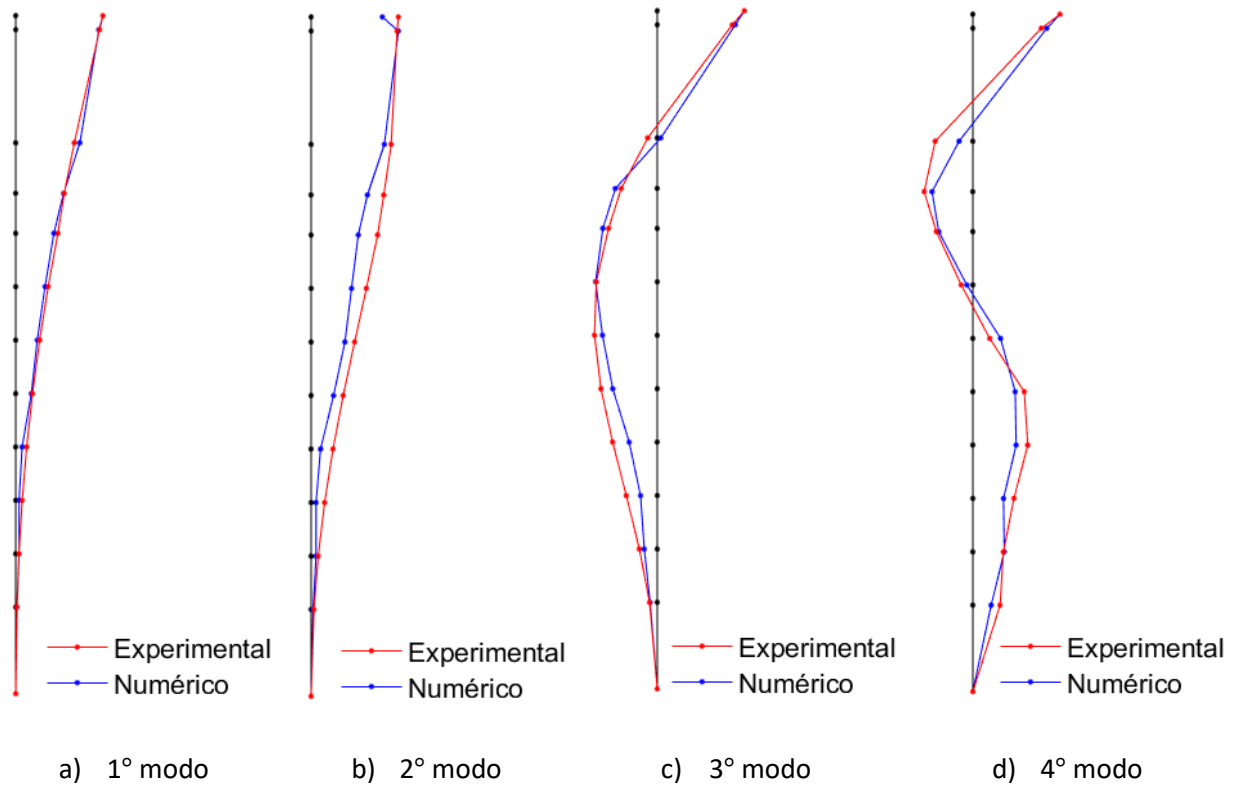


Figura 3.13 – Comparação entre as deformadas na direção X.

4 SISTEMA DE MONITORAMENTO CONTINUO DA TORRE MONTE DA VIRGEM

Possuindo um caráter essencialmente aleatório, as ações das forças de vento impõem à estruturas muito esbeltas ciclos de variações de tensões. Dependendo dos tipos de detalhes estruturais adotados, essa variação cíclica nas tensões pode ocasionar a fadiga estrutural.

Visto isso, para determinados tipos de estruturas, se torna fundamental o conhecimento do tipo escoamento atmosférico predominante na região, e o estudo do comportamento estrutural mediante diferentes escoamentos. Segundo (Jervell, 2008), existem programas de cálculo e simulação do escoamento atmosférico adequados, que permitem fazer uma estimativa das características do vento na área que se pretende analisar. Contudo, tem-se verificado limitações dos resultados em terrenos com uma orografia complexa.

Em terrenos de natureza complexa, o escoamento atmosférico tem características quase sempre distintas daquelas obtidas através de softwares. Aspectos como a turbulência, a inclinação do escoamento e a variação da velocidade com a altura ao solo, entre outros, podem assumir uma importância não desprezável.

A utilização de métodos de medição mais recentes, como é o caso da anemometria de ultrassons, tem sido utilizado para caracterização mais pormenorizada do regime de ventos. Por exemplo, a turbulência, por ser medida a frequências de amostragem superiores, é melhor caracterizada relativamente às medições efectuadas com anemómetros de copos.

Atualmente na região do Porto, existe uma limitação na quantidade de estações meteorológicas e uma dificuldade de acessar os dados gerados pelas existentes. Desta forma, se propôs através deste trabalho a criação de um sistema de monitoramento contínuo com o qual se possa realizar medições tanto da velocidade quanto direção do vento nos entornos da torre do Monte da Virgem, como também as acelerações em diferentes estados de vento, criando uma base de dados que possa ser utilizada em diversos estudos na área da construção civil.

4.1 PLANO DE MONITORAMENTO

A aquisição de dados é o processo de medição de um fenômeno elétrico ou físico, como tensão, corrente, temperatura, deslocamento, pressão com o auxílio de um computador. A maior parte dos fenômenos naturais e sua medição são de natureza analógica, ou seja, os equipamentos de medição emitem um sinal com uma gama de valores contínuos e com amplitudes contínuas.

Esta energia liberada por cada grandeza mencionada, não pode ser mensurada de forma direta pelos circuitos eletrônicos, sendo necessário sua conversão em uma forma de energia manipulável, um sinal digital. Sendo assim, surgem os sensores e transdutores, equipamentos capazes de receber as quantidades físicas de grandezas analógicas e converte-las em quantidades elétricas, tais como tensão, corrente ou impedância, que podem ser medidos por um conversor analógico-digital, e em seguida processadas por um computador. Na Figura 4.1 podemos observar uma simplificação do funcionamento de um sistema de aquisição de dados

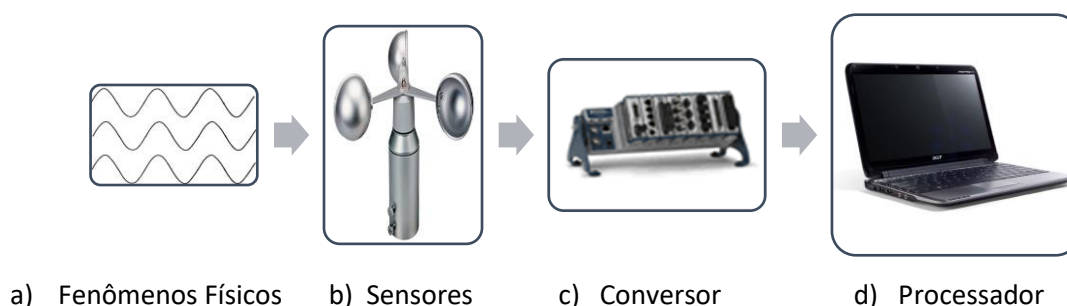



Figura 4.1 – Modelo de sistema de aquisição de dados.

Os sensores são equipamentos desenvolvidos para converter um fenômeno físico em um sinal elétrico mensurável, e assim, após um processamento e análise nos permitir quantificar o fenômeno físico desejado.

Com o objetivo de realizar uma caracterização do vento incidente na torre Monte da Virgem, foi proposto a utilização de anemômetros para a medição da velocidade e direção do vento, sendo que a componente mais preponderante em nossa análise será a componente horizontal do vento e também sua direção.

Dentre todos modelos existentes para medição da componente horizontal do vento, os anemômetros rotacionais de copo são os mais utilizados atualmente, por serem robustos e resistentes aos ventos oblíquos causados em mastros e travessas. Para a realização deste trabalho, se optou pela utilização do sensor Vaisala WM302, por apresentar a melhor relação custo benefício no momento da aquisição. Na Tabela 4.1, é possível verificar as principais propriedades do sensor.

Tabela 4.1 – Anemômetro Vaisala WM302 inserido no sistema de monitoramento.

ANEMÔMETRO VAISALA WM302						
	Fabricante	Faixa de medição	Incerteza		Saída	Alimentação
			0.5 a 10m/s	10 a 60 m/s		
	Vaisala	0,5 m/s a 60 m/s	$\pm 0.3m/s$	2%	1 Hz	3 a 15V CC

O Anemômetro Vaisala WM302 é composto por três sensores. Um rele de contato é responsável pela leitura da velocidade, fornecendo impulsos ao completar meio ciclo, e através da contagem destes impulsos é possível realizar uma correlação com a velocidade através da seguinte fórmula:

$$U = -0.24 + 0.699 \times F \tag{4.1}$$

Onde:

U = Velocidade do vento (m/s)

F = Frequência de saída (Hz)

Os outros dois sensores são potenciômetros responsáveis pela direção. Cada potenciômetro faz uma leitura de 180°, conseguindo juntos abranger os 360° necessários, o que não pode ser verificado em anemômetros com apenas um potenciômetro que geram uma brecha de 5° na leitura. Para o

funcionamento dos potenciômetros é necessário o fornecimento de uma tensão, que neste caso foi adotada como 7,5 V CC, e o mesmo retorna uma nova tensão dependendo do posicionamento da cauda, sendo possível assim relaciona-la com um ângulo.

Com o intuito de se traçar um perfil do vento ao longo de diferentes posições da estrutura, seria necessário a instalação de pelo menos um anemômetro a meio vão e um anemômetro no topo da estrutura, para dar uma ideia básica do comportamento do vento ao longo da altura. Devido a elevada altura da estrutura e a ausência de plataformas intermédias para a instalação de anemômetros, inicialmente foi proposto a instalação de dois anemômetros no topo da torre principal e um anemômetro em uma torre vizinha que possui aproximadamente metade da altura, conforme pode ser observado na Figura 4.2.



Figura 4.2 – Proposta inicial de localização dos anemômetros.

Devido a elevada distância entre as duas estruturas, não seria viável a ligação entre os sensores e o mesmo sistema de aquisição, devido à grande quantidade de cabos necessários e a possível perda de qualidade do sinal devido ao comprimento dos cabos. Uma das soluções propostas foi a instalação de uma estação meteorológica na torre secundária, que possui um sistema próprio de aquisição de dados e ainda forneceria dados essenciais para uma análise mais complexa como temperatura e umidade.

Para uma fase inicial deste projeto, devido ao curto espaço de tempo disponível e a falta de recursos para a compra de uma estação, se optou pela instalação apenas dos anemômetros na torre principal, ficando prevista a aquisição futura da estação para completar o sistema de monitoramento.

Segundo dados coletados através da estação meteorológica do Instituto Superior de Engenharia do Porto, as principais incidências de vento na região do Porto decorrem da direção noroeste e sudoeste. Desta forma se achou conveniente a instalação de dois anemômetros Vaisala WM302 no topo da estrutura, garantindo assim que um dos anemômetros recebesse a rajada de vento antes da mesma chegar a estrutura na maioria dos casos, evitando assim efeitos de sombreamento e de turbulência. A disposição dos anemômetros pode ser observada na imagem 4.3.

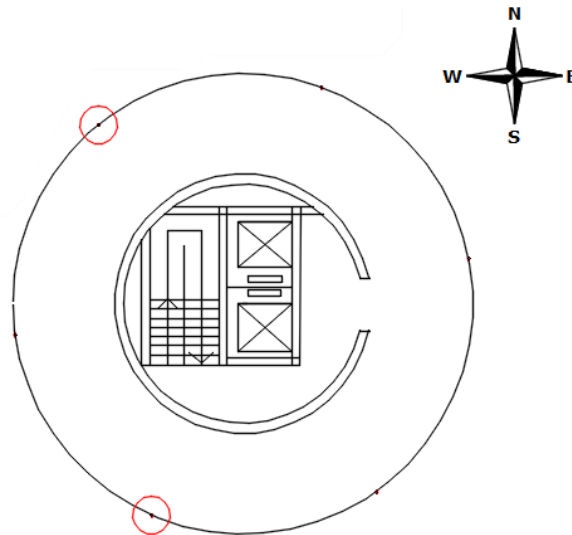


Figura 4.3 – Disposição dos anemômetros na estrutura na cota 320.

A cota escolhida para a instalação dos anemômetros foi a cota 320, devido a existência de estruturas para a fixação de suportes e levando-se em consideração a maior facilidade de prever o comportamento de ventos nesta secção do que no topo do fuste de betão pela influência dos perfis metálicos.

Para a instalação dos sensores, ainda tentando evitar zonas turbulentas em regiões próximas ao fuste de betão e sombreamentos, inicialmente foi proposto o desenvolvimento de um suporte regulável que afastasse o anemómetro a aproximadamente 3 metros de distância, garantindo a captação de um fluxo mais laminar, como pode ser observado na imagem 4.4.

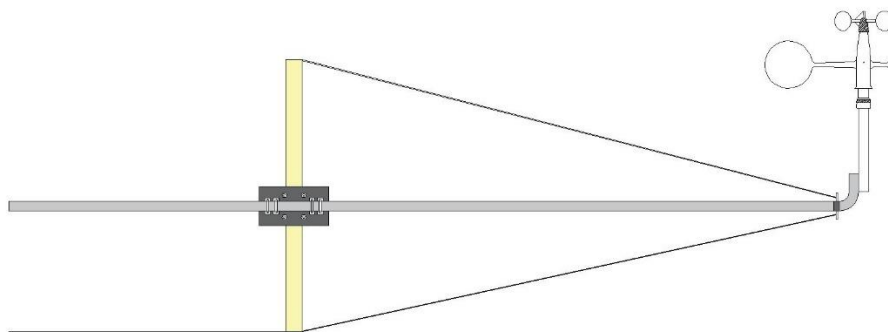
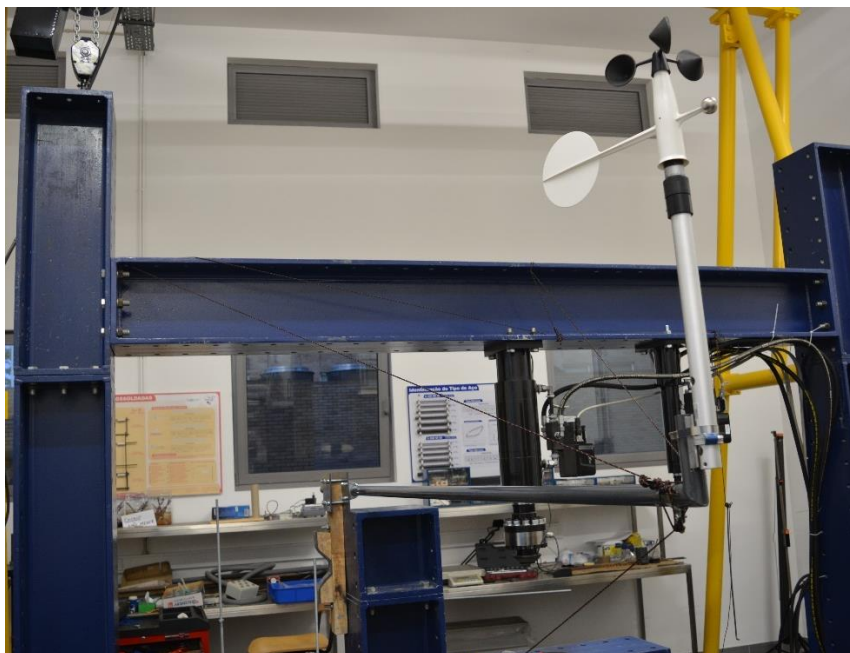


Figura 4.4 – Proposta inicial de suporte para instalação do anemómetro.

Este protótipo de suporte foi dimensionado, executado e testado em laboratório, como pode ser observado na Figura 4.5, e apresentou um bom desempenho.



a) Visão global



b) Detalhe da ligação

Figura 4.5 – Teste do suporte inicial em laboratório.

Devido a algumas preocupações por parte da PT Telecom com o afastamento de uma nova estrutura na torre e uma política de retirar todos os equipamentos atualmente fixados em uma estrutura no contorno dos pisos mais elevados, não foi autorizada a instalação deste suporte.

Sendo assim, após uma reunião com os engenheiros da instituição, se deu início a concepção de um novo suporte que pudesse exercer a função de evitar áreas com ruídos ao mesmo tempo que não se afastasse horizontalmente dos pisos mais elevados. Após um levantamento e discussão de questões de segurança com representantes da PT Telecom, dentre as diversas propostas levantadas, se optou por um suporte vertical regulável afastado apenas 30 cm horizontalmente da estrutura e elevado cerca de 2,75 metros acima do piso, conforme pode ser observado na Figura 4.6.

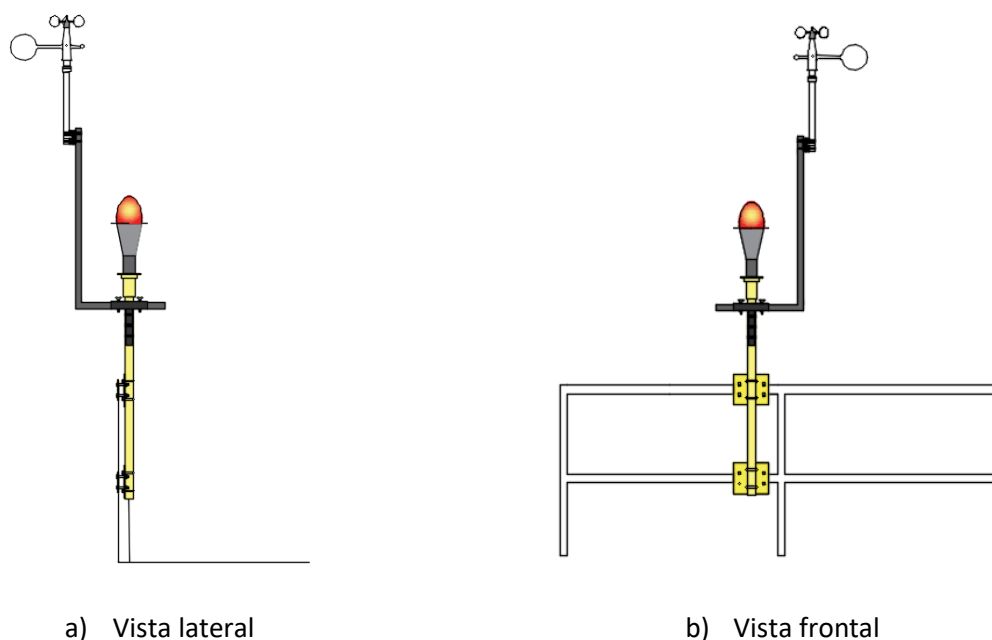




Figura 4.6 – Suporte final para anemômetros.

O suporte foi fixado em uma estrutura de iluminação já existente, não sendo necessário alterações significativas na estrutura.

Para a medição da aceleração, foram utilizados acelerômetros. O princípio de funcionamento do acelerômetro, ou transdutor de aceleração, baseia-se nos cristais piezoelétricos, que após serem sujeitos à compressão, geram um pequeno sinal elétrico proporcional à aceleração. Esse sinal é captado por um sistema de aquisição e interpretado posteriormente através de ferramentas computacionais.

Dentre todas as opções disponíveis no mercado, se optou pela utilização de acelerômetros PCB 393B12 e acelerômetros DYTRAN 3100D24 por já estarem disponíveis no ISEP. As principais características dos sensores estão expostas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Acelerômetros inseridos no sistema de monitoramento.

	PCB 393B12	DYTRAN 3100D24
Modelo		
Fabricante	PCB	DYTRAN
Sensibilidade (± 5%)	10 V/g	1 V/g
Faixa de frequência (± 5 %)	0.15 a 1000 Hz	1 a 1000Hz
Gama de medição	±0.5 g	±5 g
Tensão de Excitação	18 a 30 VDC	11 a13 VDC
Material	Cerâmico	Cerâmico

Por se tratar de uma torre de telecomunicação, a estrutura está sujeita a diversos tipos de ondas eletromagnéticas que poderiam interferir no pleno funcionamento dos acelerômetros. Sendo assim, se fez um levantamento de técnicas existentes para o isolamento de sistemas e se deparou com a gaiola de Faraday. Segundo (Danieli, Comedi, & Lunazzi, 2002), uma Gaiola de Faraday é uma blindagem elétrica, ou seja, uma superfície condutora que envolve uma dada região do espaço e que pode, em certas situações, impedir a entrada de perturbações produzidas por campos eletrostáticos e/ou eletromagnéticos externos. Uma demonstração do funcionamento da gaiola de Faraday poder ser observado na Figura 4.7.

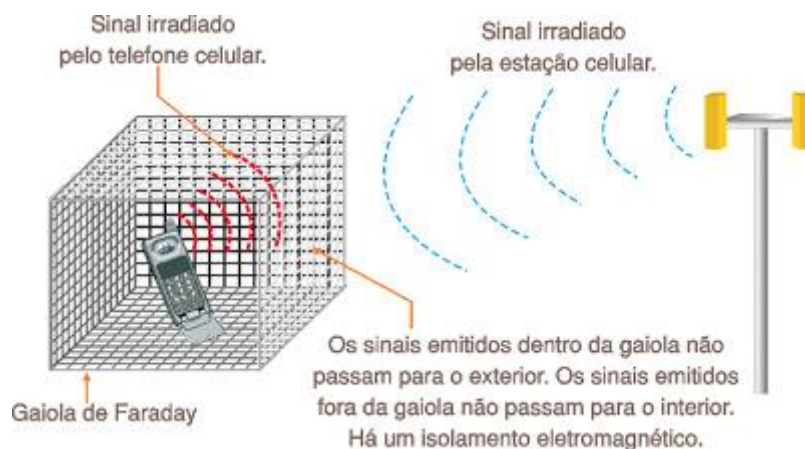


Figura 4.7 – Representação do funcionamento da gaiola de Faraday.

Visando a construção de uma gaiola de Faraday de baixo custo e eficiente para proteção dos sensores, se optou pelo envolvimento de uma caixa plástica com papel alumínio. Desta forma haveria uma diminuição na interferência das ondas eletromagnéticas e ruídos.

Para o posicionamento dos sensores, foi realizado uma análise dos dados fornecidos pelo modelo numérico se obtendo os três primeiros modos de vibração. Estes modos foram emparelhados para garantir que em nenhum ponto escolhido, a aceleração fosse nula. O posicionamento ótimo dos sensores foi obtido com base na análise das ordenadas modais dos principais modos de vibração. Sendo assim, se optou pela instalação dos sensores em três posições ao longo da torre, como podemos observar na imagem 4.8.

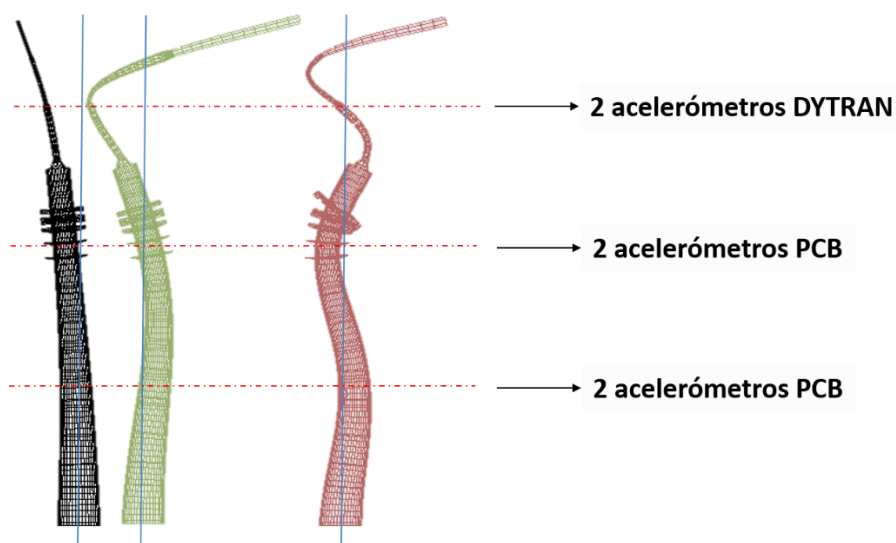


Figura 4.8 – Posicionamento dos acelerômetros.

Para a instalação dos sensores no palito metálico, devido ao difícil acesso e a elevada incidência de radiação nesta zona, a instalação dos sensores só pode ser realizada pelo pessoal da PT Telecom autorizado quando as antenas são desativadas para manutenção. Até a presente data, ainda não foi possível a realização desta instalação.

Como o posicionamento dos sensores são uma estimativa e dependem exclusivamente da presença de estruturas para a fixação dos sensores nas cotas desejadas, para a fixação dos sensores no fuste de betão foi adotada a cota 312,65 m e a cota 255,04m. Os acelerômetros foram fixados na parte superior do perfil metálico na cota 255,04 e na laje de betão armado na cota 312,65, sempre se verificando o mesmo alinhamento dos eixos. Na Figura 4.9 podemos observar a chapa de fixação do acelerômetro.




Figura 4.9 – Suporte de fixação para acelerômetros.

Além da própria medição, um sistema de aquisição de dados deve garantir sobretudo uma relação aceitável entre os dados adquiridos e os fenômenos reais, se fazendo assim necessários elementos de análise e validação implementados no sistema de aquisição.

Alguns conversores analógico-digital possuem esses elementos de análise e validação de dados, mais conhecidos como dispositivos condicionadores de sinal, que amplificam sinais de baixa intensidade, isolando-os e filtrando-os para uma medição mais precisa.

Para o desenvolvimento do presente trabalho, se optou pela utilização do sistema NI Compact DAQ por se tratar de um sistema modular, ou seja, pode ser utilizado para a aquisição de dados de diversos tipos de sensores apenas fazendo uma alteração para o módulo mais adequado, se tornando assim mais adequado para as diversas áreas de estudos desenvolvidas no ISEP. As principais características do equipamento estão expostas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Sistemas de aquisição de dados da National Instruments.

Ni Compact DAQ						
	Conexão	Recursos	Quantidades de Canais	Taxa máx. de amostragem	Condicionamento de sinais	Sistema operacional
	USB, Wi-fi, Ethernet	Várias medições	Modular	1 MS/s	Sim	Windows

Para leitura da direção foi utilizado um módulo NI 9209, para leitura da velocidade um módulo digital NI 9401 e para leitura dos acelerômetros dois módulos NI 9234.

Para o processamento e armazenamento dos dados, foi disponibilizado um PC fixo que foi instalado a cota 312 m. Todos os dados gerados pelos sensores são transmitidos através de cabos ao Compact DAQ, que realiza o condicionamento do sinal e os repassa para o computador. O processamento de dados é realizado através do software Labview 2015, fornecido pela National Instruments.

Este trabalho irá abordar uma fase inicial do plano de monitoramento que foi implementado na torre Monte da Virgem, sendo que sua ampliação já está prevista e ainda só não foi iniciada devido ao reduzido espaço de tempo disponível e a questões burocráticas. Na figura 4.10 pode ser observado o plano de monitoramento instalado até a presente data.

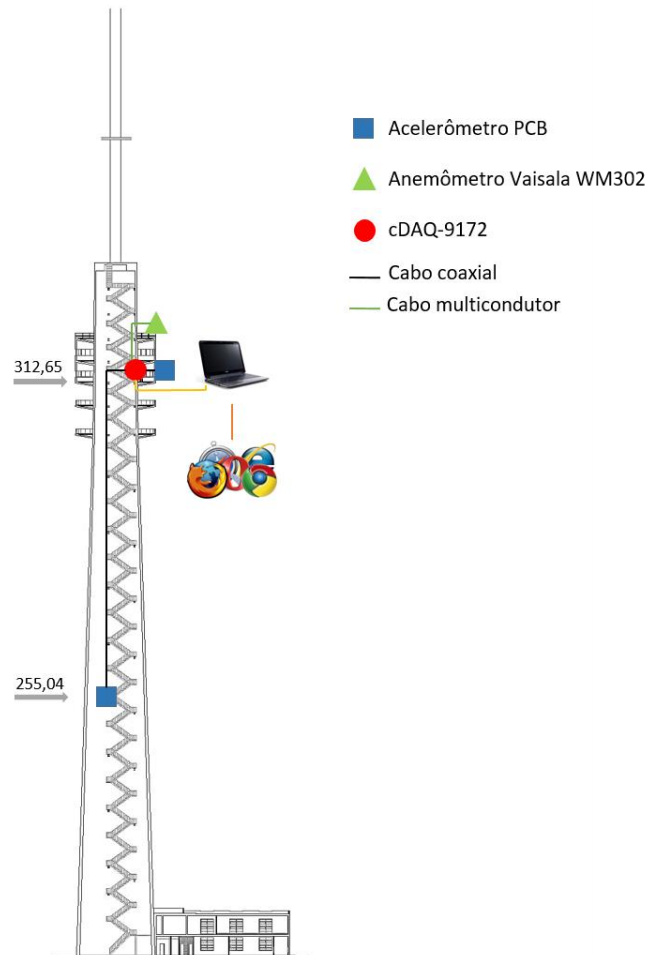


Figura 4.10 – Plano de monitoramento implementado.

Como o acesso a torre é restrito, para viabilizar o acompanhamento dos dados em tempo real, o sistema de aquisição foi ligado à internet, permitindo um acesso remoto ao computador pelo software TeamViewer.

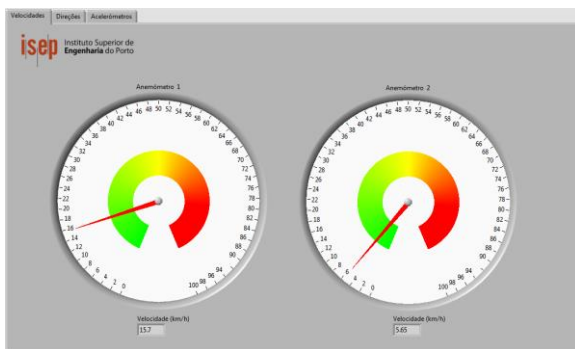
4.2 SOFTWARE DE AQUISIÇÃO

Para a realização da interpretação dos dados fornecidos pelos sensores, foi necessário o desenvolvimento de um software capaz de realizar a leitura do sinal digital fornecido pelo cDAQ-9172 e seu posterior

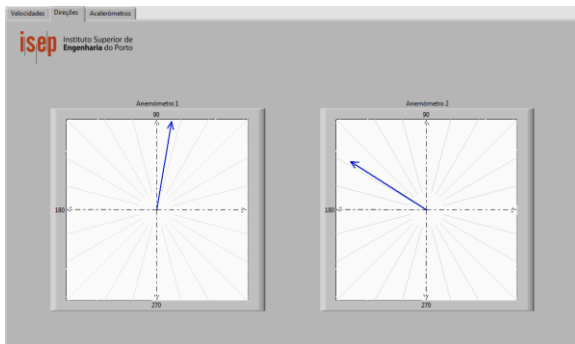
armazenamento em arquivos de texto, fornecendo um material que pudesse ser interpretado posteriormente.

Para este efeito, se optou pela utilização de um software fornecido pela National Instruments, o Labview 2015, que é um ambiente de desenvolvimento integrado, criado especificamente para engenheiros e cientistas que desenvolvem sistemas de medição e controle.

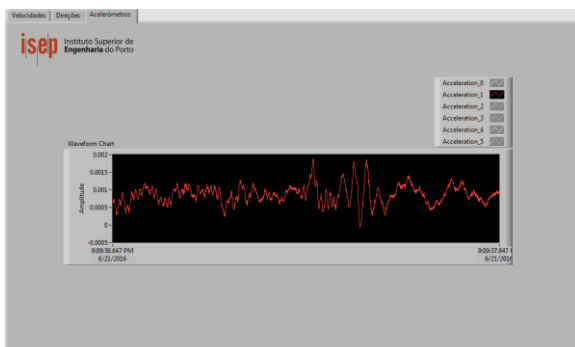
Inicialmente foi realizado um estudo do layout do programa, e quais parâmetros seriam necessários ser exibidos. Para este trabalho, se optou pela exibição da velocidade do vento, da direção do vento e um gráfico dinâmico das acelerações em função do tempo que podem ser observados através da Figura 4.11.



a) Gráfico da velocidade.



b) Gráfico da direção



c) Gráfico da aceleração.

Figura 4.11 – Layout do software de aquisição.

O software de desenvolvimento Labview, possui diversas ferramentas pré-programadas que auxiliam no desenvolvimento de programas para experimentação, podendo adaptar cada ferramenta mediante a necessidade do sistema.

CAPÍTULO 3

Inicialmente foi utilizado um assistente cDAQ que possibilita a configuração dos módulos utilizados no cDAQ-9172. Uma das questões que deve ser levada em consideração é que este assistente nos permite apenas a definição de uma taxa de aquisição para todos os sensores. Como os acelerômetros são limitados a uma taxa mínima de aquisição de 800Hz, após diversos testes, se concluiu que a taxa ideal para o correto funcionamento de todos os sensores simultaneamente seria de 1000Hz.

Para um sistema de monitoramento contínuo, esta taxa de aquisição representa um valor muito elevado devido a quantidade de dados que deveriam ser armazenados. Para resolver este problema, foi realizada uma decimação do sinal. Para os anemômetros foi admitida uma decimação para 2 Hz dos sinais, e para os acelerômetros uma decimação para 50Hz.

Os dados dos acelerômetros são gravados em ficheiros separados, os ficheiros são criados em intervalos de uma hora, para que caso haja algum imprevisto não se comprometa a totalidade dos dados e por uma facilidade no processamento dos dados posteriormente.

Os dados dos anemômetros são trabalhados através do equacionamento demonstrado anteriormente e em seguida armazenados em um ficheiro contendo a velocidade e a direção, sendo que cada ficheiro também é criado em intervalos de uma hora. A programação que está por traz do software está descrita na imagem 4.12.

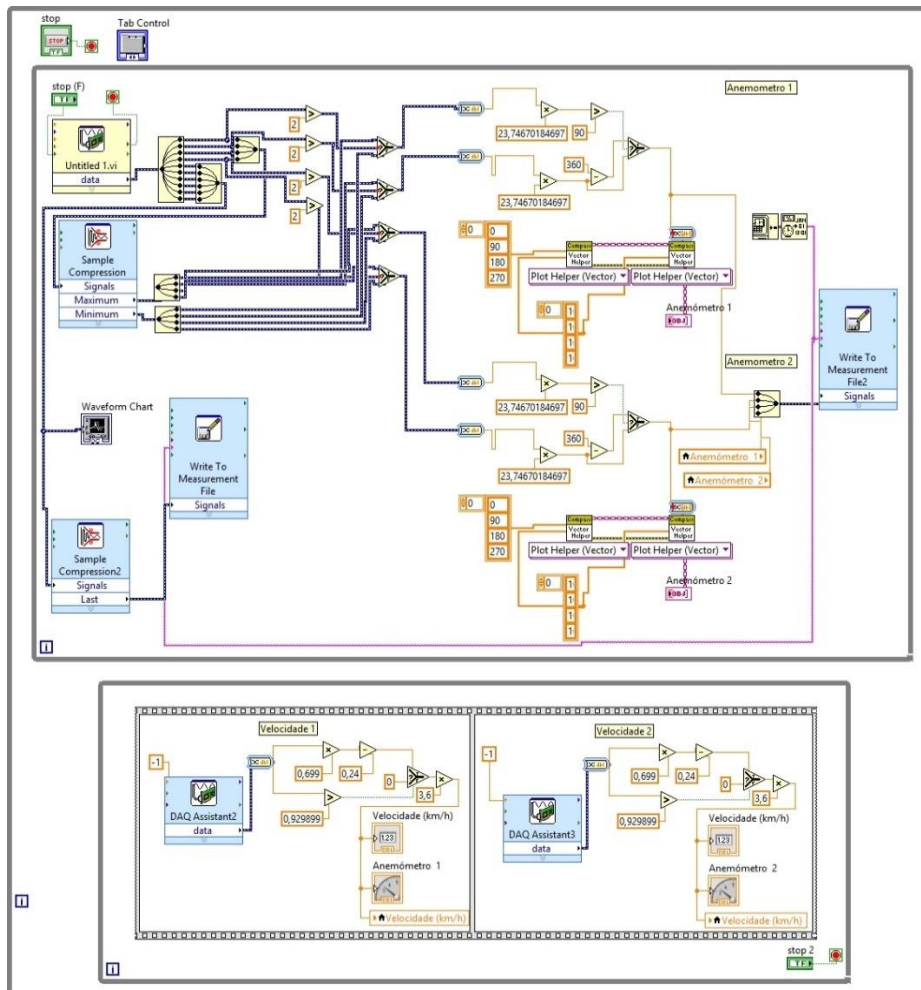


Figura 4.12 – Algoritmo do software de aquisição.

4.3 VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO

Com o intuito de validar o software de aquisição e garantir que as medições estavam condizentes com o fenômeno físico, se viu necessário a realização de testes para os anemômetros principalmente por se tratar de sensores adquiridos recentemente e uma experiência reduzida em sua utilização.

Para realizar esta validação, foi proposto a instalação do sistema de aquisição em um edifício do Instituto Superior de Engenharia do Porto, ao lado de uma estação meteorológica existente e em funcionamento. Desta forma seria possível uma análise dos dados dos dois sensores e uma comparação dos resultados.

Inicialmente foi instalado apenas um sensor em um mastro nivelado conforme a altura da estação. Devido a arquitetura do edifício e a ausência de suportes para a fixação do mastro ao lado da estação meteorológica, se realizou a instalação do anemômetro cerca de três metros deslocado horizontalmente da estação, como pode ser observado na Figura 4.13.



Figura 4.13 – Disposição dos anemômetros para o primeiro teste de validação

A os dados da estação meteorológica do ISEP podem ser obtidos através do próprio site da instituição e fornece uma medição a cada 5 minutos. O ensaio teve duração de um dia, e uma amostra de doze horas foi retirada para comparação dos resultados. Como a taxa de amostragem do sistema de aquisição é superior a taxa fornecida pela estação, se realizou uma média dos valores do sistema de aquisição no segundo em que se realizou a leitura na estação. A análise apontou para uma divergência significativa entre as medições tanto na velocidade quanto na direção., como pode ser observado na Figura 4.14.

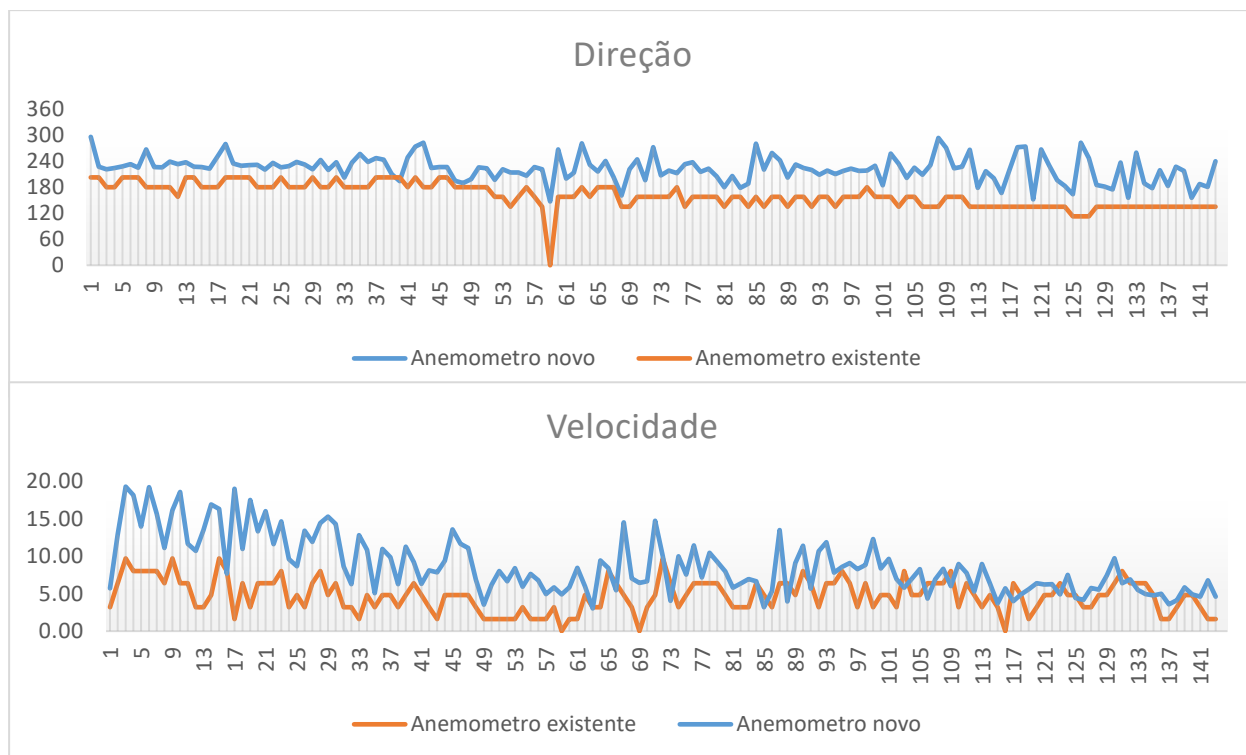


Figura 4.14 – Análise de direção e velocidade do vento para o primeiro ensaio 24/03/2016.

Essas divergências nas medições foram associadas a diversas razões. Devido ao distanciamento entre os dois sensores e a posição de fixação em relação a arquitetura do edifício, os dois sensores poderiam estar sujeitos a diferentes fluxos de vento, o que explicaria a divergência dos resultados. Outro fator observado, é que devido a prolongada exposição da estação meteorológica a intempéries e uma possível falta de manutenção, certo atrito estava sendo gerado tanto no copo quanto na cauda, sendo que em alguns instantes, enquanto o anemômetro novo apresentava alterações, o da estação meteorológica permanecia parado, podendo levar a erros nos resultados.

Uma segunda hipótese foi proposta, instalando os dois anemômetros novos a uma distância mínima que permitisse ambos realizarem o movimento completo de suas caudas. Desta forma foi possível realizar uma comparação entre dois sensores exatamente iguais, possibilitando a validação do software de aquisição. A disposição dos sensores pode ser observada na figura 4.15.



Figura 4.15 – Disposição dos anemômetros para o segundo teste de validação.

O tempo do ensaio prosseguiu sendo de 24 horas sendo que uma amostra de 12 horas foi retirada para comparação dos dados. Neste segundo ensaio se observou uma convergência dos dados obtidos pelos dois anemômetros novos, como pode ser observado na imagem 4.16.

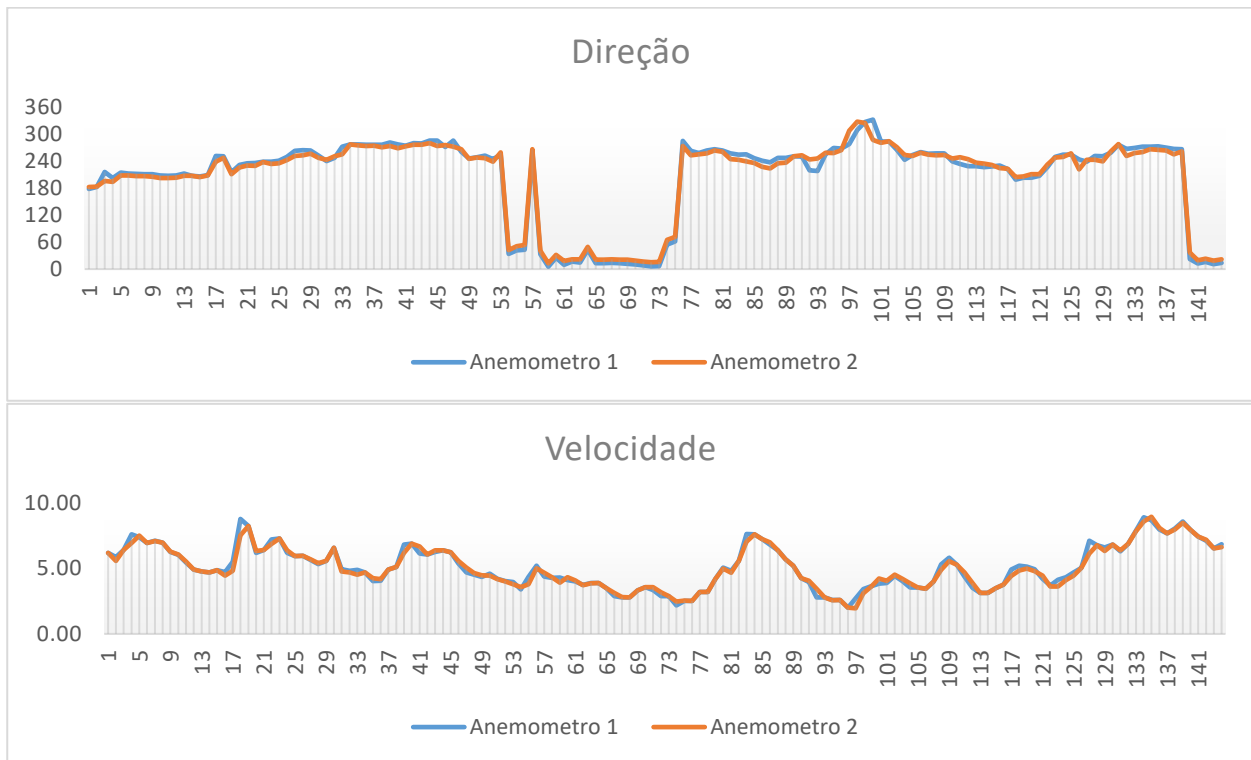


Figura 4.16 - Análise de direção e velocidade do vento para o segundo ensaio 30/03/2016.

A direção é medida de 0 a 360 graus, sendo que zero representa o Norte geográfico. A velocidade é considerada em Km/h. Com o resultado do segundo ensaio, foi concluído que o software está funcionando corretamente na aquisição de dados dos anemômetros e do sistema de uma forma geral, viabilizando a instalação do mesmo na torre Monte da Virgem.

4.4 INSTALAÇÃO DO SISTEMA NA TORRE MONTE DA VIRGEM

A implementação do sistema de aquisição na torre Monte da Virgem se deu início no dia 08/08/2016. A instalação se iniciou pela fixação dos suportes para os anemômetros. A fixação do suporte no mastro de iluminação foi realizada através de três braçadeiras metálicas. Em seguida foi instalado os anemômetros na extremidade do suporte e a passagem do cabo multicondutor até a cota 312,65 m, onde o sistema de aquisição está fixado. O suporte pode ser observado na figura 4.17.

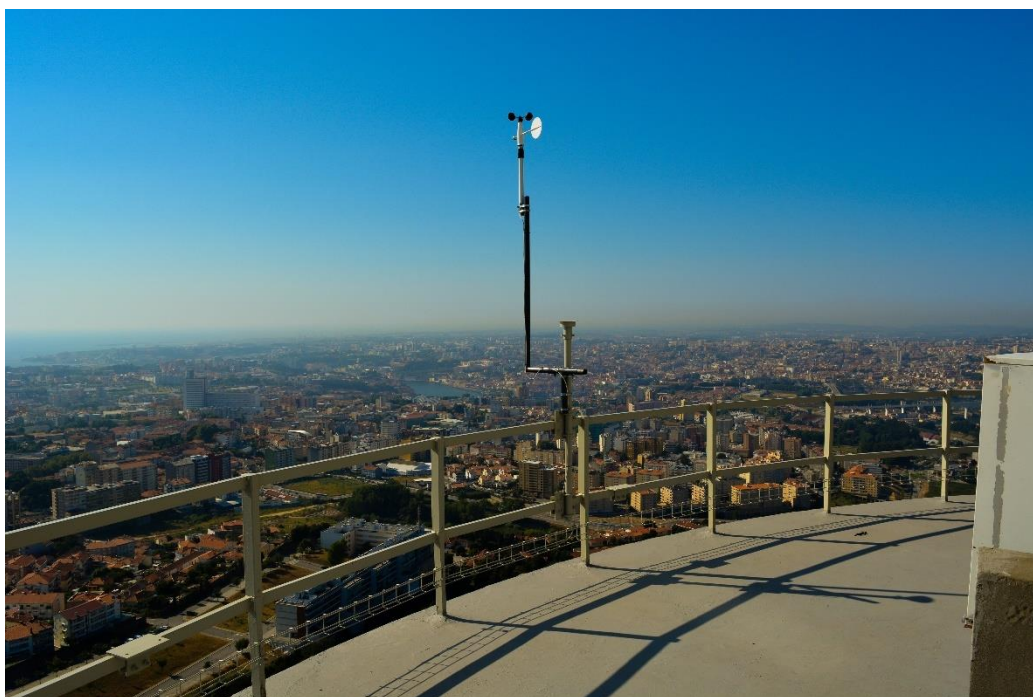


Figura 4.17 – Instalação dos anemômetros.

Para efeito da análise dos dados posteriormente, se realizou a enumeração dos devidos anemômetros, sendo considerado como Anemômetro 1 o sensor localizado a Sudoeste e Anemômetro 2 o sensor localizado a Noroeste.

O suporte desenvolvido foi revestido por uma tinta especial para evitar a corrosão do ferro, visto que se trata de uma zona costeira e a estrutura está diretamente exposta às intempéries. Os cabos foram guiados através das calhas até uma caixa de entrada no fuste.

A instalação dos acelerômetros foi dividida em duas etapas. O primeiro par de acelerômetros a ser instalados foi o da cota 255,04. Primeiramente se iniciou a passagem de dois cabos coaxiais de aproximadamente 80 metros de comprimento da cota em questão até a cota 312,65. A passagem foi realizada através de calhas também utilizadas por equipamentos da própria torre. Devido à disposição das calhas até o sistema de aquisição, foi necessário adicionar um cabo de 10 metros ao fim dos cabos para atingirem o ponto desejado. A ligação entre os cabos foi realizada através de uma junção para conectores BNC adequada, sendo que para garantir seu funcionamento e evitar ruídos, a conexão foi revestida com fita isolante, em seguida envolvida por uma manta de alumínio e por último por uma mangueira de borracha como pode ser observado na Figura 4.18.



a) Conectores BNC

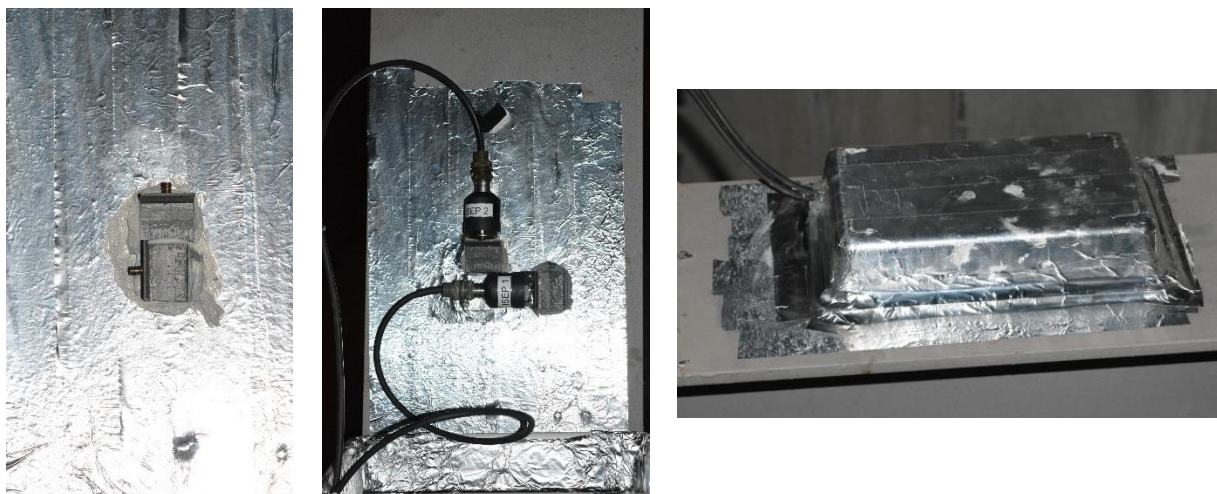
b) Manta de alumínio

c) Mangueira de borracha

Figura 4.18 – Conexão dos cabos coaxiais.

Todas as conexões do sistema foram revistas e devidamente testadas durante a implementação do sistema na torre.

Após a passagem dos cabos se iniciou a instalação dos sensores. Para garantir o correto funcionamento da gaiola de Faraday, se viu necessário o isolamento da base de fixação dos sensores, desta forma se adicionou uma manta de alumínio na base. Dando prosseguimento, se realizou pequenos cortes na manta no local onde seriam fixadas as chapas para garantir uma maior aderência. As chapas foram fixadas com uma bucha química apropriada. Após totalmente endurecida, foi realizada a instalação dos sensores devidamente enumerados para garantir a orientação correta dos eixos. Se adotou o eixo longitudinal da viga como sendo a direção X, representado pelo acelerômetro ISEP 2, e o eixo transversal da viga como eixo Y, representado pelo acelerômetro 1. A componente Z referente à altura da torre não foi ensaiada. Na Figura 7.19 é possível observar o decorrer da instalação.



a) Chapas de fixação

b) Sensores

c) Gaiola de Faraday

Figura 4.19 – Instalação dos anemômetros da cota 255,04.

Em seguida se deu continuidade realizando a instalação dos acelerômetros do piso da cota 312,65 através do mesmo procedimento descrito acima. Por ser instalado na laje de betão, foi necessário realizar um alinhamento do ponto de instalação com a viga, garantindo a sincronização dos eixos nos dois pontos de medição. O sensor ISEP 4 representa o eixo X e o sensor ISEP 3 representa o eixo Y. A disposição final pode ser vista na Figura 4.20.



Figura 4.20 - Instalação dos anemômetros da cota 312,65.

Para finalizar, foram instalados o sistema de aquisição de dados e o computador para o armazenamento dos mesmos. Cada sensor foi conectado em seu devido canal nos módulos de aquisição e todas as ligações foram verificadas. O sistema de aquisição pode ser observado na imagem 4.21.



Figura 4.21 – Sistema de aquisição de dados.

Para evitar problemas de mal funcionamento ou alguma interferência devido ao excesso de pó e outros elementos, se optou pelo isolamento do cDAQ-9172 e da fonte de alimentação dos anemômetros em uma caixa plástica.

Após uma semana de funcionamento, se verificou o não funcionamento do sistema devido a quedas de energia. Após um levantamento com os engenheiros responsáveis pela manutenção da torre, se verificou falhas no gerador principal que levavam a pequenas quedas e desligamento do sistema de aquisição. Sendo assim, se viu necessário a instalação de uma unidade de alimentação ininterrupta UPS, garantindo que o sistema continuasse operando após uma possível queda de energia.

4.5 ANÁLISES PRELIMINARES DO SISTEMA DE MONITORAMENTO CONTINUO

Como o sistema de monitoramento teve sua implantação finalizada no dia 16 de julho de 2016, não foi possível a obtenção de dados significativos até a presente data, sendo que para uma caracterização da ação dinâmica da torre sobre a ação do vento seria recomendado a análise de pelo menos um ano de medição registrando assim as diferentes estações do ano e diferentes fluxos de ventos.

Entretanto, visando a verificação do funcionamento do sistema de monitoramento, foram dispostos a seguir a análise de dados de amostras obtidas até o momento.

4.5.1 Direção do vento

Para a verificação da disposição ideal dos anemômetros na cota 320m, se realizou uma análise prévia dos dados para verificação de um instante de tempo em que apenas um dos anemômetros estivesse recebendo diretamente o fluxo de vento, caso em que o segundo anemômetro estaria sujeito a efeitos de turbulência e sombreamento gerados pela torre. Desta forma, se optou pela análise de um período de três horas, com início às 12:40 horas do dia 16 de agosto de 2016, por ter captado fluxos de ventos raros de Sudeste. A análise das direções dos dois anemômetros pode ser observada na Figura 4.22.

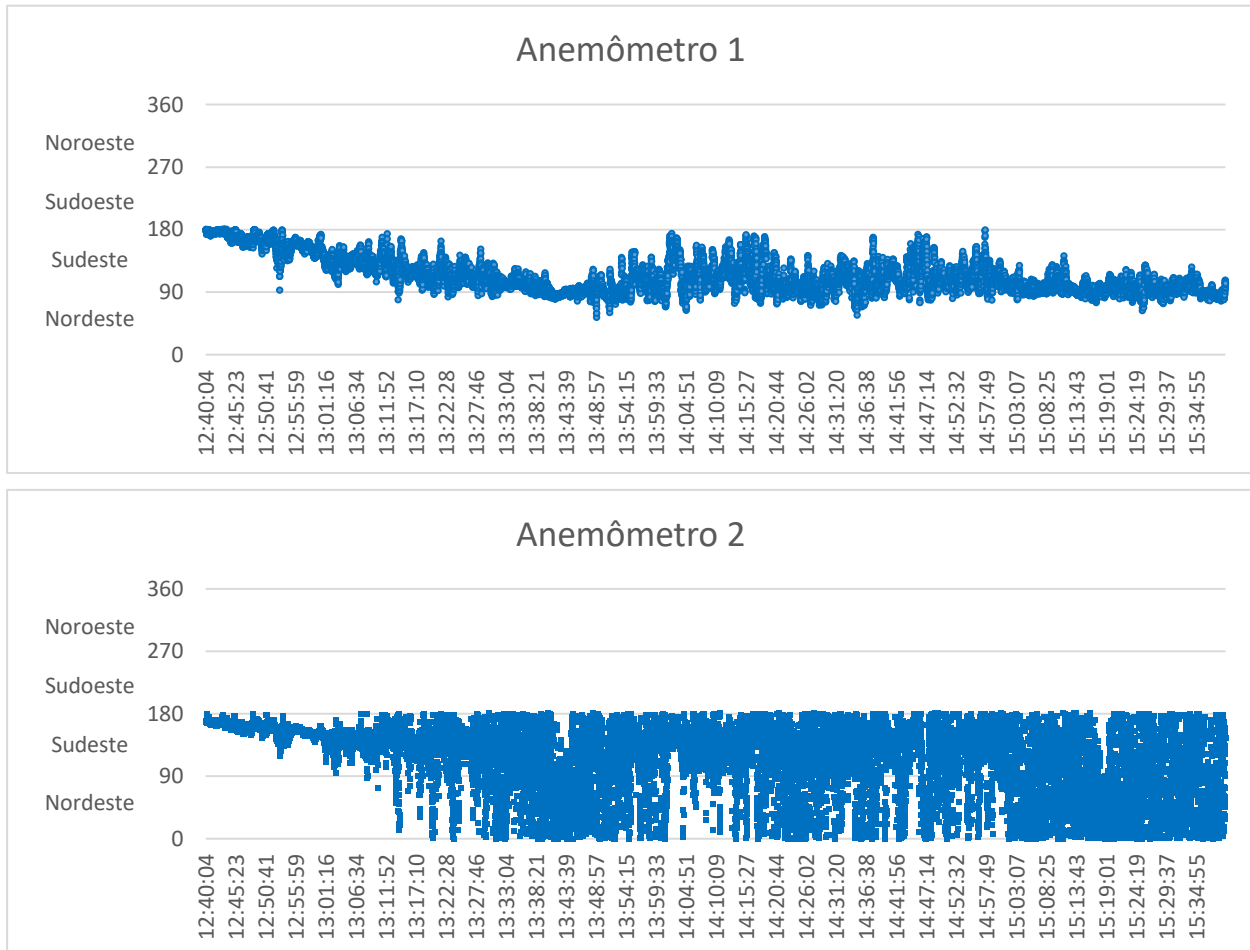


Figura 4.22 – Análise da direção do vento para os dois anemômetros no dia 16/08/2016.

O software de aquisição, quando se diz respeito a direção dos anemômetros, é baseado na rosa dos ventos, ou seja, considera o polo Norte como sendo o ângulo 0°, o Leste como sendo 90°, Sul como sendo 180° e Oeste como sendo 270°. Assim, os sensores nos fornecem um ângulo que posteriormente é associado a uma determinada direção.

Ao analisarmos os dois gráficos acima, concluímos que quando o fluxo de vento era basicamente do Sul, os dois anemômetros apresentavam uma singularidade na direção. Após uma inversão deste fluxo para Sudeste, notamos uma disparidade entre os resultados, sendo as medições do anemômetro 1 mais lineares quando comparadas ao anemômetro 2. Este fenômeno pode ser melhor compreendido através da Figura 4.23.

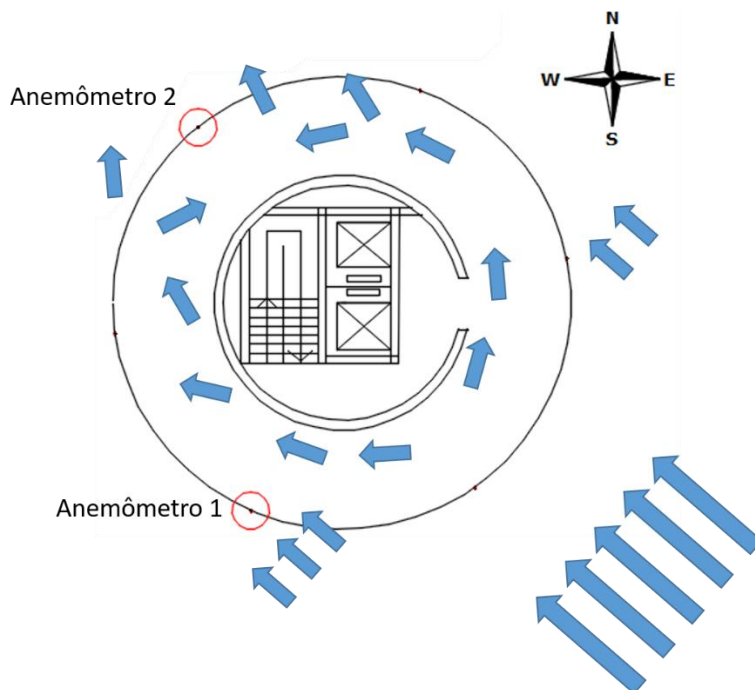


Figura 4.23 – Turbulência gerada por ventos Sudeste.

O comportamento de anemômetros em um regime turbulento é complexo e difícil de se prever. Sendo assim, estes dados poderão ser utilizados futuramente para estudos envolvendo a caracterização de regimes turbulentos em torres circulares entre outros.

4.5.2 Velocidade do vento

Conforme mencionado no teste para a validação do software, é extremamente complexo comparar dois anemômetros afastados significativamente devido aos efeitos locais do vento e a possível interferência devido a arquitetura do local. Apenas como forma demonstrativa, foi realizada uma comparação entre a velocidade dos dois anemômetros no mesmo instante de tempo comparado acima, como pode ser observado na Figura 4.24.

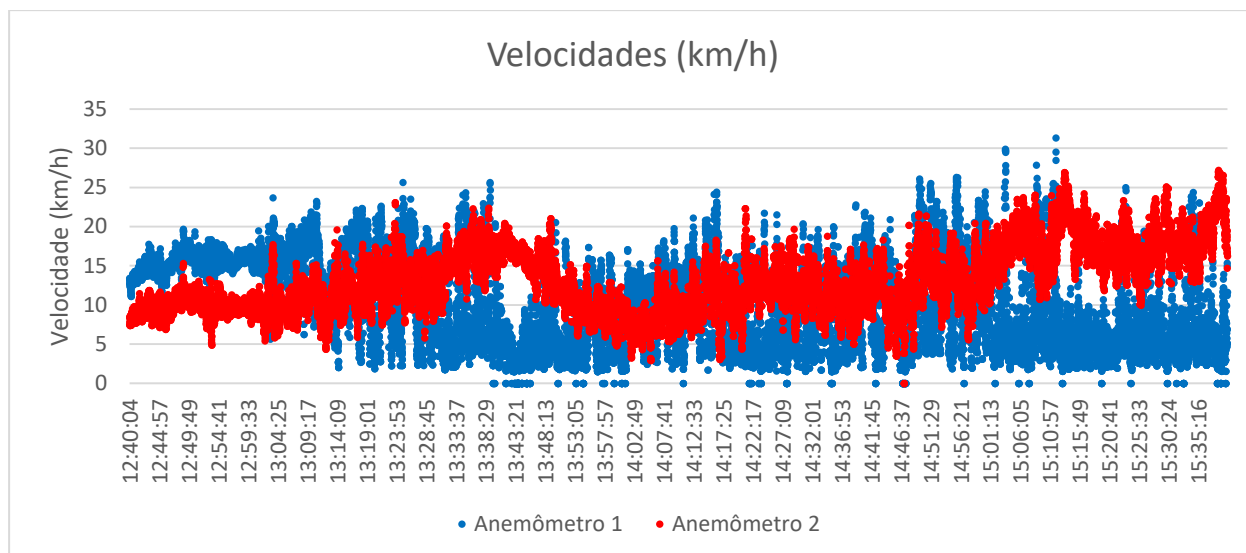


Figura 4.24 – Análise das velocidades dos anemômetros no dia 16/08/2016.

Como já era esperado, existe uma divergência entre as duas velocidades aferidas. Provavelmente isso se deve ao posicionamento dos anemômetros. Para solucionar esta divergência, como através dos potenciômetros é possível uma análise da direção preponderante do vento, levando a uma verificação de qual anemômetro está recebendo um fluxo mais direto e com menor interferência, apenas a velocidade deste anemômetro será considerada. No caso desta amostra a velocidade do anemômetro 1 seria a adotada para análise.

4.5.3 Aceleração da estrutura

Devido a elevada taxa de aquisição dos acelerômetros, se viu necessário a redução do tempo de análise para viabilizar uma representação gráfica dos dados. Sendo assim, baseado nas análises da velocidade do vento apresentadas anteriormente, se optou por uma amostra de tempo localizada entre 15:03:28 e 15:03:49, que representa o espaço de tempo com maior velocidade do vento baseado nas análises anteriores contribuindo assim de forma mais significativa no deslocamento da estrutura. As acelerações nos dois pontos de medições na direção X durante os 21 segundos considerados podem ser observadas na Figura 4.25.

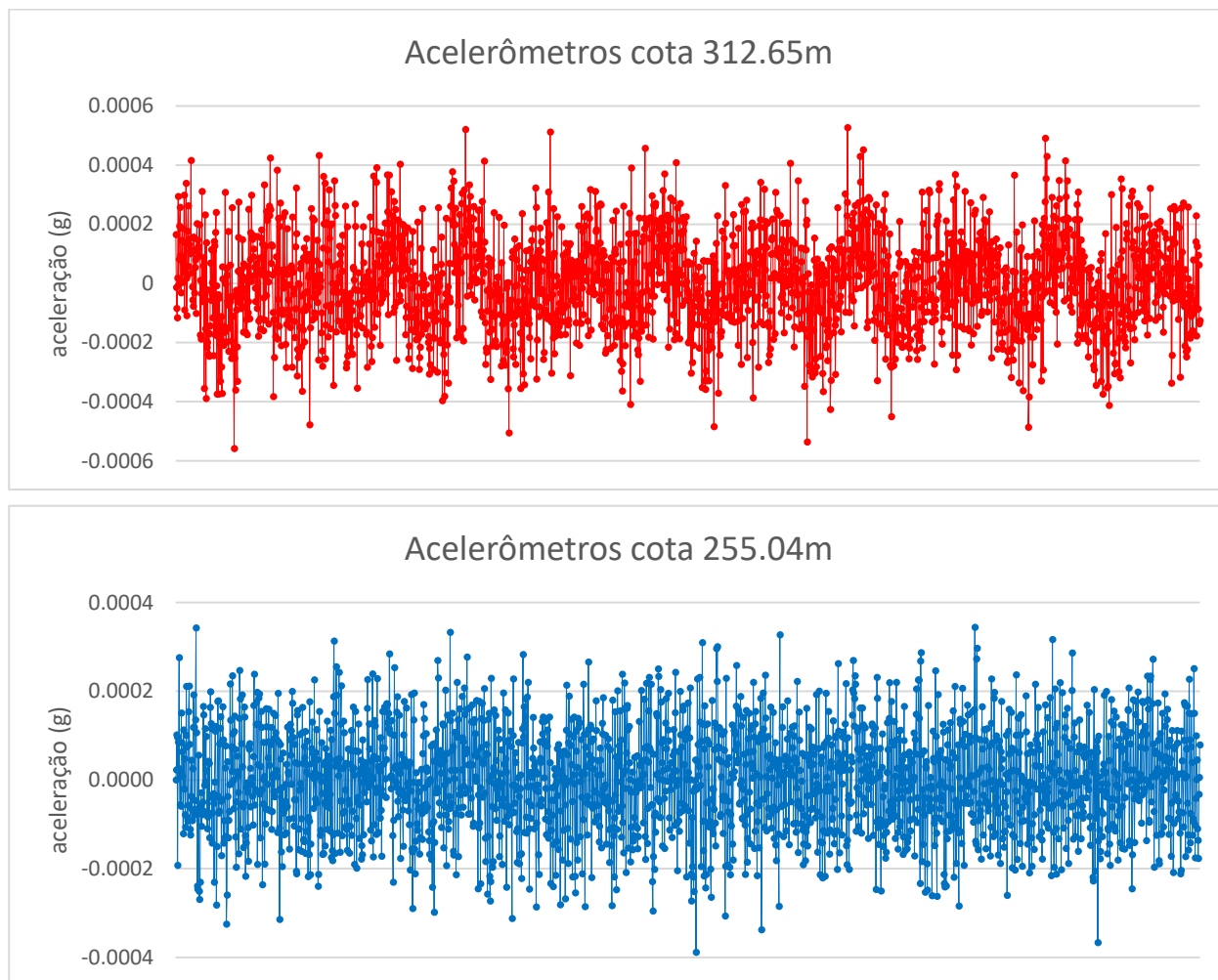


Figura 4.25 – Acelerações da estrutura no dia 16/08/2016 na direção X.

Podemos observar uma diferença nas acelerações quando comparadas a diferentes cotas, sendo a aceleração na cota 312.65m superior. Isso se deve a diferente rigidez associada a cada cota, sendo inversamente proporcional à altura neste caso. Também é possível observar a influência dos modos de vibração na aceleração, mais facilmente observado no acelerômetro da cota 312.65, onde podemos visualizar uma onda que representa o movimento da estrutura.

Outra comparação interessante é quando analisamos as acelerações nas duas direções simultaneamente, conforme podemos observar na Figura 4.26.

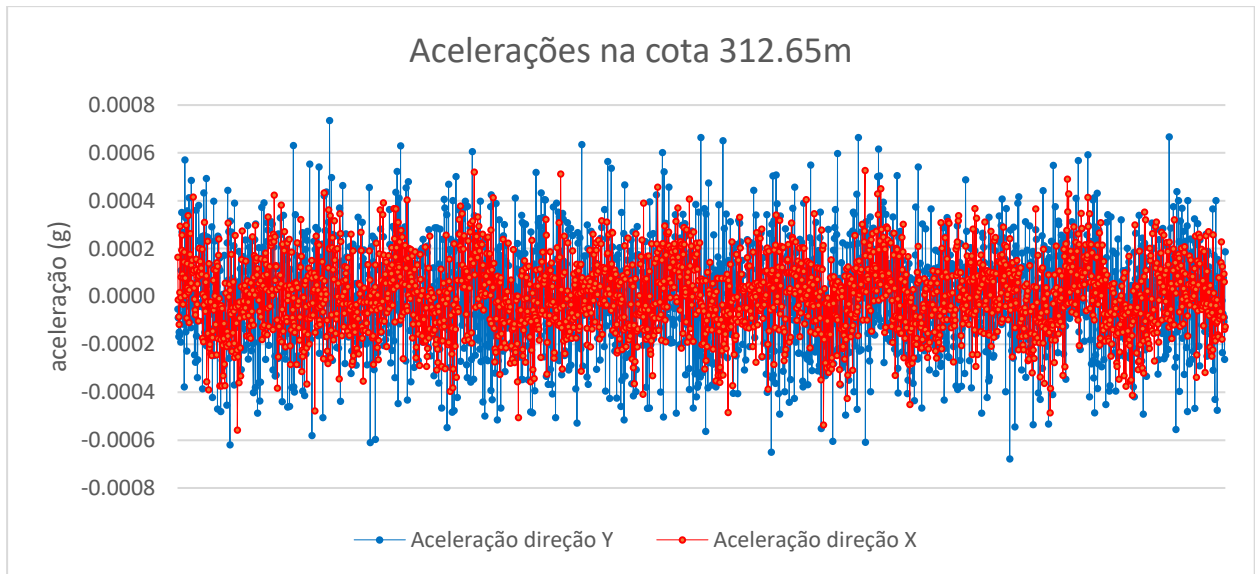


Figura 4.26 – Acelerações nas direções X e Y na cota 312.65m no dia 16/08/2016.

Cabe salientar que a direção X é relativa ao eixo Norte-Sul e a direção Y é relativa ao eixo Oeste-Leste. Através da comparação das duas acelerações no mesmo instante de tempo, se observou um valor absoluto superior para acelerações na direção Y. Levando-se em consideração o que foi exposto anteriormente, como por exemplo a tendência do fluxo de vento variando entre Leste e Sudeste no período em estudo, o aumento da aceleração na direção Y pode ser explicado por uma maior excitação dinâmica da estrutura pelo vento nesta direção, favorecendo os modos de vibração na direção Y.

Através dos dados obtidos até o presente momento, e se utilizando de técnicas de análise abordadas no ensaio de vibração ambiental, também foi possível a obtenção dos principais modos de vibração da estrutura, levando-se em consideração o mesmo período de tempo adotado para análise da direção e velocidade do vento. A seleção de picos através da técnica EFDD pode ser observada na Figura 4.27.

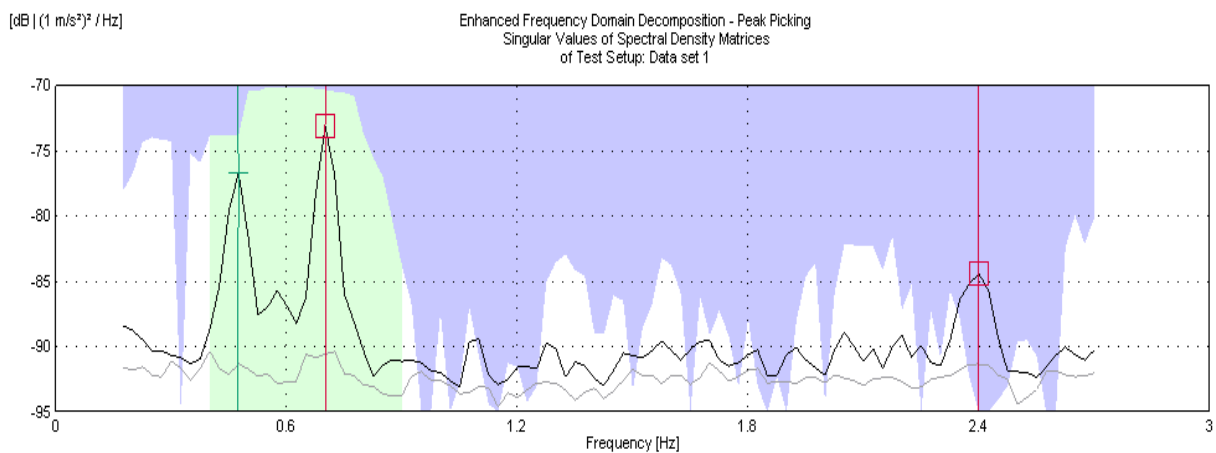


Figura 4.27 - Espectro de densidade de potência na direção X referente ao dia 16/08/2016.

Os três principais modos de vibração obtidos, suas respectivas frequências e coeficientes de amortecimento podem ser observados na Figura 4.28.

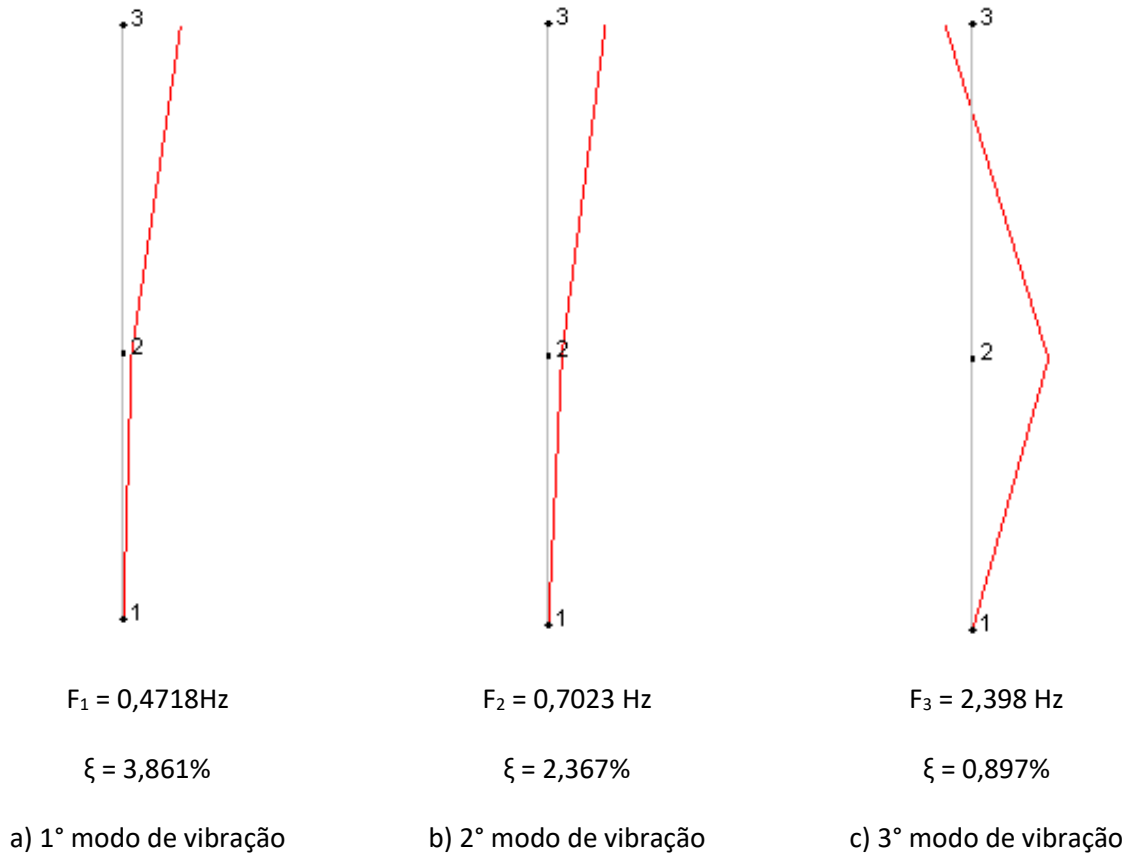


Figura 4.28 – Principais modos de vibração na direção X.

Devido à baixa quantidade de pontos de medição adotados, se torna complexa a visualização gráfica dos modos de vibração, não sendo perceptível grandes alterações entre o primeiro e segundo modo. Conjuntamente, devido à grande influência que o segundo modo sofre pelo palito metálico, a falta de pontos de medição no palito dificulta a análise. Entretanto, mesmo com poucos pontos de referência, as frequências dos três modos apresentaram uma pequena variação comparadas as frequências obtidas no ensaio de vibração ambiental.

5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

A presente dissertação centrou-se na análise experimental do comportamento dinâmico de uma torre de telecomunicações, envolvendo aspetos de modelação numérica, concepção de sistema de monitoramento e validação experimental.

Em relação a modelação (Capítulo 2), o processo de modelação do modelo foi desenvolvido sem dificuldades acrescidas, no entanto, apenas se salientam alguma dificuldade para a atribuição dos apoios dos perfis metálicos HEA de suporte das escadarias, que neste modelo foram considerados como encastramentos perfeitos, entretanto após uma análise detalhada na estrutura se constatou que poderiam ser considerados como um apoio simples visto a geometria dos suportes de apoio. Esta alteração poderá acarretar em uma diferença na rigidez da estrutura.

No capítulo 3 foi abordado a caracterização dos principais modos de vibração da estrutura através de um ensaio de vibração ambiental. Os resultados obtidos através do ensaio se mostraram satisfatórios visto que captaram 4 modos de vibração bem definidos na direção X e 3 modos de vibração na direção Y. Comparando-se os resultados obtidos com os de ensaios anteriores, se observou um refinamento das frequências e uma caracterização mais acentuada dos primeiros modos de vibração.

Os parâmetros modais estimados se mostraram adequados para a calibração de modelos numéricos e para estabelecer uma caracterização dinâmica que pode servir como referência para posteriores avaliações da condição estrutural. O equipamento utilizado e as técnicas de identificação aplicadas permitem obter bons resultados, mesmo em estruturas relativamente rígidas, onde o nível de sinal registado é muito baixo.

Comparando os modos de vibração obtidos através do ensaio de vibração ambiental com os modos de vibração fornecidos pelo modelo numérico, observamos uma correlação significativa entre os modos de vibração, que pode ser indicada pelo alto valor do parâmetro MAC superior a 0,95 para os 4 primeiros modos experimentais. Cabe-se lembrar que devido a estrutura ser duplamente simétrica, também observamos a correlação entre os modos nos dois eixos principais.

Se tratando de frequências, houve uma variação de aproximadamente 3% entre a análise através do modelo numérico e através do ensaio para o primeiro, terceiro e quarto modo de vibração. Já para o segundo modo, uma variação de 21,72% pode ser explicada pela baixa quantidade de pontos de medição no palito metálico, visto que este modo sofre influência relevante da estrutura metálica.

Se tratando do sistema de monitoramento contínuo (Capítulo 4), cabe-se lembrar que até o presente momento foi possível a instalação de apenas uma fração do sistema previsto, devido a fins burocráticos e financeiros. Entretanto, com os equipamentos já instalados até o momento, foi possível uma análise preliminar de suas potencialidades futuras.

Um dos principais objetivos do sistema de monitorização contínua é a caracterização do comportamento dinâmico da torre sobre a ação do vento. Conforme demonstrado anteriormente, o conhecimento da direção e velocidade do vento nas proximidades dos acelerômetros nos permitirão gerar uma correlação entre estas variáveis, possibilitando uma melhor compreensão do comportamento dinâmico da torre.

Em uma análise preliminar, apenas com dois pontos de medição já foi possível a identificação dos 3 primeiros modos de vibração da estrutura. Também ficou evidente a potencialidade do sistema em fornecer dados para diversos estudos, como por exemplo os efeitos de turbulência e efeitos de sombreamento em determinados pontos da estrutura.

As dificuldades enfrentadas para a implantação do sistema de monitoramento foram devidas ao reduzido acesso a determinadas zonas da estrutura e elevadas dimensões, visto que toda a passagem dos cabos e instalação dos sensores foram realizadas manualmente através de toda estrutura, não havendo auxílio para o deslocamento em altura.

5.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Como está dissertação se tornou meio e não fim deste estudo de caso, diversas tarefas estão programadas para serem implementadas. Primeiramente está previsto a instalação de um par acelerômetros DYTRAN a meio vão do palito metálico, possibilitando a representação de forma mais significativa a influência do palito nos modos de vibração.

Visando fornecer dados suficientes em diferentes alturas da direção e velocidade do vento, se propõe a instalação de uma estação meteorológica a partir do topo de uma torre de telecomunicações vizinha. A possibilidade de instalação de um suporte para a estação a partir do topo da estrutura e a uma determinada altura garante uma redução significativa nas interferências possibilitando a captação de um fluxo de vento mais laminar.

Além de dados como a direção e velocidade do vento à meia altura do fuste de betão da torre principal, uma estação meteorológica forneceria dados como temperatura e umidade, possibilitando uma análise dos efeitos de dilatação térmica sofridos pela estrutura. É interessante ressaltar que quando colocada em operação, se tornará uma das melhores estações meteorológicas amadoras do Porto, devido a sua localização privilegiada, fornecendo dados gratuitamente para todos pesquisadores do mundo e incentivando diversas pesquisas em diferentes áreas de conhecimento.

Para o estudo dos efeitos de torção aos quais a torre está submetida, a instalação de sensores de inclinação em diferentes pontos ao longo da altura possibilitaria a análise destes efeitos e complementariam a caracterização do comportamento dinâmico da torre.

Devido a elevada quantidade de dados adquirida, se faz necessário o desenvolvimento de ferramentas computacionais capazes de realizar o processamento dos dados como também o desenvolvimento de filtros capazes de refinar os resultados, eliminando ruídos indesejados, como por exemplo ruídos gerados pela grande quantidade de ondas eletromagnéticas ou a movimentação dos elevadores e de pessoas pela estrutura.

Um estudo de grande importância também seria a determinação da taxa de aquisição ideal, que pudesse representar fielmente as principais características dos fenômenos estudados com a menor quantidade de dados possíveis. Isso acarretaria em uma redução significativa no espaço necessário para armazenamento dos dados e uma menor exigência computacional para processá-los.

Em virtude da calibração do modelo numérico, ensaios para verificação das propriedades dos materiais adotadas que se alteram durante o tempo, como por exemplo ensaios de ultrassons na estrutura de betão, poderiam auxiliar refinando ainda mais o modelo numérico.

Após uma análise global dos efeitos a que a torre está submetida e uma caracterização detalhada do seu comportamento dinâmico, se torna possível o desenvolvimento de intervenções tanto para garantir a saúde estrutural como também para melhorar o comportamento de serviço da estrutura, possibilitando assim uma alteração operacional da estrutura como por exemplo a instalação de um restaurante panorâmico no topo do fuste de betão como previsto inicialmente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antunes, P., Travanca, R., Varum, H., & André, P. (2012). Dynamic monitoring and numerical modelling of communication towers with FBG based accelerometers. *Journal of Constructional Steel Research*, 74, 58–62. <http://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.02.006>
- Beirrow, B., & Osterrieder, P. (2001). D Y N A M I C INVESTIGATIONS OF TV T O W E R S. In *Structural Engineering, Mechanics and Computation (Vol. 1)* (Vol. 1, pp. 629–636).
- Berardengo, M. (2016). DESIGN AND INSTALLATION OF A PERMANENT MONITORING SYSTEM FOR PALAZZO LOMBARDIA IN MILANO , ITALY, 1(October 2015), 5–10.
- Breuer, P., Chmielewski, T., Górski, P., Konopka, E., & Tarczyński, L. (2008). The Stuttgart TV Tower — displacement of the top caused by the effects of sun and wind. *Engineering Structures*, 30(10), 2771–2781. <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.03.008>
- Brincker, R., Xhang, L., & Andersen, P. (2000). Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Doamin Decomposition. *International Modal Analysis Conference (IMAC)*.
- Brownjohn, J. M. W., & Pan, T.-C. (2001). Response of tall buildings to weak long distance earthquakes. *EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS*, (September 2000), 87–114.
- Chen, W. H., Lu, Z. R., Lin, W., Chen, S. H., Ni, Y. Q., Xia, Y., & Liao, W. Y. (2011). Theoretical and experimental modal analysis of the Guangzhou New TV Tower. *Engineering Structures*, 33(12), 3628–3646. <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.07.028>
- Danieli, C. L. De, Comedi, D., & Lunazzi, J. J. (2002). Projeto de instrumentação para ensino, 1–13.
- Jervell, J. T. (2008). Estudo da influência das características do vento no desempenho de aerogeradores
Estudo da influência das características do vento no desempenho de aerogeradores.
- NP EN 1998-1. Eurocódigo 8 – Projecto de estruturas para resistência aos sismos Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios (2010).
- Oliveira, B. D. de C. (2014). *Efeito Dinâmico do Vento em Edifícios Altos*. Dissertação de mestrado do Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Pastor, M., & Binda, M. (2012). Modal Assurance Criterion, 48, 543–548.

<http://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.551>