

DESENVOLVIMENTO DE UM DIGITAL TWIN ESTRUTURAL DE UMA CONSTRUÇÃO HISTÓRICA SOB MONITORIZAÇÃO

JOÃO MARCELO CRUZ LIGUORI

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ESTRUTURAS DE ENGENHARIA CIVIL

Orientador: Professor Doutor António José Coelho Dias Arêde

Coorientador: Professor Doutor José Miguel de Freitas Castro

JULHO DE 2024

MESTRADO EM ESTRUTURAS DE ENGENHARIA CIVIL 2023/2024

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ mestec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil - 2023/2024 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2024.*

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

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

À minha família e amigos

*O saber na ciência e na matemática,
O entendimento na arte,
A acuidade filosófica,
Fizeram o homem uma aventura.*

Fernando Lanhas

AGRADECIMENTOS

Ao concluir este trabalho, gostaria de expressar o meu profundo agradecimento a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para sua realização.

Agradeço ao Professor António Arêde que, além de compartilhar valiosos conhecimentos, esteve sempre disponível e disposto a colaborar com o trabalho. Sinto-me honrado por ter trabalhado sob a sua orientação.

Expresso também a minha gratidão ao meu coorientador, Professor Miguel Castro, pelos ensinamentos transmitidos e pelo apoio prestado, especialmente na área tecnológica, uma componente crucial deste trabalho.

Ao Engenheiro Hélder Silva, por me acompanhar durante esta jornada e fornecer todo o suporte necessário para a elaboração do *digital twin*.

À equipe da Secção de Estruturas e do Instituto para a Construção Sustentável, nomeadamente ao Engenheiro Rui Silva, pelo apoio na modelação estrutural.

Aos amigos que fiz durante o Mestrado, em especial Catalina, Marcelo e Rhaissa. Sem a amizade de vocês, este processo teria sido muito mais difícil.

A Rafael e Ingrid, que, mesmo de longe, sempre me apoiaram, torceram e celebraram cada vitória.

A minha família, por todo o apoio e carinho que sempre me transmitiram. Vocês são o pilar fundamental que sustenta minha jornada. A cada desafio enfrentado, sentia a energia do vínculo que nos une. *Insieme*.

Aos meus padrinhos Luciana e Marcos que, da forma que puderam, estiveram presentes durante o meu percurso e nunca deixaram de torcer por mim.

Ao meu avô, Elmo Cruz, cuja dedicação e excelência na Engenharia Civil inspiram e norteiam a minha trajetória. Às minhas avós Angélica e Dinalva, que sempre foram fontes de força e resiliência para mim.

A Gigi, que esteve comigo antes, durante e estará após esta jornada. Seu apoio não foi apenas importante, mas essencial para a conclusão do meu curso. Cada abraço seu foi uma fonte de força e incentivo imensurável. A sua paciência, compreensão e encorajamento foram fundamentais para eu superar os momentos difíceis e seguir em frente. Sua presença ao meu lado tornou este caminho mais leve. Obrigado por ser o meu lar, onde quer que estejamos, e por acreditar em mim mesmo quando eu duvidava.

Aos meus pais, Ângela e Marcelo, a quem devo tudo o que sou. Obrigado por fazerem tudo o que estava ao alcance de vocês por mim, pelo amor incondicional, seja do Brasil ou ao meu lado no Porto. Vocês sempre foram meu alicerce. A fé de vocês em mim e o constante apoio me motivaram a alcançar meus objetivos por aqui. Se um dia eu puder ser para meus filhos uma fração do que vocês foram para mim, estarei satisfeito. A cada vitória, cada conquista, eu devo a vocês e lembrarei de vocês. Vocês são a base de tudo o que sou e que espero ser.

João Marcelo Cruz Liguori

RESUMO

A indústria da construção enfrenta desafios significativos, incluindo a necessidade de constante atualização de conhecimentos para lidar com novas tecnologias e demandas do mercado. Este trabalho propõe uma abordagem para a gestão do acompanhamento de construções civis, incluindo a monitorização estrutural, por meio da aplicação da Internet das Coisas (IoT) para a recolha contínua de dados em tempo real, os quais são posteriormente integrados num modelo de *digital twin* estrutural.

A monitorização em tempo real de infraestruturas civis tem-se revelado um elemento importante e diferencial para garantir a segurança e a durabilidade das mesmas. A integração da IoT com técnicas de gestão de dados e modelação estrutural avançada, como o *digital twin*, proporciona novas oportunidades para a melhoria da monitorização e manutenção de estruturas.

O *digital twin* estrutural é uma evolução do *digital twin* tradicional, pois, além de replicar virtualmente a estrutura física, inclui resultados detalhados de modelos estruturais. Esta tecnologia permite uma análise detalhada e precisa do comportamento estrutural, facilitando a identificação precoce de potenciais problemas e auxiliando a tomada de decisões pelos gestores. O adequado planeamento e execução da montagem dos instrumentos de monitorização em tempo real das estruturas desempenha um papel crucial neste processo, assim como a adequada integração com a IoT e a gestão dos dados adquiridos, garantindo a qualidade dos resultados obtidos.

O estudo de caso foi realizado com base nos resultados de um projeto que visa acompanhar, por meio de monitorização, uma série de edifícios históricos, localizados numa área de influência de uma nova linha de metro, que exige grandes escavações. Objetivou-se criar um *digital twin* estrutural do Monumento aos Heróis da Guerra Peninsular, também conhecido como Obelisco da Boavista, localizado na Praça de Mouzinho de Albuquerque, no Porto.

Um sistema de monitorização baseado num conjunto de sensores e módulos de aquisição, tratamento e transmissão de dados foi instalado no Obelisco, com o intuito de detetar potenciais assentamentos, vibrações e inclinações na estrutura, causadas pelas obras do metro. Os dados adquiridos são encaminhados para uma plataforma de armazenamento chamada InfluxDB. Utilizando os serviços do Autodesk Platform Services (APS), é possível criar um ambiente *web* que integra um modelo BIM aos dados armazenados na localização definida para os sensores representados no modelo, de modo a constituir um *digital twin*. Simultaneamente, foi desenvolvido um modelo estrutural, utilizando o *software* SAP2000, que visou representar as características do Monumento. Isso foi feito para obter um melhor detalhe da resposta estrutural devido à influência das obras, permitindo complementar os dados obtidos dos sensores reais. Embora não tenha sido realizada de forma automática, foi apresentada a viabilidade da inserção destes dados resultantes das simulações estruturais ao *digital twin*, de modo a constituir o *digital twin* estrutural.

Palavras-chave: monitorização, internet das coisas, gestão de dados, *digital twin*, modelação estrutural

ABSTRACT

The construction industry faces significant challenges, including the need for continuous knowledge updating to deal with new technologies and market demands. This work proposes an approach for managing the monitoring of civil constructions, including structural monitoring, through the application of the Internet of Things (IoT) for continuous real-time data collection, which are subsequently integrated into a structural digital twin model.

Real-time monitoring of civil infrastructure has proven to be an important and differentiating element in ensuring their safety and durability. The integration of IoT with data management techniques and advanced structural modelling, such as the digital twin, provides new opportunities for improving the monitoring and maintenance of structures.

The structural digital twin is an evolution of the traditional digital twin, as it not only virtually replicates the physical structure but also includes detailed results of structural models. This technology allows for detailed and accurate analysis of structural behavior, facilitating the early identification of potential problems and assisting decision-making by managers. Proper planning and execution of the real-time monitoring instrument installation of structures play a crucial role in this process, as well as proper integration with IoT and management of acquired data, ensuring the quality of the results obtained.

The case study was based on the results of a project aimed at monitoring a series of historic buildings, located in an area influenced by a new metro line requiring major excavations. The objective was to create a structural digital twin of the monument called *Monumento aos Heróis da Guerra Peninsular*, also known as the *Obelisco da Boavista*, located in *Praça de Mouzinho de Albuquerque*, in Porto.

A monitoring system based on a set of sensors and data acquisition, processing, and transmission modules was installed on the Monument, aiming to detect potential settlements, vibrations, and inclinations in the structure caused by the metro works. The acquired data are forwarded to a storage platform called InfluxDB. Using Autodesk Platform Services (APS), it is possible to create a web environment that integrates a BIM model with the data stored at the location defined for the sensors represented in the model, thus constituting a digital twin. Simultaneously, a structural model was developed using the SAP2000 software, which aimed to represent the characteristics of the Monument. This was done to achieve a better understanding of the structural response due to the influence of the construction works, and it allowed for the complementing of the data obtained from the real sensors. Although not performed automatically, the feasibility of inserting these data resulting from structural simulations into the digital twin was presented in order to constitute the structural digital twin.

Keywords: monitoring, internet of things, data management, digital twin, structural modelling

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2 ESTADO DA ARTE	3
2.1 INDÚSTRIA 4.0	3
2.1.1 ENQUADRAMENTO HISTÓRICO	3
2.1.2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS	3
2.1.2.1 <i>Internet of Things</i> (IoT)	3
2.1.2.2 Dados e Análise de Dados	4
2.1.2.3 Sensores	5
2.1.2.4 <i>Gateway</i>	6
2.1.2.5 <i>Cloud</i>	6
2.2 MODELAÇÃO BIM	7
2.2.1 ENQUADRAMENTO HISTÓRICO	7
2.2.2 CONCEITO	8
2.2.3 USO DO BIM PARA CONSTRUÇÕES HISTÓRICAS	8
2.2.4 NÍVEL DE DESENVOLVIMENTO E NÍVEL DE DETALHAMENTO	9
2.2.5 ISO 19650	10
2.3 MODELAÇÃO ESTRUTURAL	11
2.3.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	11
2.3.2 PLATAFORMAS DE MODELAÇÃO ESTRUTURAL	13
2.3.2.1 Ansys	13
2.3.2.2 Robot Structural Analysis Professional	14
2.3.2.3 SAP2000	15
2.4 DIGITAL TWIN	15
2.4.1 TIPOS	16
2.4.2 CAMPOS DE UTILIZAÇÃO E DE EXPLORAÇÃO	16
2.5 PLATAFORMAS DE DIGITAL TWIN	18
2.5.1 3DEXPERIENCE (3DX)	18
2.5.2 XEOKIT 3D	18
2.5.3 AUTODESK E O DIGITAL TWIN	19
2.6 DIGITAL TWIN ESTRUTURAL	21
2.7 MONITORIZAÇÃO DE ESTRUTURAS	21
2.8 GESTÃO E VISUALIZAÇÃO DE DADOS	22

2.8.1	INFLUXDB	23
2.8.2	GRAFANA	24
3	CASO DE ESTUDO	27
3.1	MONUMENTO AOS HERÓIS DA GUERRA PENINSULAR	27
3.2	SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO	29
3.3	DISTRIBUIÇÃO DOS INSTRUMENTOS DE MONITORIZAÇÃO	32
3.3.1	DEFINIÇÃO DO NÍVEL DE COLOCAÇÃO DOS INSTRUMENTOS EM ALTURA	33
3.3.2	SECTORIZAÇÃO DOS INSTRUMENTOS	34
3.3.3	AJUSTE DO SISTEMA DE EIXOS	36
3.3.3.1	Sistema de Eixos dos Acelerómetros	36
3.3.3.2	Sistema de Eixos do Clinómetro	38
3.3.4	PROCEDIMENTO DE INSTALAÇÃO	40
3.4	CALIBRAÇÃO DOS SENSORES	44
3.4.1	CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE NÍVEL	44
3.4.2	CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA	45
3.4.3	RESUMO DOS RESULTADOS DAS CALIBRAÇÕES	45
4	IMPLEMENTAÇÃO DO DIGITAL TWIN ESTRUTURAL	47
4.1	DESENVOLVIMENTO DO MODELO BIM	47
4.2	RECOLHA E PROCESSAMENTO DE DADOS	48
4.2.1	TRATAMENTO INICIAL POR TIPOLOGIA DO SENSOR	49
4.2.2	TRATAMENTO DOS SENSORES DE NÍVEL	50
4.2.3	TRATAMENTO DOS CLINÓMETROS	51
4.2.4	TRATAMENTO DOS ACELERÓMETROS	52
4.3	DESENVOLVIMENTO DO MODELO ESTRUTURAL EM SAP2000	52
4.3.1	CALIBRAÇÃO DO MODELO ESTRUTURAL	54
4.3.2	VERIFICAÇÃO SUMÁRIA DO MODELO CALBRADO	59
4.4	PROCEDIMENTO DE DESENVOLVIMENTO DO DIGITAL TWIN	63
4.4.1	IMPLEMENTAÇÃO DA APLICAÇÃO WEB PARA DIGITAL TWIN VIA APS	63
4.4.2	AJUSTE DO DIGITAL TWIN	64
4.5	DIGITAL TWIN ESTRUTURAL	67
4.6	OPERACIONALIDADE DO DIGITAL TWIN ESTRUTURAL	71
5	RESULTADOS	75
5.1	APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS DO DT: SENSORES REAIS	75
5.1.1	ACELERÓMETROS	75
5.1.2	CLINÓMETRO	76
5.1.3	SENSORES DE NÍVEL	77
5.2	INTEGRAÇÃO ENTRE O DT E MODELO ESTRUTURAL: ASSENTAMENTOS IMPOSTOS	79
5.2.1	DESLOCAMENTOS AOS NÍVEIS 29.30 METROS E 37.30 METROS	80
5.2.2	TENSÕES PRINCIPAIS DE TRAÇÃO E DE COMPRESSÃO: NÍVEL 1.63 METROS	81
5.2.3	TENSÕES PRINCIPAIS DE TRAÇÃO E DE COMPRESSÃO: NÍVEL 4.53 METROS	83
5.2.4	TENSÕES PRINCIPAIS DE TRAÇÃO E DE COMPRESSÃO: NÍVEL 8.18 METROS	85
5.2.5	TENSÕES PRINCIPAIS DE TRAÇÃO E DE COMPRESSÃO: NÍVEL 17.40 METROS	87
5.2.6	TENSÕES PRINCIPAIS DE TRAÇÃO E DE COMPRESSÃO: NÍVEL 26.30 METROS	89
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
6.1	CONCLUSÕES	91
6.2	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	92

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
ANEXO A EQUIPAMENTOS DE MONITORIZAÇÃO	97
A.1 SENSORES DE NÍVEL	97
A.2 SENSORES DE ROTAÇÃO – CLINÓMETROS	98
A.3 SENSORES DE TEMPERATURA	98
A.4 ACELERÓMETRO TRIAXIAL COM TRANSMISSÃO SEM FIOS	99
A.5 MÓDULO DE AQUISIÇÃO DE SINAIS ANALÓGICOS E DE TRANSMISSÃO SEM FIOS	100
A.6 MÓDULO DE AGREGAÇÃO DE DADOS E DE SAÍDA (GATEWAY)	100
A.7 ROUTER DE TRANSMISSÃO REMOTA DE DADOS	101
ANEXO B CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE NÍVEL	103
ANEXO C CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA	105

LISTA DE FIGURAS

2.1	Esquema do fluxo de dados	6
2.2	Obtenção de informações para o HBIM	9
2.3	Método dos Elementos Finitos	13
2.4	Autodesk Platform Services (APS)	20
2.5	Editor de <i>queries</i> do InfluxDB	24
2.6	Editor de <i>queries</i> do Grafana	25
3.1	Vista do Monumento aos Heróis da Guerra Peninsular	28
3.2	Topo do Monumento aos Heróis da Guerra Peninsular	28
3.3	Restauro do Monumento aos Heróis da Guerra Peninsular	29
3.4	Sensor de Nível instalado <i>in loco</i>	30
3.5	Clinómetro instalado <i>in loco</i>	30
3.6	Sensor de Temperatura do tipo Pt100	31
3.7	Acelerómetro instalado <i>in loco</i>	31
3.8	Módulos de Aquisição, <i>Gateway</i> e <i>Router</i> instalados <i>in loco</i>	32
3.9	Distribuição dos instrumentos a nível da base	33
3.10	Distribuição dos instrumentos em altura	33
3.11	Modelo Estrutural em Barras no SAP2000 - Modos de Vibração 1 e 2	34
3.12	Níveis de instalação de sensores de monitorização	35
3.13	Sistemas de Referência Global e de Montagem	36
3.14	Sistema de Eixos Local dos Acelerómetros	37
3.15	Representação da Conversão de Eixos do VB_00	37
3.16	Representação da Conversão de Eixos do VB_02	38
3.17	Sistema de Eixos do Clinómetro	38
3.18	Representação da Conversão de Eixos do CL_02	39
3.19	Instalação do Clinómetro	40
3.20	Distribuição e conexão física de sensores e equipamentos na zona Z_00	41
3.21	Localização e conexão física dos sensores e instrumentos instalados no Monumento	41
3.22	Instalações Prévias	42
3.23	Instalações em Altura	43
3.24	Instalações no nível da base	44
4.1	Alçados nascente, norte, sul e poente (da esquerda para a direita) do Monumento	47
4.2	Modelo em Revit do Obelisco - Vista 3D e Alçado Norte	48
4.3	Tratamento de dados por tipologia	50
4.4	Tratamento dos Sensores de Nível	51
4.5	Tratamento dos Clinómetros	51
4.6	Tratamento dos Acelerómetros	52
4.7	Modelo Estrutural em Elementos Sólidos no SAP2000	53

4.8	Janela de propriedades dos materiais	54
4.9	Transformada de Fourier	55
4.10	Diagramas da Amplitude de Fourier	56
4.11	Frequência Natural - Modo de Vibração 1	56
4.12	Frequência Natural - Modo de Vibração 2	57
4.13	Divisão do Modelo Estrutural	58
4.14	Deformadas dos Principais Modos de Vibração	59
4.15	Tensões devido ao Peso Próprio na Secção em Cota 1.63m	60
4.16	Tensões devido ao Peso Próprio na Secção em Cota 4.53m	60
4.17	Tensões devido ao Peso Próprio na Secção em Cota 8.18m	61
4.18	Tensões devido ao Peso Próprio na Secção em Cota 17.40m	61
4.19	Tensões devido ao Peso Próprio na Secção em Cota 26.30m	62
4.20	Extensão no VSCode do Autodesk Platform Services	64
4.21	Modelo Revit dentro do ambiente VSCode	64
4.22	Definições do VB_02 nos arquivos JSON	65
4.23	Ecrã do InfluxDB com a definição dos filtros	66
4.24	Visualização do <i>Digital Twin</i> em ambiente <i>web</i>	66
4.25	Código VBA responsável por Abrir o SAP2000	67
4.26	Código VBA para Atribuir os Deslocamentos e Realizar a Análise no SAP2000	68
4.27	Código VBA para Obter os Deslocamentos a 29.30m e 37.30m	68
4.28	Código VBA para Obter as Tensões e Deformações nos Níveis Determinados	69
4.29	Níveis de Obtenção dos resultados do SAP2000	69
4.30	Código VBA para Gravar os Ficheiros CSV	70
4.31	Visualização do <i>Digital Twin</i> Estrutural	71
4.32	Tela inicial do DTE	71
4.33	Destaque da Região do Topo no DTE	72
4.34	Destaque do SN_02	72
4.35	Seleção da Nova Linha Temporal	73
4.36	Obtenção de um Valor Específico no Gráfico	73
4.37	Menu da Aplicação	74
5.1	Seleção no DT do Sensor Acelerómetro VB_00	75
5.2	Seleção no DT do Sensor Acelerómetro VB_02	76
5.3	Seleção no DT do Sensor Clinómetro CL_02	76
5.4	Seleção no DT do Sensor Clinómetro SN_01	77
5.5	Seleção no DT do Sensor Clinómetro SN_02	77
5.6	Seleção no DT do Sensor Clinómetro SN_03	78
5.7	Seleção no DT do Sensor Clinómetro SN_04	78
5.8	Mapa de Assentamentos Impostos	79
5.9	Seleção do Sensor Virtual do DTE e Deslocamentos em ES (Nível 29.30 metros)	80
5.10	Seleção do Sensor Virtual do DTE e Deslocamentos em ES (Nível 37.30 metros)	80
5.11	Seleção do Sensor Virtual do DTE e Cota da Section Cut (Nível 1.63 metros)	81
5.12	Tensões Principais de Tração na Cota 1.63 metros (Escala: 0 MPa a 3 MPa)	81
5.13	Tensões Principais de Compressão na Cota 1.63 metros (Escala: -3 MPa a 0 MPa)	82
5.14	Seleção do Sensor Virtual do DTE e Cota da Section Cut (Nível 4.53 metros)	83
5.15	Tensões Principais de Tração na Cota 4.53 metros (Escala: 0 MPa a 3 MPa)	83
5.16	Tensões Principais de Compressão na Cota 4.53 metros (Escala: -3 MPa a 0 MPa)	84
5.17	Seleção do Sensor Virtual do DTE e Cota da Section Cut (Nível 8.18 metros)	85
5.18	Tensões Principais de Tração na Cota 8.18 metros (Escala: 0 MPa a 3 MPa)	85
5.19	Tensões Principais de Compressão na Cota 8.18 metros (Escala: -3 MPa a 0 MPa)	86

5.20	Seleção do Sensor Virtual do DTE e Cota da Section Cut (Nível 17.40 metros)	87
5.21	Tensões Principais de Tração na Cota 17.40 metros (Escala: 0 <i>MPa</i> a 3 <i>MPa</i>)	87
5.22	Tensões Principais de Compressão na Cota 17.40 metros (Escala: -3 <i>MPa</i> a 0 <i>MPa</i>) . . .	88
5.23	Seleção do Sensor Virtual do DTE e Cota da Section Cut (Nível 26.30 metros)	89
5.24	Tensões Principais de Tração na Cota 26.30 metros (Escala: 0 <i>MPa</i> a 3 <i>MPa</i>)	89
5.25	Tensões Principais de Compressão na Cota 26.30 metros (Escala: -3 <i>MPa</i> a 0 <i>MPa</i>) . . .	90
B.1	Calibração do sensor de nível SN_01	103
B.2	Calibração do sensor de nível SN_02	103
B.3	Calibração do sensor de nível SN_03	104
B.4	Calibração do sensor de nível SN_04	104
B.5	Calibração do sensor de nível SN_00_Ref	104
C.1	Calibração do sensor de temperatura T_01	105
C.2	Calibração do sensor de temperatura T_03	106
C.3	Calibração do sensor de temperatura T_Ref	106

LISTA DE TABELAS

2.1	LOD em BIM	10
3.1	Resumo da Calibração dos Sensores de Nível e de Temperatura	45
4.1	Modos de Vibração - Período, Frequência e Participação de Massa	58
4.2	Valores integrados da Section Cut a 26.30m	62
A.1	Especificações técnicas – Sensor de Nível	97
A.2	Especificações técnicas – Clinómetro	98
A.3	Especificações técnicas – Sensor de Temperatura	99
A.4	Especificações técnicas – Acelerómetros	99
A.5	Especificações técnicas - Módulo de Aquisição de Dados de Tensão	100
A.6	Especificações técnicas - Agregador de Dados ou <i>Gateway</i>	101
A.7	Especificações técnicas - <i>Router</i>	102

ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AEC	Arquitetura, Engenharia e Construção
API	<i>Application Programming Interface</i> , ou Interface de Programação de Aplicação
APS	<i>Autodesk Platform Services</i>
BIM	<i>Building Information System</i> , ou Modelação de Informação da Construção
B-rep	<i>Boundary Representation</i> , ou Representação de Fronteira
CAD	<i>Computer-Aided Design</i> , ou Desenho Assistido por Computador
CAE	<i>Computer-Aided Engineering</i> , ou Engenharia Assistida por Computador
CSI	<i>Computers & Structures, Inc.</i>
CSG	<i>Constructive Solid Geometry</i> , ou Geometria Sólida Construtiva
DEC	Departamento de Engenharia Civil
DT	<i>Digital twin</i> , ou Gémeo digital
DTA	<i>Digital Twin Aggregate</i> , ou Agregado de Gémeo Digital
DTE	<i>Digital twin</i> estrutural, ou Gémeo digital estrutural
DTE_{env}	<i>Digital Twin Environment</i> , ou Ambiente de Gémeo Digital
DTI	<i>Digital Twin Instance</i> , ou Instância de Gémeo Digital
DTP	<i>Digital Twin Prototype</i> , ou Protótipo de Gémeo Digital
ES	Estado de Serviço
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FFT	Transformada Rápida de Fourier
HBIM	<i>Heritage Building Information Modelling</i> , ou Modelação de Informação de Construções Históricas
IoT	<i>Internet of Things</i> , ou Internet das Coisas
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> , ou Organização Internacional de Normalização
JSON	<i>JavaScript Object Notation</i>
LOD	<i>Level of Development</i> , ou Nível de Desenvolvimento
MEF	Método dos Elementos Finitos
NoSQL	<i>Not Only Structured Query Language (SQL)</i> , ou Não Apenas SQL
PLM	<i>Product Lifecycle Management</i> , ou Gestão do Ciclo de Vida de um Produto
PP	Peso Próprio
RGPD	Regulamento Geral sobre a Proteção de Dados
SQL	<i>Structured Query Language</i>
STEM	Ciência, Tecnologia, Engenharia e Matemática
TSDB	<i>Time Series Database</i> , ou Bases de Dados de Séries Temporais
VBA	<i>Visual Basic for Application</i>
VPN	<i>Virtual Private Network</i> , ou Rede Virtual Privada
VSCode	<i>Visual Studio Code</i>

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Embora se saiba que a indústria da construção tenha, tradicionalmente, uma resistência a grandes mudanças, há uma necessidade crescente e praticamente forçada a se adaptar às tendências contemporâneas. Para manter sua competitividade, é necessário inovar e explorar todas as soluções viabilizadas pelas novas tecnologias. Nesse contexto, a digitalização da indústria está em ascensão, evidenciada pelo aumento significativo do uso de ferramentas e metodologias, como o *digital twin*.

A Indústria 4.0, ou quarta revolução industrial, está estreitamente ligada à transformação digital, incorporando sistemas inteligentes e técnicas de produção inovadoras. Essas mudanças impactam os modelos de negócio, resultando em melhorias na eficiência dos processos de produção e na redução de custos, graças à autonomia dos processos. O conceito de gêmeo digital, que está diretamente ligado à Indústria 4.0, engloba uma série de modelos virtuais que representam integralmente um produto físico fabricado, abrangendo desde sua estrutura atômica até sua forma macroscópica. Em sua plenitude, todas as informações adquiridas ao analisar um produto físico fabricado podem ser acessadas por meio de seu equivalente digital.

O enfoque desta dissertação está no âmbito da monitorização de estruturas, que viabiliza a criação de um gêmeo digital estrutural para a visualização de dados em tempo real num modelo de BIM e de resultados de simulações em um modelo estrutural, representativo de uma construção situada na cidade do Porto. Adicionalmente, foi desenvolvido um modelo estrutural para fundamentar o *digital twin* estrutural e fornecer informações num ambiente *web*.

Esta investigação decorre em paralelo com um projeto de monitorização de edifícios históricos adjudicado à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) pela Metro do Porto, S.A., no contexto da avaliação e observação do comportamento estrutural de imóveis sensíveis localizados na área de influência da *Linha Circular do Metro do Porto - Troço Casa da Música / S. Bento*. É conduzida com a liderança do Professor António Arêde, responsável pela condução da instalação do sistema de monitorização e com a colaboração de uma equipa do Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da FEUP (LE-FEUP).

1.2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver um *Digital twin* estrutural, ou Gémeo digital estrutural (DTE) acessível via *web*. Esse sistema permitirá que usuários autorizados obtenham, em tempo real, dados de monitorização e cálculos estruturais relacionados ao objeto de estudo. Enquanto um *Digital twin*, ou Gémeo digital (DT) comum oferece apenas resultados de monitorização, este proporcionará uma análise mais abrangente, integrando dados e resultados de análises estruturais.

A partir disso, pode-se listar os principais objetivos do trabalho com os seguintes pontos:

- Apresentar o estado da arte do desenvolvimento de DT e DTE;
- Desenvolver um modelo BIM do Monumento aos Heróis da Guerra Peninsular para que possa ser transferido para um ambiente *web*;
- Desenvolver um modelo estrutural do Monumento para que seja utilizado como recurso para cálculo estrutural;
- Integrar os modelos aos dados disponibilizados pelos sistemas de monitorização e assegurar que essas informações e os resultados dos cálculos estruturais são fiáveis.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Após o presente Capítulo “Introdução”, onde se apresenta um enquadramento geral da dissertação, explicitando-se os objetivos a atingir e a estrutura seguida, segue-se o Capítulo 2, intitulado “Estado de Arte”. Este capítulo examina a literatura relevante que explora os temas tratados no documento, servindo como apresentação e enquadramento dos tópicos importantes para a criação de um *digital twin* e para a monitorização de estruturas.

O Capítulo 3 aborda o caso de estudo da dissertação, incluindo uma breve descrição da edificação monitorizada e do *digital twin* desenvolvido. Explica a justificativa da monitorização, bem como o procedimento de instalação e calibração dos instrumentos utilizados.

O quarto capítulo detalha todos os passos a serem realizados em ambiente digital após a instalação dos instrumentos, visando a implementação do *digital twin* estrutural. Explica o desenvolvimento do modelo *Building Information System*, ou Modelação de Informação da Construção (BIM) e o processo de tratamento dos dados de monitorização. Além disso, abrange o desenvolvimento do modelo estrutural e do *digital twin*. Por fim, apresenta a integração dos resultados do modelo estrutural com o DT e os dados da monitorização, que resulta no *digital twin* estrutural.

O quinto capítulo, destinado às considerações finais, resume as conclusões e os contributos do trabalho realizado. Apresenta também sugestões para desenvolvimentos futuros.

2

ESTADO DA ARTE

2.1. INDÚSTRIA 4.0

2.1.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

A Indústria 4.0, também conhecida como *Industrie 4.0* ou *Industry 4.0*, também é referida como a 4ª Revolução Industrial. Com isso, é necessário contextualizar historicamente a presente situação e a evolução da tecnologia ao longo dos tempos.

Xu et al. (2018) descrevem essa contextualização histórica até a presente situação. A Primeira Revolução Industrial, iniciada no final do século XVIII, chamada a Era do Vapor, foi marcada pela introdução e disseminação dos sistemas de fabricação mecânicos movidos à água e a vapor. Isso levou ao aumento significativo na produção e eficiência dos sistemas têxteis, de mineração e de transportes. A Segunda Revolução Industrial, no final do século XIX, teve como base a utilização em massa da eletricidade como fonte de energia para a produção industrial. Isso permitiu a utilização de motores elétricos muito mais eficientes, o que resultou no aumento da quantidade e da velocidade de produção e em novas práticas industriais com linhas de montagem.

A Terceira Revolução Industrial começou no final do século XX, com a introdução de eletrônicos e da Tecnologia da Informação e Comunicação. Essa época é chamada de Era da Informação, pois a partir disso foi possível a criação de processos industriais mais eficientes e flexíveis. Finalmente, a Indústria 4.0 foi um conceito disseminado a partir de uma iniciativa do Governo Alemão, como parte do seu “Plano de Ação Estratégica de Alta Tecnologia 2020”, cujo objetivo era promover a informatização da manufatura e a integração de dados. Esse termo foi utilizado pela primeira vez em 2011, durante a Feira de Hannover, e o relatório final do Grupo de Trabalho da Indústria 4.0 foi apresentado em 2013 (Xu et al., 2018).

2.1.2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.1.2.1. *Internet of Things* (IoT)

“No mundo real, as coisas importam mais do que ideias”. Esta afirmação de Kevin Ashton, em 2009, reiterou o termo que ele próprio criara em 1999: *Internet of Things*, ou Internet das Coisas (IoT). Ashton (2009) sugeriu que os computadores, e consequentemente a *Internet*, dependem quase inteiramente dos

seres humanos para obter informações. Ele propôs que se os seres humanos capacitarem os computadores com meios de recolha de informação próprios, estes poderiam perceber o mundo por si próprios, identificando quando as coisas precisam ser substituídas, reparadas ou recolhidas, e determinar se estão novas ou ultrapassadas.

Embora esse tipo de reflexão levante diversos questionamentos éticos, é crucial reconhecer que o impacto, positivo ou negativo, da *internet* das coisas pode ser ainda maior do que o da *internet* isoladamente. A capacidade de análise em tempo real é particularmente valiosa em contextos onde a agilidade na tomada de decisões é essencial. Ao proporcionar um ponto de vista a mais, a IoT permite que gestores e profissionais estejam mais bem informados ao tomar decisões cruciais. Além disso, ao combinar a *internet* das coisas com tecnologias como inteligência artificial e análise de dados avançada, é possível extrair *insights* ainda mais relevantes a partir dos dados coletados.

Outro benefício importante da IoT é sua capacidade de antecipar problemas antes mesmo que eles se manifestem de forma evidente. Ao monitorizar continuamente o estado de equipamentos e sistemas, é possível poder detetar sinais de falha ou degradação iminente, permitindo intervenções proativas para evitar interrupções não planeadas nas operações. Essa abordagem de manutenção preventiva não só reduz os custos associados a paralisações e reparos de emergência, mas também prolonga a vida útil dos ativos e melhora a fiabilidade dos processos empresariais.

Para que isso seja viável, é necessário instalar uma rede de sensores e instrumentos de conexão para transformar dados avulsos em informação. Embora a *internet* das coisas já esteja presente em estruturas complexas de empresas, objetos como frigoríficos, óculos, elevadores e carros também estão conectados. Contudo, a IoT requer um sistema bem integrado de *hardware* e *software* para promover a integração e, às vezes, a interpretação dos dados.

2.1.2.2. Dados e Análise de Dados

É notório o crescente reconhecimento da importância dos dados no quotidiano das pessoas, destacando-se a implementação do Regulamento Geral sobre a Proteção de Dados (RGPD) em Portugal. Contudo, constata-se uma lacuna de compreensão acerca do conceito de dados, mesmo entre aqueles que buscam protegê-los. Dados, por definição, são conjuntos de valores que transmitem informação e podem ser formalmente interpretados. Quando devidamente reunidos e estruturados, tornam-se ferramentas fundamentais na tomada de decisões, muitas vezes apresentados em tabelas para conferir contexto e significado.

Neste contexto, em 2006, Clive Humby estabeleceu uma analogia entre dados e petróleo, salientando a sua grande relevância, porém, ressaltando a necessidade de processamento para que se tornem verdadeiramente úteis. Assim como o petróleo requer refinamento para ser aproveitado em diversas atividades lucrativas, os dados demandam análise para se converterem em recursos valiosos.

A análise de dados é um procedimento que abarca a deteção de padrões, tendências e correlações em vastos conjuntos de dados, visando oferecer dados pertinentes que direcionem a tomada de decisões.

Seu percurso tem início com a aplicação de métodos simples, como tabelas e gráficos, para representar informações e dados.

Há alguns tipos de análise de dados, dentre os quais se destacam:

- Análise descritiva: envolve descrever padrões e tendências nos dados usando estatísticas descritivas, tabelas e gráficos.
- Análise exploratória: implica investigar mais profundamente os dados, procurando identificar relações entre variáveis, detetar valores atípicos e compreender a distribuição dos dados.
- Análise preditiva: usa técnicas de modelação estatística para prever o comportamento ou o valor futuro de uma variável.
- Análise prescritiva: utiliza técnicas de modelação para recomendar ações ou decisões com base nos dados.

2.1.2.3. Sensores

Os sensores inteligentes são dispositivos fundamentais em sistemas de IoT, desempenhando um papel crucial na aquisição e processamento de dados ambientais ou de equipamentos. Geralmente, um sensor inteligente é composto por três elementos principais: o próprio sensor responsável pela captura dos dados do ambiente ou equipamento; um microprocessador que realiza cálculos e processamentos baseados em algoritmos programados; e recursos de comunicação que transmitem as informações processadas para sistemas externos ou atuadores. Esses componentes trabalham sinergicamente para fornecer informações úteis para monitorização, controle e automação de processos (Pinto, 2023).

Pinto (2023) ainda indica que há outros dispositivos para melhorar suas capacidades e funcionalidades, tais quais transdutores para converter um tipo de sinal em outro, transcetores para comunicação sem fio, amplificadores para aumentar o sinal de entrada, filtros analógicos para eliminar ruídos indesejados e uma fonte de alimentação para fornecer energia ao sistema.

A função primordial dos sensores é coletar uma extensa gama de dados referentes aos parâmetros na região em que estão instalados, os quais são então convertidos em um formato passível de processamento e transmissão, preferencialmente *wireless*. No entanto, é crucial que esses dados sejam posteriormente reconvertidos em uma forma para que o utilizador possa realizar a leitura e interpretação.

É ainda no contexto dos sensores que surge o conceito de *sampling rate*, ou taxa de amostragem, que define o intervalo regular em que o *software* solicita o retorno do sinal. Esta taxa corresponde à frequência de recolha: por exemplo, a 10 Hz, são recolhidos 10 dados por segundo. Se a frequência for muito baixa, a informação será perdida e a representação do sinal será imprecisa. Se for muito alta, o sinal pode conter ruído excessivo e aumentar o tempo de processamento e uso de memória. A frequência sugerida pelo aparelho deve ser considerada, muitas vezes fornecendo sugestões para diferentes sinais (Silva, 2022).

2.1.2.4. Gateway

As *gateways* atuam como intermediários entre os sensores e a infraestrutura de computação em nuvem ou um equipamento dedicado, que pode estar próximo ao local da própria *gateway*. Uma multiplicidade de dispositivos estabelecerá comunicação com este equipamento, que, por sua vez, agregará e transmitirá essas informações para a infraestrutura em nuvem, conforme apresenta a Figura 2.1.



Figura 2.1: Esquema do fluxo de dados
Fonte: Move Solutions (s.d.), adaptado

A existência desta *interface* intermediária, que torna a comunicação indireta, é justificada, entre outros motivos, pelo consumo energético dos sensores, o qual aumenta com a distância da conexão. As *gateways* têm a capacidade de processar e filtrar dados, reduzindo assim a demanda por capacidade de armazenamento e diminuindo a latência ao permitir o processamento local na *gateway*, em detrimento do processamento na nuvem (McClelland, 2017).

2.1.2.5. Cloud

A ideia por trás do termo *cloud* ou “nuvem” refere-se a uma infraestrutura composta por servidores distribuídos globalmente, conectados entre si mediante redes *intranets* e/ou da *internet*. Esses servidores desempenham funções distintas, mas operam de forma integrada, formando um sistema unificado (Silva, 2022).

No contexto da IoT, a nuvem desempenha um papel crucial na agregação e análise de dados provenientes de uma ampla variedade de dispositivos interconectados. Essa abordagem possibilita análises mais profundas e escalabilidade para sistemas com abundância de sensores, facilitando a tomada de decisões inteligentes.

No entanto, apesar dos benefícios oferecidos pela computação em nuvem no IoT, existem desafios significativos a serem enfrentados. Questões relacionadas à posse de dados, segurança da informação e privacidade representam preocupações importantes para empresas e indivíduos que utilizam esses sistemas. Além disso, a dependência da conectividade com a *internet* pode resultar em problemas de latência e disponibilidade, especialmente em ambientes críticos, como saúde e segurança (McClelland, 2020).

2.2. MODELAÇÃO BIM

2.2.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

O BIM é uma abordagem revolucionária na indústria da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), conforme apresentam Zuppa et al. (2009). Surgiu como resposta às limitações dos desenhos tradicionais em 2D e à necessidade de uma forma de trabalho mais integrada e colaborativa. As origens do BIM remontam aos anos 1970, quando o uso de computadores na arquitetura e engenharia começou a ganhar tração.

Entretanto, para perceber melhor o que a modelação BIM representa, vale a pena olhar a evolução que a AEC passou até chegar à presente situação. Um dos principais passos para a incorporação da informática ao universo da engenharia foi com a introdução da tecnologia *Computer-Aided Design*, ou Desenho Assistido por Computador (CAD), que permitia o desenho, edição e visualização das informações e tornou o processo muito mais eficiente, ainda em 2D.

Eastman et al. (2011) explicam que desde 1960, a modelação 3D tem sido uma área importante de pesquisa. Inicialmente, duas formas de modelação sólida foram desenvolvidas e competiram pela supremacia. A abordagem de *Boundary Representation*, ou Representação de Fronteira (B-rep) representava formas como um conjunto fechado e orientado de superfícies limitadas. Na abordagem alternativa, a *Constructive Solid Geometry*, ou Geometria Sólida Construtiva (CSG) representava uma forma como um conjunto de funções que definem os poliedros primitivos e armazenava uma fórmula algébrica para definir uma forma, enquanto a B-rep armazenava os resultados da definição como um conjunto de operações e argumentos de objetos.

Ainda segundo Eastman et al. (2011), esses dois métodos competiam para determinar qual era a melhor abordagem. Logo foi reconhecido que os métodos deveriam ser combinados. Hoje, todas as ferramentas de modelação paramétrica e todos os modelos de construção incorporam ambas as representações, uma semelhante à CSG para edição, e a B-rep para visualização, medição, deteção de conflitos e outros usos não relacionados à edição.

Concebido na década de 1970 e amplamente adotado a partir dos anos 1980, o BIM tornou-se mais difundido posteriormente com a divulgação de um *whitepaper* pela Autodesk. Essencialmente, o BIM engloba um conjunto de recursos que viabilizam a construção de modelos digitais tridimensionais baseados em objetos. Estes modelos contêm dados específicos relacionados a cada objeto representado (Silva, 2022).

À medida que a indústria reconhecia cada vez mais o potencial do BIM para melhorar a colaboração, coordenação e eficiência ao longo do ciclo de vida de um projeto, a sua adoção crescia. Hoje, o BIM tornou-se uma prática padrão em muitos projetos de construção de grande escala e está pronto para continuar a evoluir com os avanços tecnológicos e os padrões da indústria.

2.2.2. CONCEITO

O conceito fundamental subjacente à modelação BIM é a criação e utilização de modelos digitais tridimensionais que incorporam informações geométricas e paramétricas, além de dados relacionados ao ciclo de vida do projeto. Esses modelos facilitam a colaboração entre os diferentes gestores de projeto e promovem uma abordagem geral para o projeto e gestão de construção de edifícios e infraestruturas (Azhar et al., 2012).

O BIM possibilita a gestão abrangente de todos os aspetos de um projeto de construção, incluindo processos de *design* e construção, bem como a gestão do ciclo de vida do edifício. Informações sobre os componentes do edifício, materiais, custos e cronogramas podem ser incorporadas ao modelo BIM, fornecendo uma plataforma abrangente e colaborativa para todas as partes interessadas envolvidas no projeto. Além disso, a interoperabilidade dos modelos BIM com outros *softwares* e sistemas de gestão de informações aumenta a eficiência e a precisão das decisões tomadas ao longo do ciclo de vida do projeto (Eastman et al., 2011).

2.2.3. USO DO BIM PARA CONSTRUÇÕES HISTÓRICAS

O BIM, inicialmente concebido para o desenho arquitetónico com foco em objetos paramétricos, enfrenta limitações quando aplicado a elementos históricos devido à alta irregularidade e formatos únicos encontrados nesses casos, além da escassez de bibliotecas BIM com elementos históricos mais complexos (Santos et al., 2023). Embora Silva (2022) observe que não é possível ainda utilizar mecanismos totalmente automáticos para a modelação de construções históricas, destaca-se que há resultados promissores em modelações que seguem o mesmo *modus operandi* da criação de *interfaces* de videojogos.

É crucial notar que a aplicação de BIM para construções históricas, chamado *Heritage Building Information Modelling*, ou Modelação de Informação de Construções Históricas (HBIM), vai além do aspeto geométrico e paramétrico dos objetos, desempenhando um papel significativo no enriquecimento dos dados relativos a um elemento Santos et al. (2023). Um infográfico combinando informações de Silva (2022) e Santos et al. (2023) sobre os procedimentos e as informações necessárias para a criação de um modelo HBIM foi desenvolvido e é apresentado na Figura 2.2.

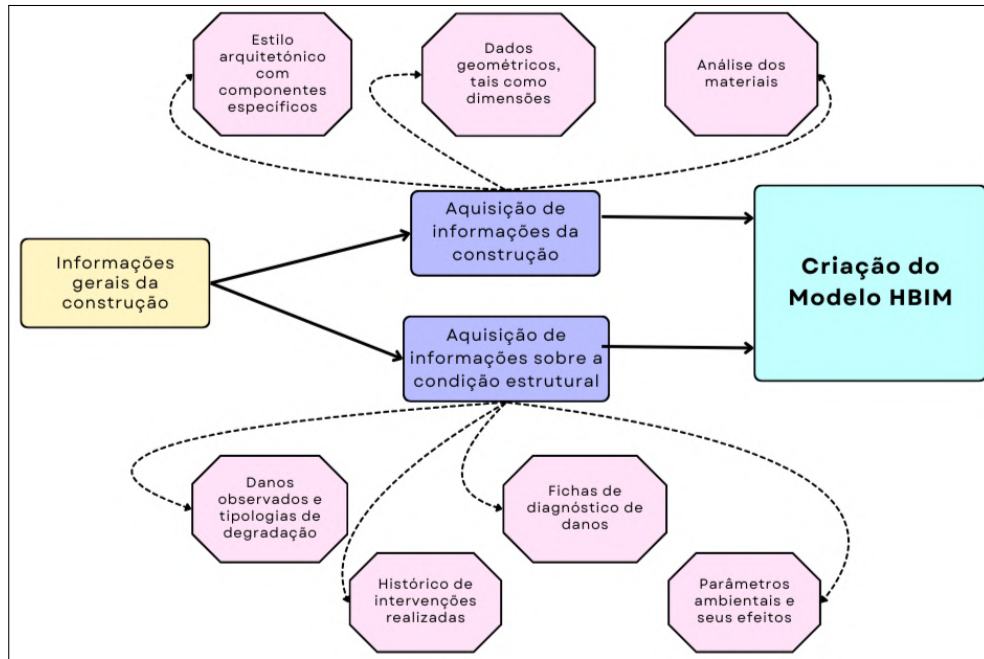


Figura 2.2: Obtenção de informações para o HBIM
 Fonte: Silva (2022) e Santos et al. (2023), adaptados

2.2.4. NÍVEL DE DESENVOLVIMENTO E NÍVEL DE DETALHAMENTO

Ambos os conceitos podem parecer semelhantes e, por vezes, pode parecer confuso para o utilizador geral da modelação BIM. Segundo Narciso (2016) que cita Baptista (2015), o nível de detalhamento se refere apenas ao grau de pormenorização dos elementos modelados no quesito visual. Já o *Level of Development*, ou Nível de Desenvolvimento (LOD) condiz especificamente à quantidade de informação parametrizada que está inserida no modelo trabalhado. Essas informações se referem tanto ao quesito visual, como dimensões, mas também pode incluir informações de materiais, fabricantes, composição, e características intrínsecas ao objeto modelado.

O *American Institute of Architects* criou, durante a Exposição de Dados Digitais BIM E202, em 2009, uma especificação que uniformiza o mínimo de informação para cada um dos LOD. Em 2013, essa especificação foi atualizada e foi criado o Formulário de Protocolo BIM do Projeto G202, de modo a fornecer as definições e a informação mínima requerida consoante o LOD exigido e definiu 5 níveis de desenvolvimento dos elementos, apresentados na Tabela 2.1.

LOD 100	
	Elementos do modelo representados graficamente ou por símbolos, sem detalhes de forma, tamanho ou localização precisa.

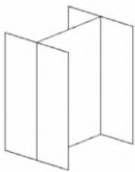
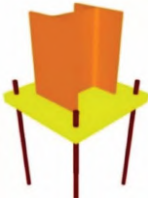
LOD 200	
	Elementos reconhecidos com aproximação em tamanho, forma, localização e orientação, com possibilidade de adição de informações não gráficas.
LOD 300	
	Elementos modelados com precisão em quantidade, tamanho, forma, localização e orientação, permitindo medições diretas no modelo e adição de informações não gráficas.
LOD 350	
	Representação gráfica detalhada do elemento como um sistema ou conjunto específico, incluindo interfaces com outros sistemas, com adição de informações não gráficas.
LOD 400	
	Modelação detalhada e precisa dos elementos para fabricação do componente, com medições diretas a partir do modelo e adição de informações não gráficas.
LOD 500	
Verificação de campo (<i>as-built</i>) para confirmar tamanho, forma, localização, quantidade e orientação dos elementos, sem alteração na sua geometria.	

Tabela 2.1: LOD em BIM

Fonte: Utilizando BIM (2019), adaptado

2.2.5. ISO 19650

A *International Organization for Standardization*, ou Organização Internacional de Normalização (ISO) publicou a série internacional de normas ISO 19650, visando apoiar a gestão da informação ao longo do ciclo de vida de ativos construídos e em construção, utilizando BIM (Nour El-Din et al., 2022). Esta série aborda a organização e digitalização de informações sobre edifícios e obras de engenharia civil, oferecendo uma estrutura padronizada para a modelação de informações de construção e gestão de

dados.

Cada parte da série ISO 19650 desempenha um papel específico e complementar na facilitação da gestão da informação, conforme apresenta Silva (2022):

i) **Parte 1: Conceitos e princípios gerais**

Estabelece uma base sólida de conceitos e princípios, fornecendo uma referência conceptual e terminológica essencial para as partes subsequentes. Silva (2022) destaca que no Capítulo 5 da Parte 1 são apresentadas informações cruciais sobre as exigências de informação para a construção de um modelo BIM de forma abrangente. Inclui, portanto, aspectos organizacionais, relacionados aos ativos¹, ao projeto e às trocas de informações, proporcionando uma visão completa do processo.

ii) **Parte 2: Fase de entrega de ativos**

Aborda a fase de desenvolvimento do ativo, fornecendo diretrizes e princípios para a entrega de informações e documentação durante esta fase crítica do processo de construção.

iii) **Parte 3: Processos de desenvolvimento e gestão da informação durante a fase de construção**

Enfatiza a importância da gestão eficaz das informações durante a fase operacional do ativo, oferecendo orientações sobre como manter e utilizar os dados de forma eficiente após a conclusão do projeto.

iv) **Parte 4: Troca da informação**

Explora aspectos específicos do fluxo de informações digitais, particularmente relacionados ao uso do BIM, garantindo uma compreensão detalhada e abrangente dos processos envolvidos.

v) **Parte 5: Requisitos de segurança da informação**

Detalha as exigências ao nível da informação e define as trocas de informações essenciais entre diferentes componentes organizacionais e de projeto, destacando a importância da colaboração e comunicação eficazes.

Essas partes oferecem uma estrutura abrangente para a gestão da informação em projetos de construção, desde a conceção até a operação, promovendo uma abordagem padronizada e eficiente para a organização e compartilhamento de dados.

2.3. MODELAÇÃO ESTRUTURAL

2.3.1. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A modelação estrutural por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma abordagem fundamental na análise de estruturas complexas, permitindo a resolução de problemas que desafiam os métodos analíticos tradicionais. De acordo com Azevedo (2003), o MEF visa determinar o estado de tensão e deformação de sólidos de geometria arbitrária sujeitos a ações exteriores. Essa técnica numérica, amplamente utilizada na engenharia, envolve a subdivisão da estrutura em pequenos elementos com geometria simplificada, facilitando a análise computacional.

¹ A norma ISO 19650 refere que os ativos são elementos ou instalações construídas que estão sendo administradas no projeto.

A história do MEF remonta ao seu desenvolvimento ao longo do tempo, marcado por avanços significativos que moldaram a sua aplicação na engenharia estrutural. Conforme descrito por Azevedo (2003), a publicação mais antiga que utiliza a designação “elemento finito” data de 1960, atribuída a Ray Clough, embora técnicas precursoras já fossem conhecidas anteriormente. Esses primeiros passos na evolução do método estabeleceram as bases para a sua posterior expansão e refinamento.

Durante a década de 60 e início da de 70, o MEF passou por um período de intensa evolução, com a preferência inicial por elementos finitos triangulares e tetraédricos, posteriormente substituídos por quadriláteros e hexaedros. Essa transição refletiu avanços na modelação de estruturas mais complexas e na melhoria da precisão das análises realizadas pelo método.

O MEF é empregado para modelar estruturas como conjuntos de elementos finitos, conectados por nós com graus de liberdade determinados, permitindo a resolução de equações algébricas simultâneas em computadores digitais. Esta abordagem simplificada, baseada na resolução de equações algébricas, possibilita uma análise eficiente e precisa da estrutura em questão (Cook et al., 1989).

Conforme visto na Figura 2.3a, essa representação visual da subdivisão de uma estrutura em elementos finitos ilustra a abordagem adotada pelo MEF para simplificar a modelação estrutural. Essa subdivisão permite a análise computacional eficiente da estrutura, fornecendo informações detalhadas sobre o estado de tensão e deformação em diferentes regiões da mesma.

O Método dos Elementos Finitos, ao longo dos anos, expandiu a sua aplicação para além da análise de tensões e deformações em estruturas, abrangendo áreas como transferência de calor, fluxo de fluidos e campos elétricos e magnéticos. Essa diversificação de aplicações demonstra a versatilidade e a adaptabilidade do MEF para resolver uma ampla gama de problemas em diferentes campos da engenharia (Cook et al., 1989).

Atualmente, o MEF é amplamente utilizado como uma ferramenta essencial na análise estrutural, substituindo métodos analíticos tradicionais em muitas situações devido à sua eficiência e precisão. Como se pode ver na Figura 2.3b, a malha deformada de uma estrutura representada sobre a estrutura não deformada destaca as deformações resultantes das cargas aplicadas. Além disso, as tensões principais e as suas direções numa estrutura fornecem informações cruciais para a avaliação do comportamento estrutural (Figura 2.3c).

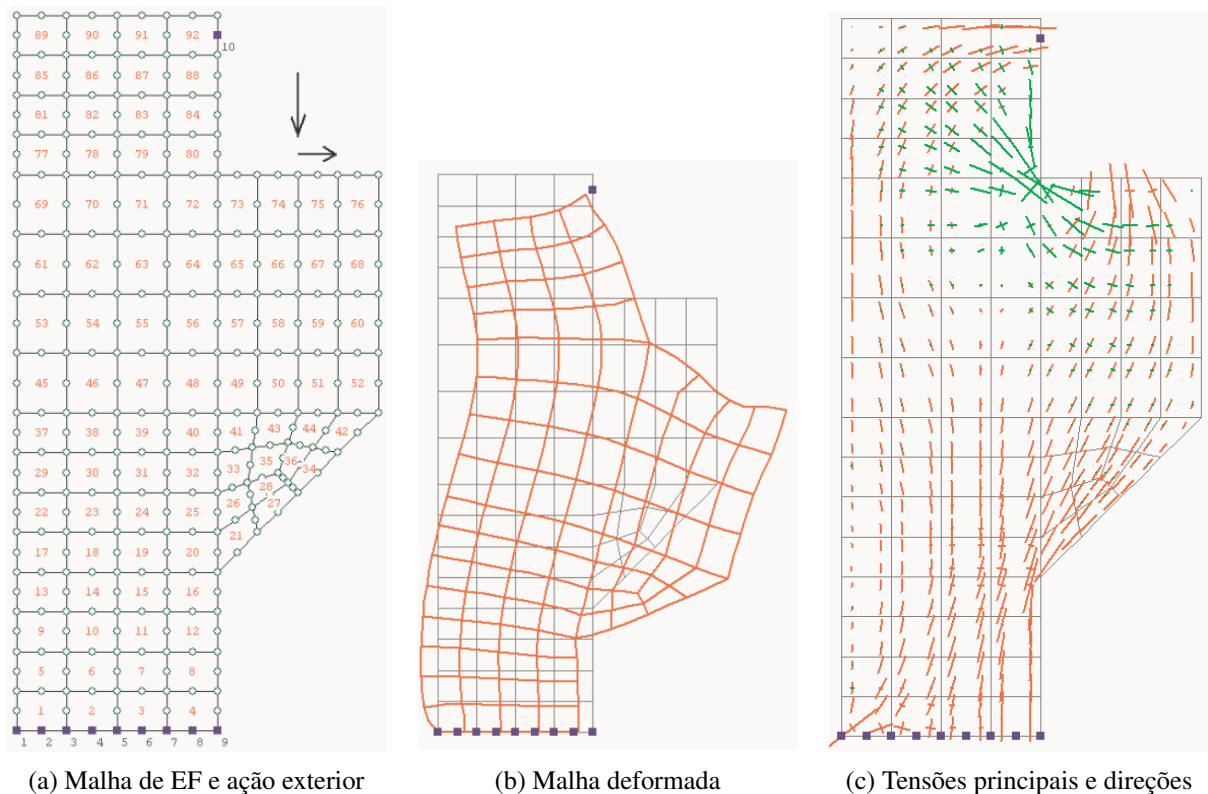


Figura 2.3: Método dos Elementos Finitos
Fonte: Azevedo (2003)

2.3.2. PLATAFORMAS DE MODELAÇÃO ESTRUTURAL

A modelação estrutural é um processo fundamental na engenharia, no qual os engenheiros utilizam ferramentas de cálculo e simulação para avaliar a resistência e estabilidade de estruturas. No mercado, existem várias plataformas de modelação estrutural, cada uma com suas características e especialidades. Algumas das plataformas mais populares incluem o Ansys², o Robot Structural Analysis Professional³, o SAP2000⁴, o Cypecad⁵, o TQS⁶, o ETABS⁷ e o Tricalc⁸.

No entanto, na FEUP e, em específico, no Departamento de Engenharia Civil (DEC), as plataformas mais amplamente utilizadas são o Ansys, o Robot Structural Analysis Professional e o SAP2000. Devido ao extenso uso dessas ferramentas no Departamento, optou-se por destacá-las neste trabalho.

2.3.2.1. Ansys

Em 1971, a empresa multinacional americana Ansys, Inc., com sede em *Canonsburg*, Pensilvânia, introduziu a sua primeira versão comercial do programa **Ansys**, nomeada versão 2.0 (Wahab, 2014). Este *soft-*

² <https://www.ansys.com/>

³ <https://www.autodesk.com/products/robot-structural-analysis/overview/>

⁴ <https://www.csiamerica.com/products/sap2000/>

⁵ <https://info.cype.com/pt/software/cypecad/>

⁶ <https://www.tqs.com.br/>

⁷ <https://www.csiamerica.com/products/etabs/>

⁸ <https://gratec.com/pt/products/tricalc/>

ware, do tipo *Computer-Aided Engineering*, ou Engenharia Assistida por Computador (CAE), emergiu como uma ferramenta essencial para engenheiros em escala global, oferecendo uma plataforma abrangente para o design, teste e operação de produtos.

Os utilizadores definem inicialmente as características físicas e geométricas do objeto em estudo, incluindo dimensões, peso, pressão e temperatura. Posteriormente, o *software* realiza simulações abrangentes, abordando uma variedade de fenómenos, como movimento, fadiga, fraturas, fluxo de fluidos, distribuição térmica e eficiência eletromagnética ao longo do tempo (Nakasone et al., 2007).

O Ansys é amplamente empregado em diversas áreas da engenharia civil, incluindo o projeto e análise de estruturas. Por exemplo, no projeto de pontes, o *software* permite simular como diferentes configurações e materiais reagem a cargas variáveis ao longo do tempo, auxiliando os engenheiros na tomada de decisões fundamentadas para garantir a segurança e durabilidade da estrutura. Além disso, na esfera da energia renovável, o Ansys desempenha um papel crucial no desenvolvimento e otimização de turbinas eólicas. Por meio de simulações detalhadas, os engenheiros podem analisar o comportamento das pás da turbina, a distribuição de carga nas estruturas e a eficiência de conversão de energia, com o intuito de maximizar a produção de energia eólica e reduzir os custos de manutenção ao longo do tempo.

Desde então, o Ansys tem mantido a sua posição como uma referência na indústria de simulação de engenharia, oferecendo soluções avançadas que apoiam o desenvolvimento, teste e operação de produtos em escala global. Essa integração de tecnologia e inovação desempenha um papel crucial no avanço da engenharia, fornecendo ferramentas poderosas para a análise preditiva e otimização de sistemas complexos.

2.3.2.2. Robot Structural Analysis Professional

O *software* **Robot Structural Analysis Professional** (ou, simplesmente, Robot), desenvolvido pela Robobat Inc., teve a sua primeira versão comercial lançada em 1985 para o sistema operacional DOS, marcando assim o seu surgimento. Desde então, a sua evolução tecnológica culminou na versão ROBOT 97 para Windows 95/NT, lançada em 1997, ampliando a sua acessibilidade e eficácia.

Em 1999, a Robobat estabeleceu uma parceria estratégica com a Autodesk, Inc., tornando-se membro da Rede de Desenvolvedores Autodesk e Distribuidor Autorizado da Autodesk. A colaboração firmada em 2001 com a ANSYS, uma empresa líder em simulações de engenharia, fortaleceu ainda mais a posição da Robobat no mercado, enriquecendo o seu portfólio com soluções avançadas e eficientes.

Em 2007, a Robobat intensificou a sua parceria com a Autodesk, lançando uma série de Extensões para o Revit®, *software* de modelação de informação de construção (BIM) da Autodesk. Em 2008, ocorreu a aquisição da Robobat France pela Autodesk Inc., juntamente com suas subsidiárias no Reino Unido e nos Estados Unidos, consolidando o Robot como um produto Autodesk (BIMware, s.d.).

O Robot se destaca por sua capacidade de análise de cargas estruturais e integração com o BIM, permitindo a troca de dados com o Revit. Essa integração facilita a criação de projetos mais resilientes,

exequíveis e precisos, consoante às normas de código aplicáveis.

Destaca-se, dentre suas características, o processo de geração automática de malha de elementos finitos (*auto-meshing*), o qual oferece uma malha de elevada qualidade, contribuindo para resultados analíticos de maior precisão. Contudo, é possível observar algumas dificuldades no ajuste manual refinado da malha, sugerindo áreas passíveis de aprimoramento na usabilidade e eficácia do sistema em questão.

2.3.2.3. SAP2000

O *software* **SAP2000**, desenvolvido pela *Computers & Structures, Inc.* (CSI) e lançado em 1996, destaca-se como uma ferramenta notável na análise estrutural. A sua primeira versão, totalmente integrada ao ambiente *Microsoft Windows*, apresentava uma *interface* gráfica do utilizador altamente intuitiva e produtiva. Ao longo dos anos e por meio de diversas atualizações, o SAP2000 manteve a sua posição de destaque, reconhecido pela sua versatilidade na análise de uma ampla gama de estruturas.

A *interface* gráfica 3D orientada a objetos do SAP2000 permite uma modelação, análise e dimensionamento integrados e eficientes. A sua flexibilidade quanto aos tipos de estruturas que podem ser analisados, combinada com o poder de cálculo e a fiabilidade dos resultados, o torna uma ferramenta indispensável para engenheiros civis em diversas áreas. Desde pontes e edifícios até estádios, barragens, estruturas industriais e marítimas, o *software* é amplamente utilizado para análise e dimensionamento de uma variedade de infraestruturas.

Uma das características marcantes do SAP2000 é a inclusão de modelos paramétricos para diferentes tipos de estruturas, como vigas simples, treliças 2D e 3D, pórticos 2D e 3D, silos e reservatórios, escadas, estruturas de barragens e tubos. Esses modelos simplificam o processo de modelação, aumentando a eficiência e possibilitando ajustes conforme necessário para atender às especificidades de cada projeto.

Assim, o SAP2000 destaca-se como uma ferramenta poderosa e amplamente utilizada por engenheiros estruturais em todo o mundo, oferecendo uma abordagem integrada e eficaz para a análise e dimensionamento de estruturas.

2.4. DIGITAL TWIN

O conceito de DT teve a sua origem no ano de 2002, durante uma apresentação do Professor Doutor Michael Grieves na Universidade de Michigan, realizada durante uma formação para o centro de *Product Lifecycle Management*, ou Gestão do Ciclo de Vida de um Produto (PLM). Inicialmente, era denominado apenas como “Conceito Ideal para o PLM”, contudo, já incorporava todos os elementos essenciais de um *digital twin* (Grieves e Vickers, 2017).

Foi apenas em 2010 que o conceito de DT foi oficialmente introduzido por John Vickers, tecnólogo da NASA. Nessa ocasião, Vickers utilizou os elementos previamente mencionados por Grieves, incluindo o espaço real, o espaço virtual, o fluxo de dados do espaço real para o espaço virtual, o fluxo de informações do espaço virtual para o espaço real e os subespaços virtuais (Grieves e Vickers, 2017).

Løfaldli e Haugen (2018) referem a proposta de Grieves e Vickers (2017) para a definição de *digital twin* como

[...] um conjunto de construções virtuais de informação que descreve totalmente um produto físico fabricado potencial ou efetivamente, desde o nível micro atômico até o nível geométrico macro. No seu máximo, qualquer informação que possa ser obtida ao inspecionar um produto físico fabricado pode ser obtida do seu *Digital Twin*.

2.4.1. TIPOS

Grieves e Vickers (2017) identificam dois tipos de gémeos digitais existentes: *Digital Twin Prototype*, ou Protótipo de Gémeo Digital (DTP) e *Digital Twin Instance*, ou Instância de Gémeo Digital (DTI). No entanto, há outro conceito que pode ser considerado como um tipo de Gémeo Digital, denominado *Digital Twin Aggregate*, ou Agregado de Gémeo Digital (DTA). Estes são definidos como:

- **DTP:**
 - Descreve um modelo digital que contém todas as informações necessárias para criar um protótipo físico. Este protótipo não está diretamente ligado a nenhum ativo físico específico já existente. Serve como um modelo inicial para a produção de um objeto físico, incluindo detalhes como requisitos, modelo 3D anotado, lista de materiais, processos de produção, serviços associados e métodos de descarte.
- **DTI:**
 - Refere-se a uma instância específica de um ativo físico que está vinculada a um modelo digital correspondente. As informações contidas neste tipo de DT são diretamente relacionadas ao histórico e às características daquele ativo físico específico. Isso inclui detalhes como modelo 3D anotado com tolerâncias dimensionais, lista de materiais atualizada, registros de processos de produção, histórico de serviços realizados e estados operacionais capturados por sensores em tempo real.
- **DTA:**
 - É a agregação de todos os DTIs disponíveis num determinado contexto. Pode não ser uma estrutura de dados independente, mas sim uma entidade computacional que combina e acessa todos os DTIs, permitindo consultas e análises contínuas. O DTA oferece uma visão agregada de múltiplos DTIs, facilitando a tomada de decisões baseada em dados de uma coleção de gémeos digitais de ativos físicos.

Todos estes operam num *Digital Twin Environment*, ou Ambiente de Gémeo Digital (DTEnv), que é um espaço de aplicação integrado e multi-domínio para operar os DT.

2.4.2. CAMPOS DE UTILIZAÇÃO E DE EXPLORAÇÃO

Do ponto de vista estrito, Grieves e Vickers (2017) apresentam duas abordagens possíveis para o uso do *digital twin*. A primeira é a abordagem preditiva, que se baseia no estado atual do produto, no seu ciclo

de vida e no seu progresso. A segunda abordagem é a interrogativa, na qual os DT permitem aceder a informações sobre o estado atual e histórico do produto físico. Mesmo que o produto esteja em outro local, é possível obter dados sobre o seu estado atual, como localização geográfica e tensões/deformações da estrutura, por exemplo. Essas informações podem ser usadas para correlacionar dados e prever futuros estados.

No sentido amplo, é possível explorar diversas perspetivas para o uso do DT. Attaran e Celik (2023) destacam que o *digital twin*, como modelo digital de um ativo físico, possui semelhanças com o BIM. No entanto, distingue-se ao permitir interações e exibição de dados de sensores em tempo real. Assim, é possível identificar áreas de aplicação dos gémeos digitais na construção civil, conforme apresentado abaixo:

i) **Projeto e Planeamento:**

A utilização de gémeos digitais desde a fase inicial de planeamento e de projeto possibilita a estimativa da viabilidade e do resultado do projeto, concedendo ao projetista a oportunidade de aplicar a sua criatividade e obter uma compreensão direta de como as suas decisões influenciarão o resultado.

ii) **Gestão do Processo Construtivo:**

Com a aplicação do DT, torna-se possível monitorizar e avaliar o avanço do projeto em tempo real, detetando possíveis desafios e desenvolvendo soluções para superá-los de forma rápida e eficiente. Esta abordagem também contribui significativamente para a garantia do cumprimento do cronograma, uma vez que ajuda a identificar potenciais atrasos ou problemas, permitindo a implementação de medidas corretivas necessárias para manter o projeto no prazo estipulado.

iii) **Suporte à Decisão:**

O DT fornece suporte valioso para a tomada de decisões ao apresentar dados precisos e atualizados. Ao disponibilizar uma visão abrangente do projeto em tempo real, permite uma abordagem mais informada e eficaz na resolução de desafios e na definição de estratégias futuras.

iv) **Identificar Potenciais Problemas e Gestão de Manutenção:**

A aplicação do DT na engenharia civil vai além da simples monitorização do progresso do projeto. Ele também pode identificar potenciais problemas durante a construção e operação, contribuindo para uma gestão proativa da manutenção e prevenção de falhas. Esta capacidade de antecipação e intervenção pode significativamente reduzir custos e aumentar a eficiência da manutenção.

v) **Segurança do Trabalho e Gestão de Riscos:**

O DT contribui para a segurança do trabalho e a gestão de riscos ao fornecer informações precisas sobre as condições de trabalho. Além disso, é capaz de identificar potenciais áreas de perigo, permitindo a implementação de medidas preventivas para proteger a saúde e a segurança dos trabalhadores no canteiro de obras.

vi) **Planeamento e Logística de Recursos:**

Desde materiais até mão de obra, o gémeo digital otimiza os processos de construção, melhorando a eficiência e reduzindo desperdícios. Ele permite uma alocação mais precisa dos recursos,

evitando a escassez ou o excesso de materiais, bem como a má gestão da mão de obra.

vii) **Sustentabilidade:**

A tecnologia *digital twin* também pode ser usada para otimizar a sustentabilidade de um projeto. Ao criar um gêmeo digital do projeto, os projetistas podem simular vários cenários de sustentabilidade e testar diferentes estratégias de sustentabilidade.

Um caso destacável é a utilização dos gêmeos digitais na Petrobras⁹, uma empresa que se dedica de forma integrada e especializada na indústria do petróleo, gás natural e energia. Neste contexto, foram desenvolvidas versões digitais das suas refinarias e plataformas de petróleo, de modo a permitir simular cenários e antecipar potenciais problemas. Por exemplo, é possível analisar se a substituição de uma peça que, no mundo físico, envolveria a produção da peça, mobilização de funcionários para deslocar-se até a refinaria, uso de equipamentos submarinos, entre outros, pode ser realizada virtualmente através do computador. Deste modo, é possível avaliar a rentabilidade dessa substituição. Caso se conclua que é benéfico, então a intervenção é realizada no mundo real. Esta abordagem permitiu a Petrobras economizar mais de US\$200 milhões em apenas um ano.

2.5. PLATAFORMAS DE DIGITAL TWIN

2.5.1. 3DEXPERIENCE (3DX)

A plataforma **3DEXPERIENCE (3DX)**, desenvolvida pela *Dassault Systèmes* em 2012, representa uma ferramenta abrangente para negócios e inovação, oferecendo uma visão completa e em tempo real das atividades e do ecossistema empresarial. Essencialmente, conecta pessoas, ideias, dados e soluções num ambiente colaborativo único. Além disso, é importante salientar que essa plataforma integra todo o ecossistema organizacional, desde pessoas até processos, num ambiente unificado.

Destaca-se o caso da *Renault*, que em 2021, como parte da sua estratégia “Renaulution”, implementou globalmente a plataforma 3DEXPERIENCE na nuvem. Isso teve o intuito de melhorar a partilha de dados e agilidade, ao mesmo tempo que reduz custos e o tempo de desenvolvimento de veículos.

Além disso, a solução de Avaliação de Ciclo de Vida é integrada à plataforma 3DEXPERIENCE, revolucionando o processo de inovação sustentável. Por meio dela, é possível estabelecer requisitos de sustentabilidade desde as etapas iniciais, colaborativamente conduzindo-os ao longo das fases de *design*, desenvolvimento e engenharia de fabrico (Dassault Systèmes, 2022).

Apesar das vantagens da plataforma, deve-se observar que ela parece mais adequada para projetos altamente complexos, o que pode não corresponder às necessidades do presente trabalho.

2.5.2. XEOKIT 3D

Em 2019, a *Xeolabs* lançou o **Xeokit 3D**, um *kit* de desenvolvimento de *software* que se destaca pela sua acessibilidade e pelo enfoque na visualização de modelos complexos por meio de navegadores *web*. Fundamentado em mais de uma década de experiência na visualização de modelos BIM e nas áreas

⁹ <https://bit.ly/3wPSS2i>

de Ciência, Tecnologia, Engenharia e Matemática (STEM), o Xeokit 3D representa uma resposta às demandas por ferramentas eficientes de visualização.

Este *kit* permite a incorporação de tecnologia da IoT, possibilitando uma integração mais ampla com outros sistemas e dispositivos. Além disso, destaca-se por ser um *software* de código aberto, o que oferece flexibilidade e oportunidades para a comunidade de desenvolvimento contribuir com melhorias e personalizações. Contudo, apesar do potencial inicial e das características atrativas, desde o seu lançamento, não foram identificados avanços significativos no desenvolvimento do Xeokit 3D.

2.5.3. AUTODESK E O DIGITAL TWIN

A Autodesk tem uma empresa associada, nomeada Autodesk Research, que é dedicada à pesquisa de novas formas de aplicar a tecnologia na arquitetura, engenharia, construção, design de produtos, fabricação, media e entretenimento. Foi justamente a Autodesk Research que, no final de 2009, iniciou as pesquisas da empresa no ramo dos *digital twins*, através do chamado Project Dasher. Entretanto, o grande problema nesse projeto foi a integração entre dados de sensores com o ambiente 3D. Além disso, haviam duas questões que poderiam ser considerados problemas para o DT: 1) o principal foco do projeto era dados históricos e não dados em tempo real e 2) o objetivo era a leitura e visualização de dados, e não a atuação no controle desses (Walmsley, 2021).

Em 2016 foi decidido redesenhar completamente o Dasher e, com isso, passou-se a utilizar a plataforma Autodesk Forge, que havia sido lançada recentemente. Com isso, permitiu-se traduzir os modelos e suprir algumas faltas que o Projeto Dasher apresentava, como por exemplo a visualização de modelos 3D em navegadores *web*. Isso incentivou muitos desenvolvedores a construir *digital twins* através do Forge. Em 2020, foi apresentada pela Autodesk o produto Tandem™, que visava ser dedicado para criar *digital twins* especificamente para a indústria AEC. Um diferencial desse produto é a possibilidade de importar modelos do Revit e gerir os ativos do modelo em ambiente que pode ser visualizado em navegador (Walmsley, 2021).

O avanço e alteração mais recente que a Autodesk realizou no âmbito dos *digital twins* foi durante o evento Autodesk University 2022, em que o CEO da Autodesk, Andrew Anagnost, apresentou a transição do Autodesk Forge para o *Autodesk Platform Services* (APS) (Lawrence, 2022). O APS consiste em um ecossistema de desenvolvedores que permite que as empresas possam desenvolver soluções personalizadas e escaláveis para resolver desafios de projetos, de engenharia e de construção.

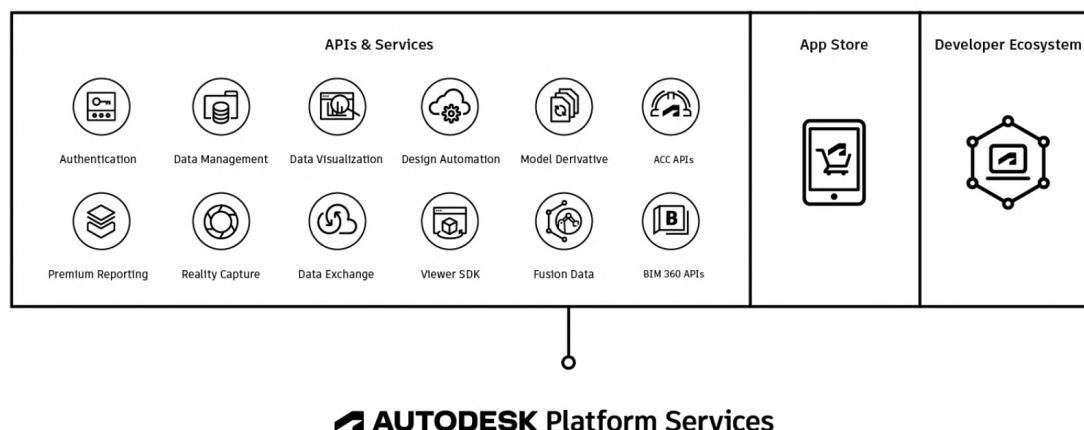


Figura 2.4: Autodesk Platform Services (APS)
Fonte: Lawrence (2022)

Para compreender o funcionamento do programa, é essencial entender o conceito de *Application Programming Interface*, ou Interface de Programação de Aplicação (API), que se refere a um conjunto de ferramentas, definições e protocolos utilizados para desenvolver e integrar aplicações. Nesse sentido, o APS constitui um conjunto de APIs e serviços destinados a auxiliar na personalização dos produtos, conforme ilustrado no fluxograma da Figura 2.4, permitindo a criação de fluxos de trabalho inovadores e a integração de outras ferramentas e dados na plataforma.

O APS atualmente disponibiliza uma variedade de serviços, abrangendo desde a visualização de modelos 3D, renderização, gestão de documentos até a conversão de dados. Entre as várias APIs e extensões à disposição, destaca-se a API de visualização de dados conhecida como *Data Visualization (DataViz Extensions)*. Esta permite a associação de mapas de calor e objetos “sensores” a componentes específicos ou pontos do modelo, estabelecendo assim uma comunicação direta com bases de dados. Outro recurso de destaque no APS é a sua linha temporal, possibilitando a análise temporal dos dados. Isso viabiliza a visualização e interpretação dos diferentes *timesteps* provenientes da base de dados, construindo assim um histórico de dados completo e contextualizado.

A Autodesk disponibiliza um modelo de demonstração¹⁰, onde é possível observar o funcionamento prático da aplicação e as suas potencialidades em contexto real. O APS representa um conjunto de serviços hospedados em redes de servidores globais, desenvolvido pela Autodesk e integrado com a metodologia BIM, e ainda dispõe do respaldo da empresa para eventual suporte técnico.

Esta plataforma destaca-se como a opção mais adequada para o presente trabalho. Ela oferece um conjunto abrangente de informações úteis para o funcionamento da aplicação e para a correção de erros ao adaptar a aplicação de referência para um caso de estudo específico. Além disso, o APS fornece diversos exemplos de aplicações desenvolvidas com a plataforma. Com a constante atualização dos recursos do

¹⁰ <https://aps-iot-extensions-demo.autodesk.io/>

APS, é provável que o processo de desenvolvimento de um gémeo digital se torne mais fácil, eficiente e completo ao longo do tempo.

2.6. DIGITAL TWIN ESTRUTURAL

O conceito de gémeo digital, quando aplicado às estruturas de engenharia civil, ultrapassa a simples representação digital de uma estrutura existente no mundo real. Pode-se explorar a ideia de provocar alterações na estrutura apenas no ambiente digital, testando as respostas que seriam obtidas caso essas alterações ocorressem na realidade.

Assim, é viável desenvolver um modelo estrutural que reproduza fielmente a estrutura real, utilizando métodos para demonstrar que o comportamento estrutural é semelhante. Este modelo torna-se então um gémeo digital estrutural. A partir daí, surgem duas abordagens possíveis, que podem ser realizadas de forma simultânea ou não: 1) realizar testes de eventos adversos e/ou possíveis durante a construção para avaliar o comportamento da estrutura; e 2) sincronizar o modelo com outros fatores da realidade para enriquecer ainda mais o DT.

Diversos fatores podem ser sincronizados e testados nos gémeos digitais que representam uma estrutura, como dados de monitorização (a ser abordado na Secção 2.7), resultantes de acelerómetros, fissurómetros, clinómetros, sensores de nível e de temperatura, entre outros. Por exemplo, Yu et al. (2022) demonstram a possibilidade de desenvolver gémeos digitais para monitorização da condição estrutural de uma ponte, bem como para carga de tráfego e temperatura do pavimento.

2.7. MONITORIZAÇÃO DE ESTRUTURAS

A monitorização estrutural é uma prática importante tanto durante a construção quanto na fase de operação das estruturas. Inicialmente, limitava-se à deteção de manifestações patológicas visíveis, como fendas e inclinações. No entanto, expandiu-se para incluir parâmetros como temperatura, deformações e tensões, visando identificar problemas não aparentes (Monteiro, 2010).

Silva (2022) sugere que para garantir a eficácia da monitorização, é crucial combinar diferentes sensores para distinguir entre comportamentos normais e anormais da estrutura. Isso requer uma abordagem baseada em modelos numéricos e algoritmos para determinar as melhores localizações dos dispositivos de aquisição de dados, considerando as condições específicas de cada estrutura.

A instalação de sistemas de monitorização em tempo real baseados em sensores elétricos pode ser complexa devido à quantidade de cabos envolvidos, resultando em problemas de ruído eletromagnético. Nesse sentido, os avanços na tecnologia de fibras óticas oferecem uma alternativa viável, proporcionando desempenho e custo adequados para a monitorização em tempo real de diversas estruturas, especialmente em associação com o desenvolvimento de materiais compósitos (Monteiro, 2010).

A implementação bem-sucedida da monitorização estrutural pode ser realizada por meio de uma rede de sensores conectados sem fio, permitindo a aquisição rápida e confiável de informações sem interferir nas condições normais de operação das estruturas. Os principais parâmetros monitorizados incluem

deslocamentos, rotações, acelerações, deformações e temperaturas, com foco especial no movimento da estrutura (Silva, 2022).

Como destacado por Azenha et al. (2018), a manutenção preventiva desempenha um papel fundamental na redução de esforços e custos, além de aumentar os níveis de eficiência das estruturas. Portanto, a implementação de sistemas de monitorização estrutural não apenas permite a avaliação de problemas já existentes, mas também a detecção precoce desses e, portanto, contribui para a preservação e segurança das estruturas ao longo do tempo.

2.8. GESTÃO E VISUALIZAÇÃO DE DADOS

A interação entre os dispositivos equipados com tecnologia da IoT e o *digital twin* envolve o armazenamento e processamento dos dados dos sensores. Essas informações são registadas em uma base de dados que mantém um histórico detalhado. A visualização em tempo real dos dados ocorre por meio de sistemas específicos, como *dashboards*, que podem ser integrados à plataforma que suporta a base de dados.

As bases de dados consistem em conjuntos de dados organizados e estruturados, predominantemente em formato de tabelas, com disposição de informações em linhas e colunas. Para consulta, criação e modificação dessas tabelas, utiliza-se uma linguagem específica, variando conforme o tipo de base (Noletto, 2020). Dentre os tipos mais comuns, destacam-se:

- Bases de dados relacionais: os dados são armazenados em formatos tabulares, onde cada dado é disposto em colunas, enquanto as descrições correspondentes são organizadas em linhas e atributos. Uma das características-chave é a utilização da linguagem SQL. Esta linguagem facilita a inserção e recuperação de dados, tornando a categoria relacional amplamente considerada como de fácil utilização. É importante destacar que a maioria dos sistemas de gestão de bases de dados adota o SQL como linguagem padrão.
- Bases de dados não relacionais: o uso de bases de dados não relacionais é comum quando se lida com dados que não se encaixam em formatos tabulares, como imagens, vídeos e gráficos. Esses sistemas são reconhecidos pelo seu alto desempenho, o que os torna altamente valorizados no mercado. Em contraste com os bases de dados relacionais, onde os dados são estruturados em tabelas com relações definidas, os bases de dados não relacionais armazenam todos os registos num único local, dispensando a necessidade de um sistema de relacionamento. A linguagem oficialmente associada a esses bases de dados é a *Not Only SQL*, ou Não Apenas SQL (NoSQL) (Noletto, 2020).

No âmbito deste trabalho, destaca-se uma categoria específica de base de dados denominada *Time Series Database*, ou Bases de Dados de Séries Temporais (TSDB). Estas bases de dados são empregadas para registar medições simples ou eventos, continuamente rastreados, monitorizados, reduzidos em amostras e agregados ao longo do tempo. As TSDB abrangem uma diversidade de dados, desde métricas de servidor até monitorização de desempenho de aplicações, dados de rede, informações de sensores, eventos,

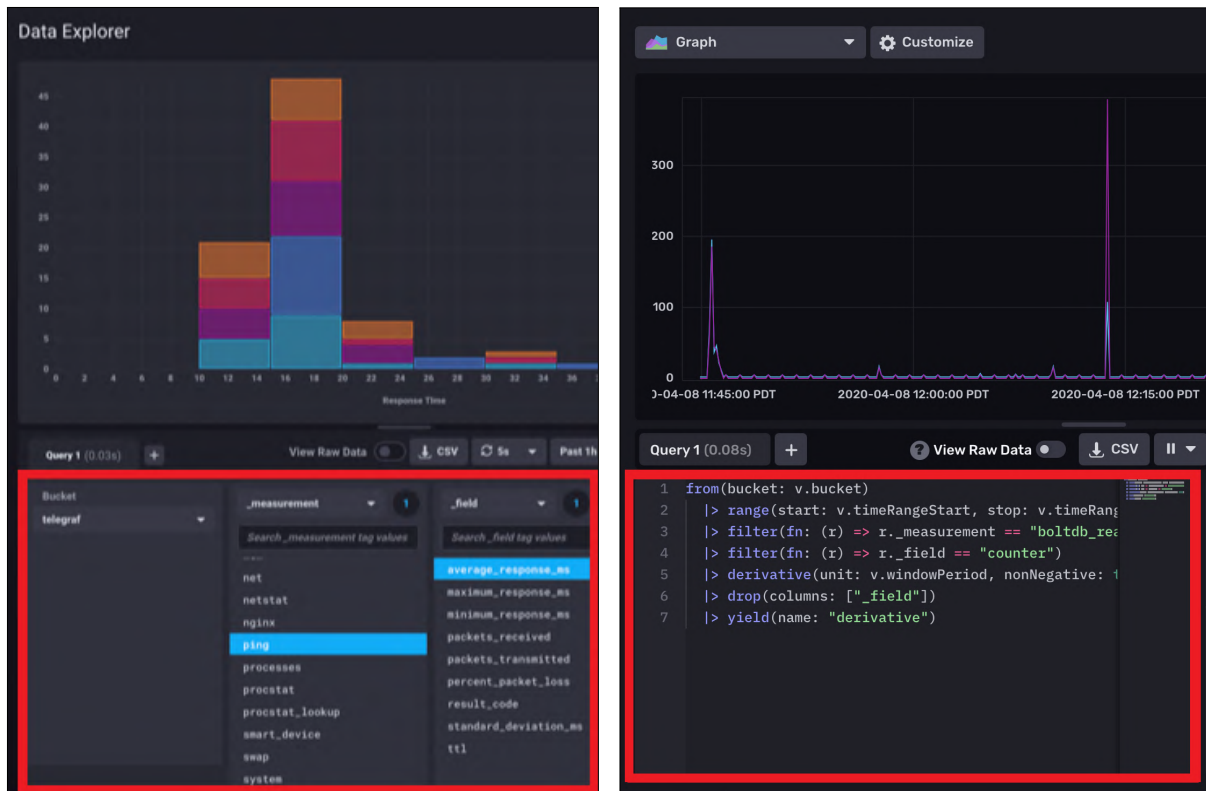
cliques, transações em mercados e outros tipos de dados analíticos. Estas bases de dados são particularmente otimizadas para capturar e analisar mudanças ao longo do tempo, projetadas especificamente para lidar com métricas e eventos marcados com *timestamps*. O termo *timestamp* refere-se à marca temporal que indica a data e/ou hora do evento ocorrido (Dix, 2023).

Serão exploradas nas próximas secções duas plataformas fundamentais no decorrer deste trabalho. A primeira, **InfluxDB**, tem a função de armazenar e organizar os dados coletados pelos sensores. A segunda, **Grafana**, possibilita a visualização e análise desses dados em tempo real, por meio de dashboards personalizados, adaptados às necessidades do utilizador.

2.8.1. INFLUXDB

O InfluxDB destaca-se como uma plataforma de código aberto desenvolvida pela InfluxData, propostamente concebida para atender às exigências de armazenamento, análise e visualização de séries temporais, através da linguagem Flux. Como ressaltado por Dix (2023), sua arquitetura foi construída desde o início para esse propósito específico, diferenciando-se de soluções adaptadas para séries temporais. Os *timestamps* no InfluxDB oferecem grande flexibilidade em termos de precisão, desde segundos até nanossegundos.

O sistema permite criar gráficos em tempo real através de *queries*, ou seja, solicitações de informação efetuadas à base de dados por meio de construção manual ou edição de *scripts* (algoritmos), conforme mostrado nas Figuras 2.5a e 2.5b. As figuras também demonstram duas das várias maneiras de apresentar os gráficos, utilizando histogramas e gráficos de linhas.

(a) Construção manual de *queries*(b) Edição de *queries* através de algoritmosFigura 2.5: Editor de *queries* do InfluxDB

Fonte: InfluxData (2024)

O InfluxDB destaca-se pela sua organização de dados, empregando conceitos-chave como campo (*field*), medida (*measurement*) e etiqueta (*tag*) para uma gestão eficiente dos dados¹¹. Essa estrutura proporciona uma organização clara e flexível dos dados, facilitando sua análise e interpretação. Além disso, mostra-se eficiente na gestão de grandes volumes de dados de séries temporais. Os *buckets*, locais de armazenamento das séries com períodos de registos definidos, contribuem para uma gestão mais eficaz dos dados ao longo do tempo. Esta abordagem torna-o particularmente adequado para armazenar e analisar informações provenientes de sensores e dispositivos IoT (Silva, 2022).

2.8.2. GRAFANA

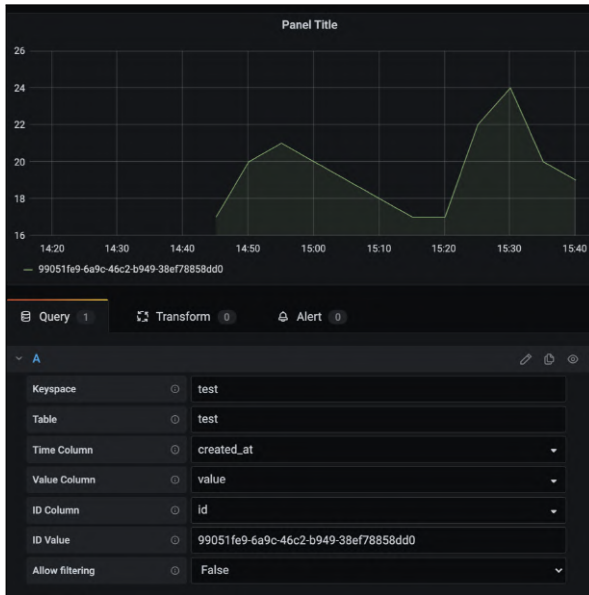
O Grafana, uma solução de código aberto, é uma plataforma que permite a visualização e análise de dados com a ajuda de métricas, oferecendo *insights* sobre infraestruturas complexas e grandes volumes de dados. Além disso, sua natureza de código aberto permite a criação de *plugins* personalizados para conectar-se a qualquer fonte de dados desejada.

Esta ferramenta possibilita o estudo, análise e monitorização de dados ao longo do tempo, conhecido como análise de séries temporais. Dentro de cada painel do Grafana, há uma área designada para *query*, onde é seleccionada a fonte de dados, configuradas opções de recolha e criados alertas para situações

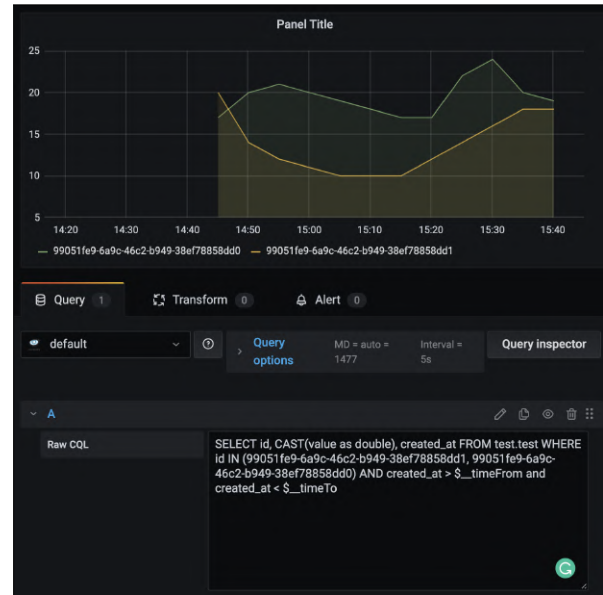
¹¹ https://docs.influxdata.com/influxdb/v1/concepts/key_concepts/

específicas. Essa secção também permite a introdução de código para seleção, agregação e filtragem de dados (Sarawagi, 2021).

O processo de edição das *queries* pode ser feito de duas maneiras: manualmente, através do *Query Configurator* (Figura 2.6a), que é uma abordagem mais simples, e por meio de algoritmos, usando o *Query Editor* (Figura 2.6b), que oferece uma maior flexibilidade e poder de consulta. Para fontes de dados como o InfluxDB, o código pode ser inserido no formato utilizado pela própria base de dados, Flux (Silva, 2022).



(a) *Query Configurator* do Grafana



(b) *Query Editor* do Grafana

Figura 2.6: Editor de *queries* do Grafana
Fonte: GitHub - Grafana (2023)

3

CASO DE ESTUDO

O presente trabalho foi feito utilizando um conjunto de dados disponibilizados a partir de um sistema de monitorização de edifícios históricos na área de influência das obras da LINHA CIRCULAR DO METRO DO PORTO – TROÇO CASA DA MÚSICA / S. BENTO, cuja conceção, instalação e exploração é da responsabilidade de uma equipa da FEUP liderada pelo Professor António Arêde.

Objetivou-se, portanto, criar um *digital twin* do **Monumento aos Heróis da Guerra Peninsular**, também conhecido como Obelisco da Boavista. Esse monumento está situado ao centro da Praça de Mouzinho de Albuquerque - Rotunda da Boavista, na cidade do Porto.

3.1. MONUMENTO AOS HERÓIS DA GUERRA PENINSULAR

O projeto inicial, de autoria do arquiteto José Marques da Silva (1869-1947) e do escultor António Alves de Sousa (1884-1922), é de 1907, teve as obras iniciadas em 1914 e encerradas em 1951, por conta de diversos entraves.

O monumento, apresentado na Figura 3.1, consiste numa plataforma quadrangular com um plinto central, cercado por grupos escultóricos em bronze e um alto obelisco. Destaca-se a representação da Vitória, com figuras do povo e uma mulher segurando uma espada e a bandeira nacional. O plinto exibe datas relacionadas à 2ª invasão francesa, enquanto o Obelisco, com 45 metros de altura, apresenta relevos de soldados, cenas de guerra e medalhões de generais. No topo, duas figuras simbólicas em bronze - uma águia e um leão (Figura 3.2) - representam a vitória nacional sobre o Império de Napoleão, em um impressionante testemunho de bravura e resistência (Direção-Geral do Património Cultural, 2011).



Figura 3.1: Vista do Monumento aos Heróis da Guerra Peninsular
Fonte: Autoria Própria (2024)

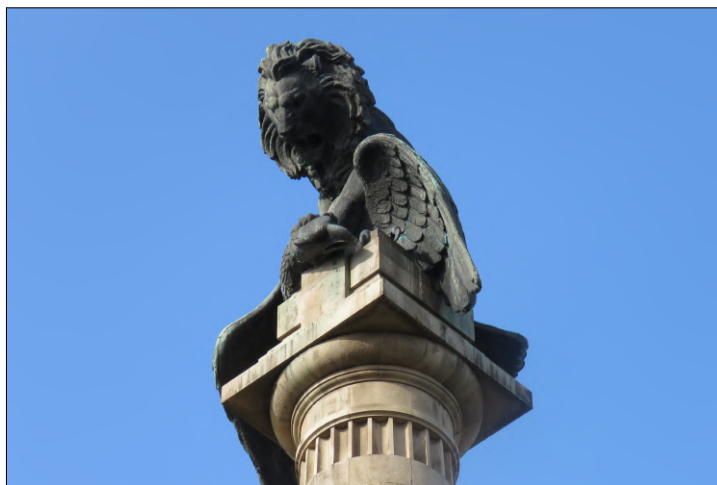


Figura 3.2: Topo do Monumento aos Heróis da Guerra Peninsular
Fonte: Autoria Própria (2024)

Entre os anos 2008 e 2009, houve intervenções de conservação e restauro do monumento devido a manifestações patológicas associadas à degradação dos elementos pétreos e das ligas metálicas (bronze) (CRERE Portugal, s.d.).



Figura 3.3: Restauro do Monumento aos Heróis da Guerra Peninsular
Fonte: CRERE Portugal (s.d.)

3.2. SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

No sentido de monitorizar os possíveis movimentos associados à escavação prevista na região da Praça de Mouzinho de Albuquerque - Rotunda da Boavista, no quadro das obras do Metro em curso, foi instalado um conjunto de 13 sensores. Para o efeito, utilizaram-se quatro tipos de sensores:

- **5 sensores de pressão (ou de nível hidrostático)**, da marca **Keller** (Figura 3.4), destinados a medir variações de pressão hidrostática em diferentes locais da estrutura, para verificar se há movimento vertical da base do Monumento induzido por assentamentos do solo.



Figura 3.4: Sensor de Nível instalado *in loco*
Fonte: Arêde et al. (2024)

- **1 clinómetro bidirecional**, da marca **BeanAir** (Figura 3.5), para registo de rotações em torno de dois eixos horizontais ortogonais, para monitorizar possíveis desvios de verticalidade das estruturas;



Figura 3.5: Clinómetro instalado *in loco*
Fonte: Arêde et al. (2024)

- **5 sensores de temperatura**, sendo um desses já existente na parte interna do clinómetro. Os demais sensores são do tipo **Pt100** (Figura 3.6).



Figura 3.6: Sensor de Temperatura do tipo Pt100
Fonte: Labfacility (s.d.)

- **2 sensores de vibração**, do tipo acelerómetros da marca **BeanAir**, para monitorizar vibrações da estrutura (Figura 3.7).



Figura 3.7: Acelerómetro instalado *in loco*
Fonte: Arêde et al. (2024)

Os acelerómetros e o clinómetro conectam-se diretamente ao módulo agregador/coordenador de dados (*Gateway*) por meio de comunicação sem fio. Já os sensores de nível e temperatura estabelecem conexões diretas por meio de cabos aos Módulos de Aquisição e Registo de Dados (da marca **BeanAir**). Estes dispositivos recebem sinais na forma de tensão elétrica dos sensores e os transmitem ao *gateway* através de conexão sem fio, proporcionando uma alternativa versátil que minimiza a necessidade de extensões significativas de cabos.

O *gateway*, também da marca **BeanAir**, desempenha o papel de agregador e coordenador de sinais provenientes dos sensores, encaminhando-os sem fio mediante uma rede operando na frequência de 2,4 GHz para um dispositivo chamado *router*. O *router* adotado, da marca **Teltonika**, estabelece uma rede Ethernet local e viabiliza o acesso aos dados por meio da *internet*. Esses equipamentos que permitem a ligação dos sensores à rede estão apresentados na Figura 3.8.

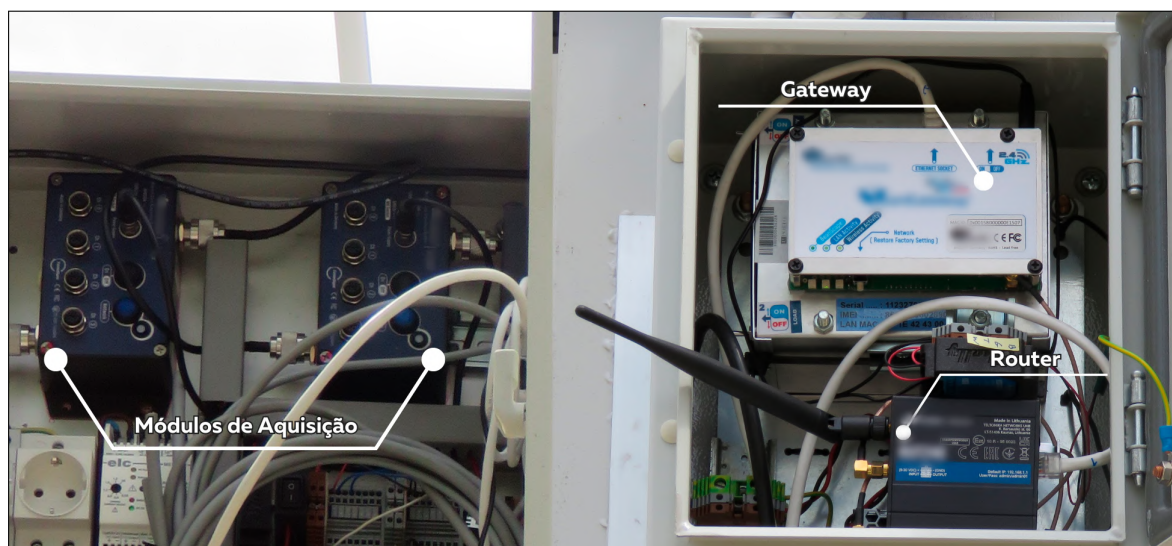


Figura 3.8: Módulos de Aquisição, *Gateway* e *Router* instalados *in loco*
Fonte: Arêde et al. (2024)

Informações mais detalhadas, incluindo dados da ficha técnica dos equipamentos, podem ser encontradas no Anexo A.

3.3. DISTRIBUIÇÃO DOS INSTRUMENTOS DE MONITORIZAÇÃO

Foi adotado o seguinte sistema de nomenclatura para os sensores a serem instalados: **Tipo_Nº**. Sendo o Tipo referente ao tipo de sensor — SN (sensor de nível), CL (clinómetro), T (temperatura) e VB (sensor de vibração) —, seguido do respetivo número _# ou _Ref para o sensor de referência. Desta forma, definiram-se as seguintes designações para os sensores instalados:

- 5 Sensores de Nível — SN_01, SN_02, SN_03, SN_04 e SN_Ref — instalados ao nível do solo;
- 1 Clinómetro bidirecional — CL_02 — instalado em altura;
- 5 sensores de Temperatura — T_Ref, T_01 e T_03 — instalados junto aos sensores de nível de mesmo número; TH_02 — instalado em altura; e T_CL_02 — sensor já existente no sistema do clinómetro bidirecional.
- 2 sensores de ViBração, do tipo acelerómetro — VB_00 — instalado ao nível do solo, ao lado do SN_01; e VB_02 — instalado em altura.

As Figuras 3.9 e Figura 3.10 apresentam a distribuição dos sensores ao nível da base e em altura.

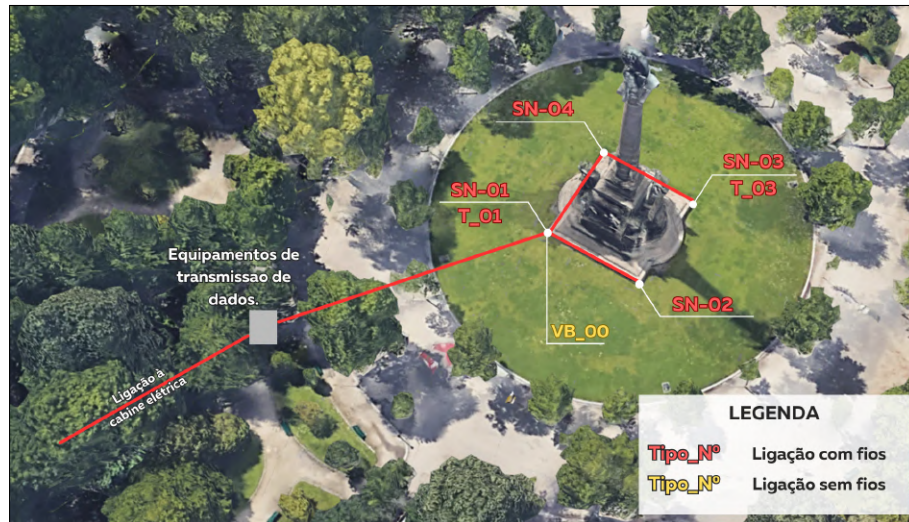


Figura 3.9: Distribuição dos instrumentos a nível da base
Fonte: Autoria Própria (2024)



Figura 3.10: Distribuição dos instrumentos em altura
Fonte: Autoria Própria (2024)

3.3.1. DEFINIÇÃO DO NÍVEL DE COLOCAÇÃO DOS INSTRUMENTOS EM ALTURA

Foi definida inicialmente uma cota de aproximadamente 20 metros para a instalação dos instrumentos em altura. Porém, para uma melhor avaliação da cota adequada, desenvolveu-se um modelo estrutural com uma abordagem simplificada, utilizando um modelo em barras (denominado *frames* no SAP2000), com vista a obter estimativas de frequências e configurações de modos de vibração da estrutura.

Este modelo em barras, devido à sua simplicidade e rapidez na elaboração, proporcionou uma compreensão preliminar do comportamento da estrutura em questão, permitindo antecipar o comportamento esperado. Utilizaram-se as áreas de secção obtidas diretamente do modelo Revit, adiante apresentado

(Secção 4.1), e as propriedades mecânicas foram pré-definidas com base em valores de referência do granito, material do monumento (tópico que será abordado na Secção 4.3).

Identificou-se um possível problema com a monitorização que poderia surgir caso o plano original fosse mantido. Uma vez desenvolvido o modelo, analisaram-se os deslocamentos modais previstos para a altura inicialmente prevista. Observou-se que estes deslocamentos estavam substancialmente reduzidos para o primeiro modo de vibração (inferiores a 10% do deslocamento máximo), o que poderia comprometer a deteção dos movimentos do Obelisco.

O modelo em barras permitiu destacar a necessidade de elevar o nível de instalação dos instrumentos. Definiu-se, portanto, uma nova altura de **29,30 metros**, o que resultou numa previsão de deslocamento de 45,83% do deslocamento máximo do primeiro modo de vibração. Para o segundo modo de vibração, o deslocamento horizontal esperado foi consideravelmente superior, passando de 53,97% para 99,28% do deslocamento máximo. A Figura 3.11 ilustra as diferenças causadas pela alteração na altura de instalação.

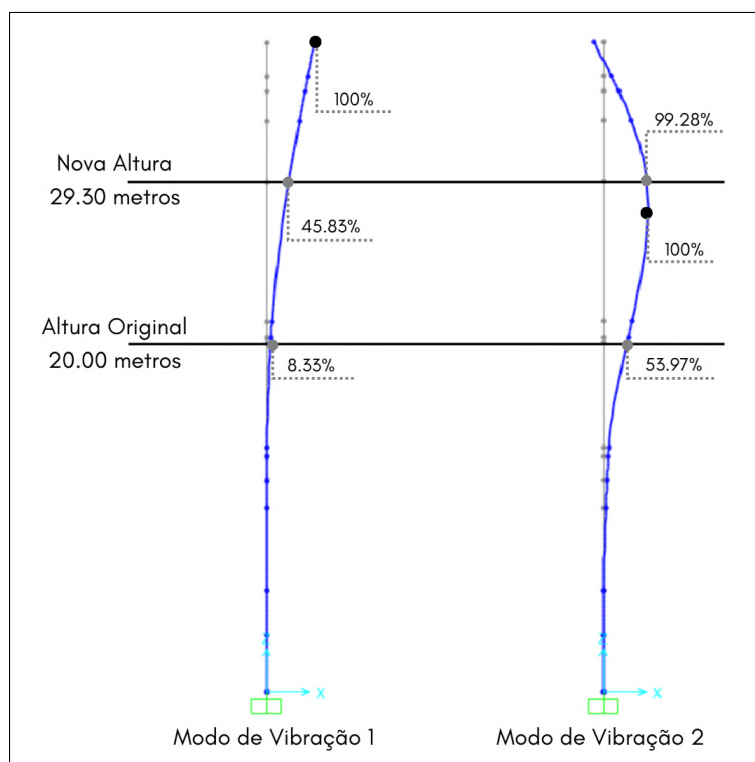


Figura 3.11: Modelo Estrutural em Barras no SAP2000 - Modos de Vibração 1 e 2
Fonte: Autoria Própria (2024)

3.3.2. SECTORIZAÇÃO DOS INSTRUMENTOS

Os sensores e equipamentos instalados foram agrupados em dois diferentes níveis, definidos em altura, e a dois níveis intermédios, nos quais foram instalados o sistema de recolha e armazenamento de energia solar. A região de instrumentação na base corresponde à Zona 00 (Z_00). A outra zona de instrumentação, designada por Zona 02 (Z_02), situa-se ao nível de 29,30 metros (Figura 3.12). A Zona 01 (Z_01),

corresponde a localização dos equipamentos de recolha de energia solar para alimentação dos sensores da Zona Z_02. A Zona Z_01 subdivide-se a dois níveis: Z_01a, à cota 6,65 metros, onde se localiza o equipamento de armazenamento de energia, e Z_01b, à cota 14,15 metros, onde se situam os coletores fotovoltaicos.

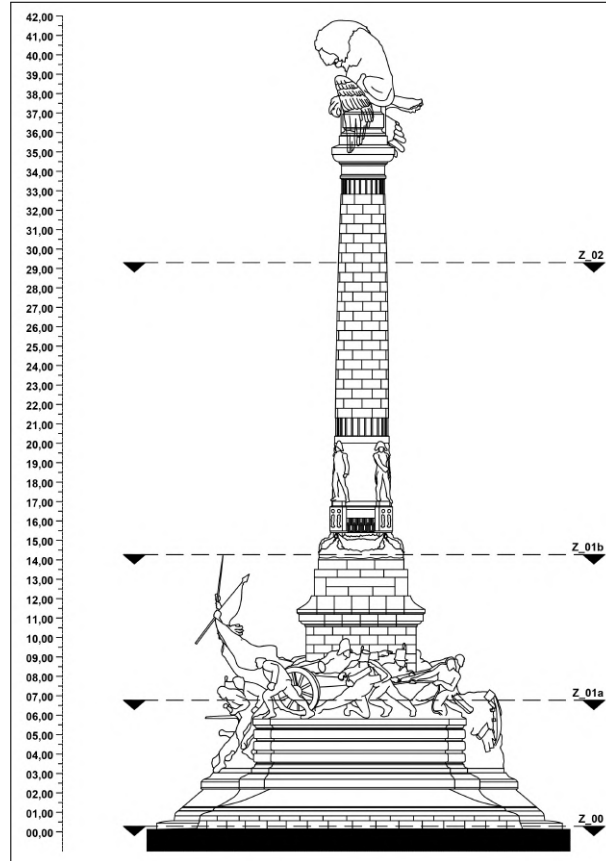


Figura 3.12: Níveis de instalação de sensores de monitorização
Fonte: Arêde et al. (2024)

Foram adotados dois sistemas de eixos de referência diretos ortonormados, conforme se apresenta na Figura 3.13.

(a) Sistema de Referência Global:

- O eixo X_G tem orientação Sul-Norte e é positivo na direção Norte.
- O eixo Y_G tem orientação Este-Oeste e é positivo na direção Oeste.
- O eixo Z_G segue o desenvolvimento em altura do Monumento, com o sentido positivo em direção às cotas crescentes.

(b) Sistema de Referência de Montagem (rodado de 103° no sentido retrógrado em relação ao Sistema Global):

- O eixo x' é um eixo de simetria do Monumento e é positivo na direção próxima ao Este.
- O eixo y' é outro eixo de simetria do Monumento e é positivo na direção próxima ao Norte.
- O eixo z' segue o desenvolvimento em altura do Monumento.

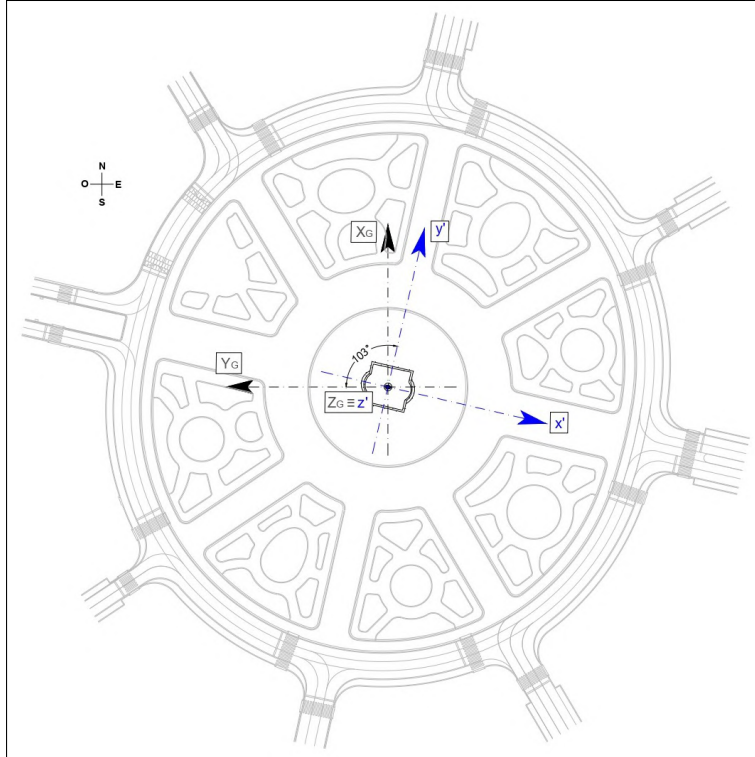


Figura 3.13: Sistemas de Referência Global e de Montagem
Fonte: Arêde et al. (2024)

O Sistema de Eixos de Montagem será utilizado para converter os eixos locais de cada um dos instrumentos de monitorização (tópico abordado na Secção 3.3.3). Para realizar a conversão dos eixos de montagem para globais, aplicam-se as seguintes equações onde $\beta = -103^\circ$:

$$X_G = x' \cdot \cos(\beta) - y' \cdot \sin(\beta) \quad (3.1)$$

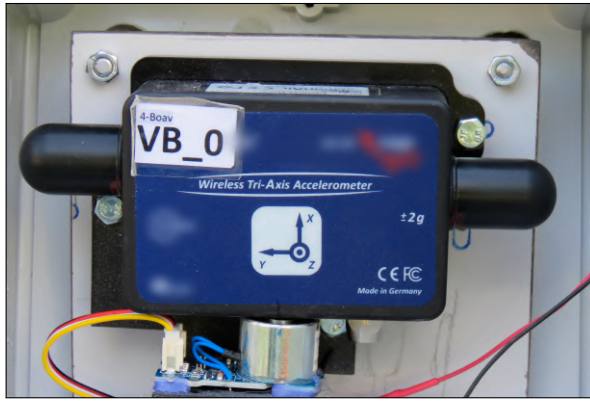
$$Y_G = x' \cdot \sin(\beta) + y' \cdot \cos(\beta) \quad (3.2)$$

$$Z_G = z' \quad (3.3)$$

3.3.3. AJUSTE DO SISTEMA DE EIXOS

3.3.3.1. Sistema de Eixos dos Acelerómetros

Os sensores de vibração consistem em acelerómetros triaxiais, que têm um sistema de coordenadas local designado por x , y e z , que constam nos próprios sensores, como é apresentado nas Figuras 3.14a e 3.14b.



(a) Acelerómetro VB_00

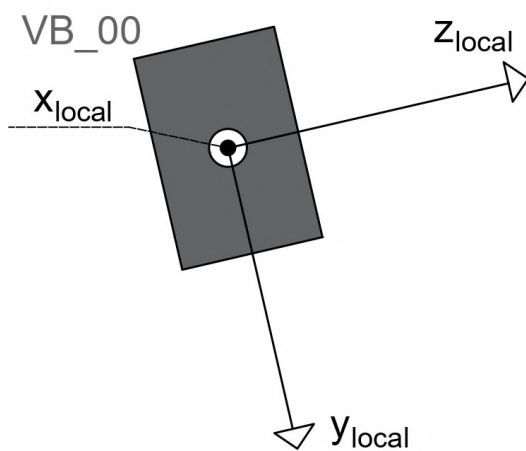


(b) Acelerómetro VB_02

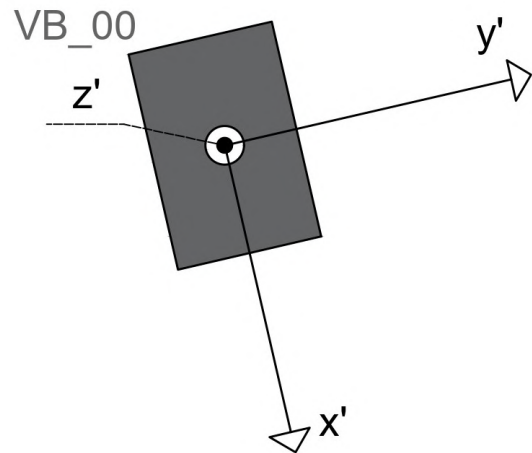
Figura 3.14: Sistema de Eixos Local dos Acelerómetros
 Fonte: Arêde et al. (2024)

É necessário efetuar a conversão de componentes no sistema de eixos local para o sistema de eixos de montagem, levando em consideração a orientação das montagens ilustradas nas Figuras 3.15 e 3.16. Para garantir a clareza nas conversões dos eixos, serão utilizadas as nomenclaturas x_{local} , y_{local} e z_{local} para os eixos locais dos sensores e x' , y' e z' para os eixos de montagem anteriormente referidos.

a) **Nível da Base (VB_00):**



(a) Sistema de Eixos Locais



(b) Sistema de Eixos de Montagem

Figura 3.15: Representação da Conversão de Eixos do VB_00
 Fonte: Autoria Própria (2024)

$$x' = y_{local} \quad (3.4)$$

$$y' = z_{local} \quad (3.5)$$

$$z' = x_{local} \quad (3.6)$$

b) Em Altura (VB_02):

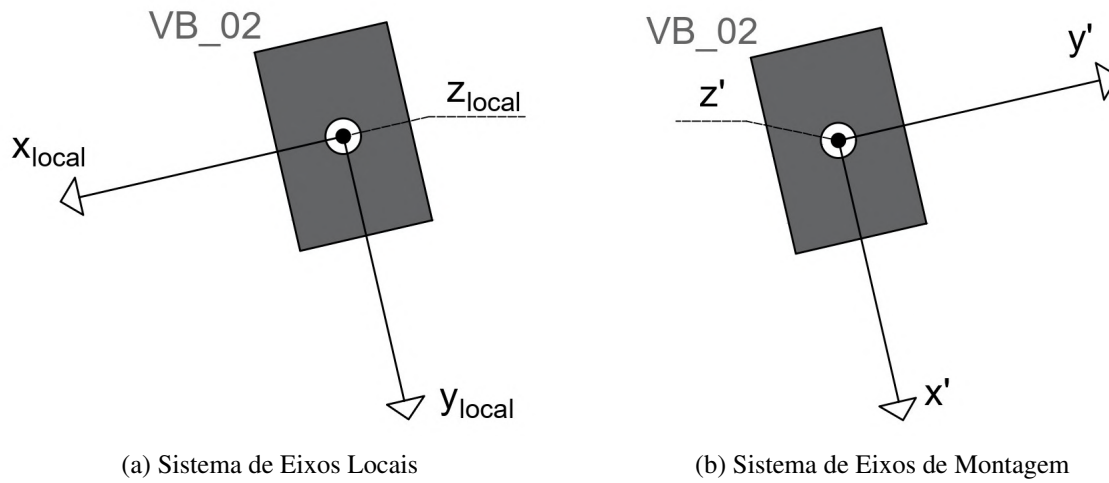


Figura 3.16: Representação da Conversão de Eixos do VB_02
Fonte: Autoria Própria (2024)

$$x' = y_{local} \quad (3.7)$$

$$y' = -x_{local} \quad (3.8)$$

$$z' = z_{local} \quad (3.9)$$

3.3.3.2. Sistema de Eixos do Clinómetro

O clinómetro é triaxial e possui três direções com as denominações x , y e z , conforme consta no próprio sensor e ilustrado na Figura 3.17.



Figura 3.17: Sistema de Eixos do Clinómetro
Fonte: Arêde et al. (2024)

De acordo com o manual do equipamento e com os testes realizados em laboratório, o valor de rotação indicado para um determinado eixo corresponde a uma rotação no plano que contém esse mesmo eixo, na direção oposta à indicada pela seta. Em outras palavras, inclinações registadas como sendo relativas

a x resultam de uma rotação do plano vertical yz no sentido oposto ao semieixo positivo x , designada de CL_X . De forma similar, inclinações relativas a y correspondem a uma rotação do plano vertical xz no sentido oposto ao semieixo positivo y , designada de CL_Y . É importante realçar que os resultados obtidos do vetor z (CL_Z) não são considerados, visto que não são representativos para o trabalho.

Para garantir clareza nas conversões dos eixos, serão utilizadas as nomenclaturas x_{local} e y_{local} (Figura 3.18a) para os eixos locais dos sensores, e x' e y' (Figura 3.18b) para os eixos de montagem anteriormente referidos.

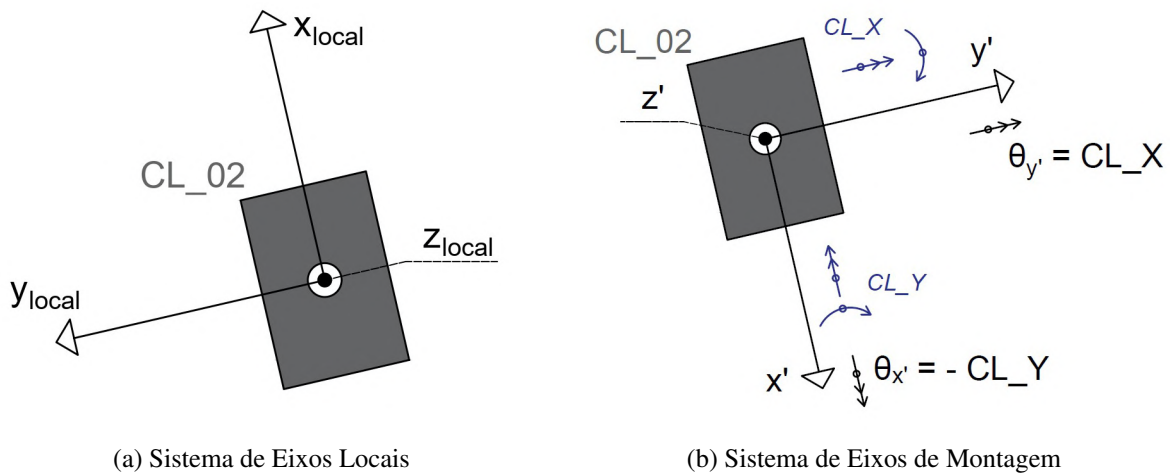


Figura 3.18: Representação da Conversão de Eixos do CL_02
Fonte: Autoria Própria (2024)

De acordo com a montagem específica do sensor (Figura 3.19), instalado de forma a estar rigidamente fixado no Monumento da Boavista, no Nível Z_02, são feitas as correspondências das coordenadas geométricas (Equações 3.10a e 3.11a) e a correspondência dos vetores rotação θ (Equações 3.10b e 3.11b).

$$x' = -x_{local} \quad (3.10a)$$

$$\theta_{x'} = -CL_Y \quad (3.10b)$$

$$y' = -y_{local} \quad (3.11a)$$

$$\theta_{y'} = CL_X \quad (3.11b)$$



Figura 3.19: Instalação do Clinómetro
Fonte: Arêde et al. (2024)

A partir das correspondências estabelecidas, é viável converter os valores do sistema de eixos de montagem para o sistema de eixos global, utilizando as Equações 3.1, 3.2 e 3.3. Nesse processo, consideram-se para as acelerações as componentes dos vetores de translação nas direções e sentidos positivos de x' , y' e z' , e para as rotações as componentes dos vetores rotação $\theta_{x'}$ e $\theta_{y'}$ nas direções e sentidos positivos de x' e y' , respetivamente.

Após a conversão para o sistema de eixos global, as orientações e sentido dos movimentos são os seguintes:

- Acelerações:
 - a_{X_G} = aceleração segundo X_G , i.e., positiva de Sul para Norte;
 - a_{Y_G} = aceleração segundo Y_G , i.e., positiva de Este para Oeste; e
 - a_{Z_G} = aceleração segundo Z_G , i.e., positiva ascendente.
- Rotações:
 - θ_{X_G} = rotação em torno do semieixo positivo X_G , i.e. rodando de Oeste para Este; e
 - θ_{Y_G} = rotação em torno do semieixo positivo Y_G , i.e. rodando de Sul para Norte.

3.3.4. PROCEDIMENTO DE INSTALAÇÃO

Primeiramente foi feita uma definição em planta e em alçado da localização dos sensores e demais instrumentos de monitorização, conforme apresenta as Figuras 3.20 e 3.21.

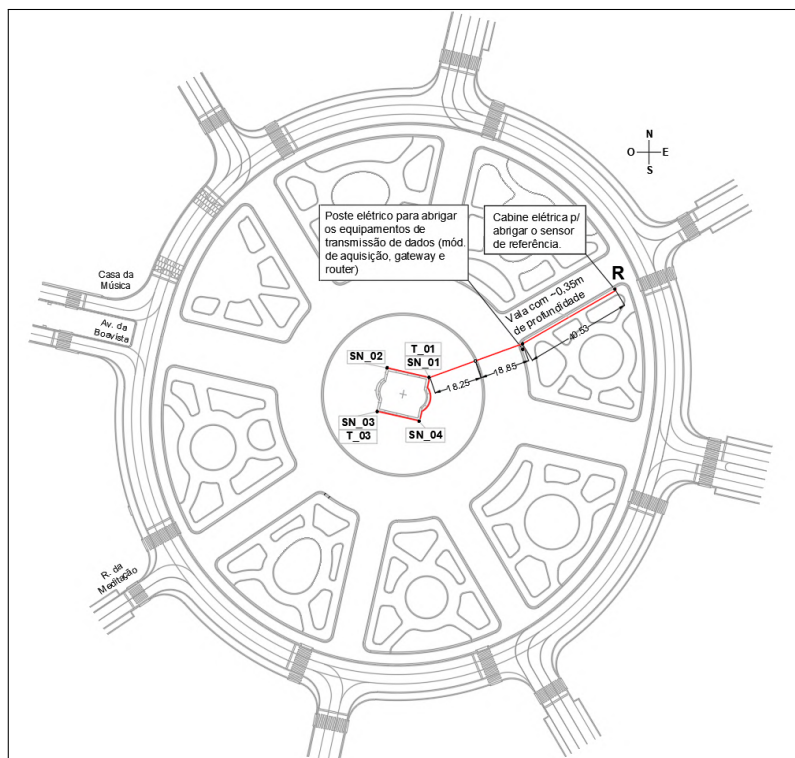


Figura 3.20: Distribuição e conexão física de sensores e equipamentos na zona Z_00
Fonte: Arêde et al. (2024)

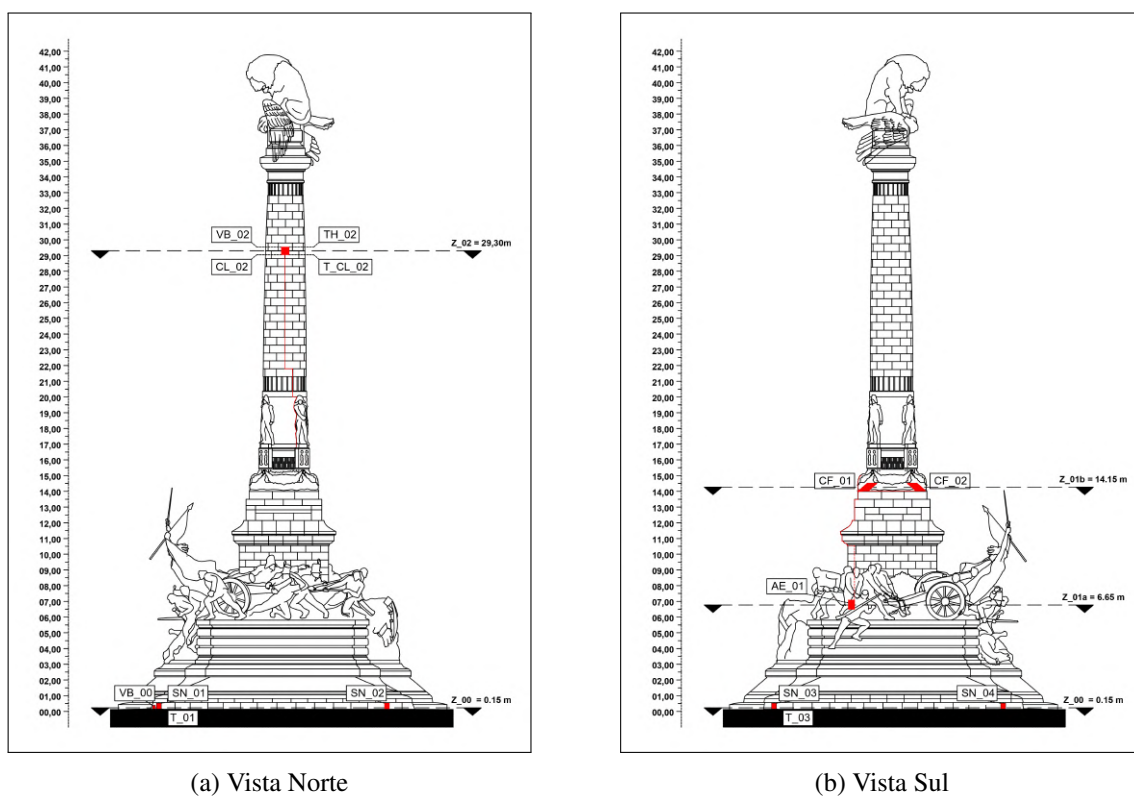


Figura 3.21: Localização e conexão física dos sensores e instrumentos instalados no Monumento
Fonte: Arêde et al. (2024)

Posteriormente, realizou-se a instalação dos equipamentos, seguindo o procedimento abaixo.

1. Instalações prévias (Figura 3.22): Colocação das caixas para abrigar os sensores de nível (Z_00) e abertura das valas e passagem das condutas contendo já as ligações físicas (cabos e tubos hidráulicos) enterradas.



(a) Abertura das valas



(b) Caixa para abrigar o sensor de nível



(c) Conexão entre as caixas dos sensores de nível

Figura 3.22: Instalações Prévias
Fonte: Arêde et al. (2024)

2. Instalação em altura: com o auxílio de uma grua, foi realizada a instalação dos painéis coletores fotovoltaicos (CF_01 e CF_02) e da unidade de armazenamento de energia solar (AE_01), indicados na Figura 3.21b; e instalação da caixa com o acelerómetro, clinómetro e sensor de temperatura na zona Z_02 (Figura 3.21a).



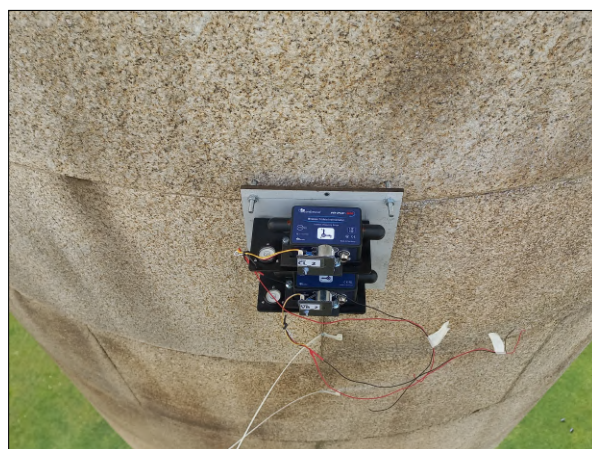
(a) Instalação de um coletor fotovoltaico



(b) Coletor fotovoltaico instalado



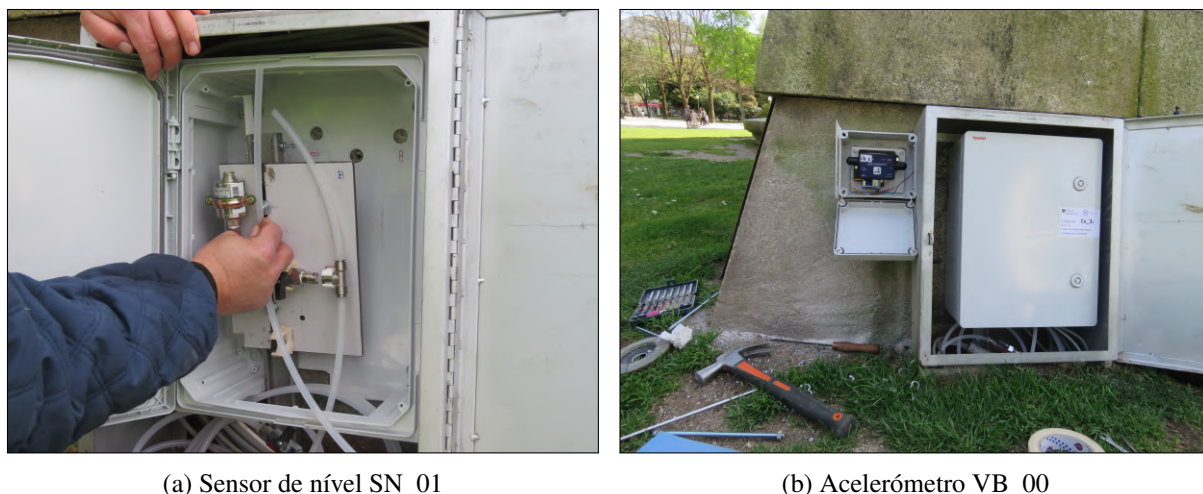
(c) Conexões por cabos



(d) Sensores instalados na Zona Z_02

Figura 3.23: Instalações em Altura
Fonte: Arêde et al. (2024)

3. Instalações no nível da base: ligação dos sensores de nível, do acelerómetro VB_00, dos sensores de temperatura T_01 e T_03 e dos sensores de nível SN_01, SN_02, SN_03 e SN_04, com a devida calibração desses (abordado na Secção 3.4).



(a) Sensor de nível SN_01

(b) Acelerómetro VB_00

Figura 3.24: Instalações no nível da base
 Fonte: Arêde et al. (2024)

3.4. CALIBRAÇÃO DOS SENSORES

A necessidade de calibrar os sensores neste sistema de monitorização surgiu devido às montagens eletrónicas realizadas e para assegurar a precisão das medições.

Enquanto os acelerómetros e clinómetros possuem certificação de calibração do fabricante, apenas os sensores de nível e sensores de temperatura necessitavam de calibração. As calibrações de ambos ocorreram no Laboratório de Estruturas do DEC-FEUP (LE-FEUP). Adicionalmente, os sensores de nível também passaram por calibração após a montagem de todo equipamento (sensores e sistema de aquisição) para ter em conta as condições físicas reais de toda a cadeia de instrumentação.

3.4.1. CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE NÍVEL

Os sensores de nível foram instalados, em laboratório, num sistema que permitiu aplicar um deslocamento a cada sensor a calibrar, controlado pela leitura de um transdutor de deslocamento de referência também conectado ao mesmo sistema.

Para a calibração dos sensores, foi utilizado um LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) como sensor de referência. Com este transdutor de referência, foram realizados ciclos de deslocamentos de $\pm 25\text{mm}$, com intervalos intermédios e tempo suficiente para a estabilização do sistema hidráulico que conecta os sensores de nível ao reservatório de água de superfície livre.

A partir da leitura simultânea dos valores de tensão em *miliampere* (saída dos sensores de nível, onde valores positivos indicam aumento de pressão e, conseqüentemente, deslocamento para baixo) e do deslocamento (em *mm*) do sensor de referência, foram obtidas as correlações lineares detalhadas no Anexo B, que incluem a expressão da respetiva função de correlação e coeficiente de determinação da regressão linear.

Apesar desta calibração, para o cálculo de assentamentos na fase definitiva de monitorização *in situ*, foi

adotada a correlação obtida através de uma segunda calibração realizada *in situ*, por ser a que melhor reflete as condições reais do sistema de monitorização, em termos elétricos e hidráulicos.

3.4.2. CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA

Os sensores de temperatura T_Ref, T_01 e T_03 foram sujeitos a um processo de calibração em laboratório, realizado numa câmara de temperatura controlada no intervalo de 5°C a 40°C.

Essas calibrações foram conduzidas registando, para cada sensor, os resultados de corrente em *miliampere* (mA) e os correspondentes valores de temperatura em graus Celsius (°C), obtidos de um sensor de controlo também colocado na câmara de temperatura, como documentado no Anexo C. É relevante destacar que todos os coeficientes de determinação provenientes da regressão linear foram acima de 0.99, evidenciando a fiabilidade e a precisão dos resultados.

3.4.3. RESUMO DOS RESULTADOS DAS CALIBRAÇÕES

A Tabela 3.1 apresenta um resumo dos resultados da calibração, exibindo a qual Módulo de Aquisição e Canal estão ligados os sensores, bem como os fatores *m* e *b* para a conversão dos valores de mA para mm ou para °C, conforme especificado na Equação 3.12.

$$Y(^{\circ}C \text{ ou } mm) = m \cdot X(mA) + b \quad (3.12)$$

Nome do Módulo	N.º id. do Módulo	Id. do Canal	Nome do Sensor	Unidade	m	b
					(°C ou mm/mA)	(°C ou mm)
M1	E14D1	ch0	SN_01	mm	12.9428	-116.6869
		ch1	SN_02	mm	12.8814	-107.5065
		ch2	SN_03	mm	12.8814	-92.5994
		ch3	SN_04	mm	12.9270	-92.3481
M2	E1256	ch0	SN_Ref	mm	12.8206	-143.5729
		ch1	T_Ref	°C	6.2143	-25.0012
		ch2	T_01	°C	6.3626	-25.8588
		ch3	T_03	°C	6.2633	-25.2440

Tabela 3.1: Resumo da Calibração dos Sensores de Nível e de Temperatura

Fonte: Arêde et al. (2024)

4

IMPLEMENTAÇÃO DO DIGITAL TWIN ESTRUTURAL

4.1. DESENVOLVIMENTO DO MODELO BIM

Entre as opções de *software* para a construção do *digital twin* apresentadas no subcapítulo 2.5, escolheu-se o APS. Para desenvolver o modelo BIM, decidiu-se usar o *software Autodesk Revit*, da mesma empresa, para facilitar e otimizar a interação entre as aplicações.

O modelo em Revit do Monumento aos Heróis da Guerra Peninsular foi desenvolvido a partir dos desenhos em AutoCAD 2D e de imagens dos 4 alçados do Obelisco (apresentados na Figura 4.1), feitos com base num levantamento fotográfico detalhado por *drone*, visando planear e realizar a instalação dos instrumentos de monitorização e fornecidos pela equipa responsável do projeto.



Figura 4.1: Alçados nascente, norte, sul e poente (da esquerda para a direita) do Monumento
Fonte: Arêde et al. (2024)

Considerando a complexidade e irregularidade do Monumento na modelação, foram realizadas algumas simplificações, que é razoável admitir terem um impacto mínimo nos resultados. Para isso, dividiu-se o monumento em elementos com diferentes geometrias, cada um modelado e inserido como uma família no modelo principal.

Quanto ao nível de desenvolvimento parametrizado pelo *American Institute of Architects*, conforme descrito na Tabela 2.1, o modelo criado aproximou-se do LOD300, pese embora, devido às simplificações mencionadas anteriormente, não possa ser estritamente classificado como tal.

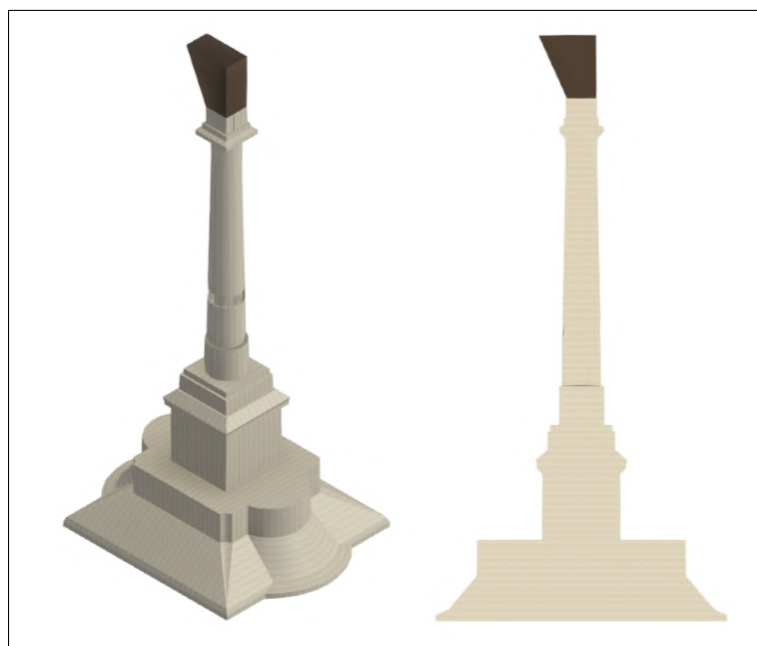


Figura 4.2: Modelo em Revit do Obelisco - Vista 3D e Alçado Norte
Fonte: Captura de Tela do Revit (2024)

4.2. RECOLHA E PROCESSAMENTO DE DADOS

A estratégia adotada para a aquisição e processamento de dados neste estudo baseou-se nos procedimentos propostos por Silva et al. (2024), para uma edificação também sob monitorização no âmbito do mesmo projeto. Entretanto, foram necessárias algumas adaptações devido às particularidades do sistema de aquisição e aos sensores empregados no presente caso.

É crucial compreender o funcionamento e a natureza das medições realizadas pelos diferentes sensores utilizados. Essas informações podem ser obtidas por meio dos relatórios de instalação, que fornecem uma descrição concisa do equipamento, e nos manuais dos dispositivos, onde é possível uma análise mais detalhada. No caso de sensores analógicos que realizam medições de corrente elétrica, é imprescindível realizar a conversão do sinal para o formato digital, bem como proceder com a calibração, que consiste na obtenção de uma correlação entre os valores medidos e os parâmetros a serem avaliados, conforme descrito na Secção 3.4. Os resultados desses procedimentos foram incorporados diretamente no *software* do sistema de aquisição, especificamente no *Beanscape*.

O processamento dos dados foi realizado em ambiente de programação, procedente da base de dados do InfluxDB. Optou-se por manter a estrutura dos dados brutos, adicionando apenas o sufixo “_processado” para distinguir entre os canais que contêm dados brutos e aqueles que contêm dados já tratados, organizados por tipo de sensor.

As etapas deste procedimento, implementadas por meio de programação na linguagem *Python*, incluem:

- Ligação à instância da base de dados do InfluxDB.
- A cada intervalo de 5 minutos, são verificados os dados mais recentes inseridos para cada sensor. Estes dados são então tratados (i.e., sujeitos a processamentos específicos), começando a partir do último ponto registado até ao dado mais recente na base de dados.
- Após estabelecer as janelas temporais para o processamento, os dados brutos ou originais (*raw data*) são consultados e compilados numa tabela. Esta tabela é então sujeita a tratamento, com funções específicas para cada sensor, que incluem diferentes etapas de processamento e consistem em:
 1. Tratamento inicial por tipologia do sensor
 2. Tratamento dos Sensores de Nível
 3. Tratamento dos Clinómetros
 4. Tratamento dos Acelerómetros
- A tabela de valores brutos é atualizada com os valores tratados, e são adicionadas algumas propriedades para preparar o esquema de *upload* dos dados na base de dados. O nome é definido combinando o nome do sensor que contém os dados brutos com o sufixo “_processado”.
- Realização do *upload* dos dados processados para a base de dados do InfluxDB.

4.2.1. TRATAMENTO INICIAL POR TIPOLOGIA DO SENSOR

Conforme apresentado na Secção 3.3.3, é preciso ajustar o sistema de eixos local de cada sensor para o sistema de eixos de montagem. Durante esta fase inicial de tratamento, os dados dos sensores são convertidos para a nova nomenclatura. Contudo, é importante salientar que em alguns casos os dados de certos sensores precisam ser multiplicados por -1 , o que ainda não é realizado nesta etapa.

Adicionalmente, nesta etapa, é definido o *offset*, que pode ser empregue para “zerar” os dados dos sensores, ajustando-os para uma referência específica. No contexto atual, como os *offsets* foram aplicados previamente no *software* do módulo de aquisição, foram configurados como 0 durante o processamento dos dados. A Figura 4.3 ilustra o código correspondente.

```

sensor_data = [
  {"_measurement": "VB_00_X_Local", "new_name": "VB_00_Z_processado", "Channel": "ch0", "offset": 0},
  {"_measurement": "VB_00_Y_Local", "new_name": "VB_00_XG_processado", "Channel": "ch1", "offset": 0},
  {"_measurement": "VB_00_Z", "new_name": "VB_00_YG_processado", "Channel": "ch2", "offset": 0},
  {"_measurement": "VB_02_X_Local", "new_name": "VB_02_YG_processado", "Channel": "ch0", "offset": 0},
  {"_measurement": "VB_02_Y_Local", "new_name": "VB_02_XG_processado", "Channel": "ch1", "offset": 0},
  {"_measurement": "VB_02_Z", "new_name": "VB_02_Z_processado", "Channel": "ch2", "offset": 0},
  {"_measurement": "CL_02_X_Local", "new_name": "CL_02_YG_processado", "Channel": "ch0", "offset": 0},
  {"_measurement": "CL_02_Y_Local", "new_name": "CL_02_XG_processado", "Channel": "ch1", "offset": 0},
  {"_measurement": "CL_02_Z", "new_name": "CL_02_Z_processado", "Channel": "ch2", "offset": 0},
  {"_measurement": "T_CL_02", "new_name": "T_CL_02_processado", "Channel": "ch3", "offset": 0},
  {"_measurement": "SN_00-Ref", "new_name": "SN_00-Ref_processado", "Channel": "ch0", "offset": 0},
  {"_measurement": "SN_01-B", "new_name": "SN_01-B_processado", "Channel": "ch0", "offset": 0},
  {"_measurement": "SN_02-C", "new_name": "SN_02-C_processado", "Channel": "ch1", "offset": 0},
  {"_measurement": "SN_03-D", "new_name": "SN_03-D_processado", "Channel": "ch2", "offset": 0},
  {"_measurement": "SN_04-E", "new_name": "SN_04-E_processado", "Channel": "ch3", "offset": 0},
  {"_measurement": "T_00-Ref", "new_name": "T_00-Ref_processado", "Channel": "ch1", "offset": 0},
  {"_measurement": "T_01-B", "new_name": "T_01-B_processado", "Channel": "ch2", "offset": 0},
  {"_measurement": "T_03-D", "new_name": "T_03-D_processado", "Channel": "ch3", "offset": 0},
  {"_measurement": "T_02-F", "new_name": "T_02-F_processado", "Channel": "ch0", "offset": 0},
  # {"_measurement": "HR_02-F", "new_name": "HR_02-F_processado", "Channel": "ch1", "offset": 0},
  # {"_measurement": "PO_02-F", "new_name": "PO_02-F_processado", "Channel": "ch2", "offset": 0},
]

```

Figura 4.3: Tratamento de dados por tipologia
Fonte: Silva et al. (2024)

4.2.2. TRATAMENTO DOS SENSORES DE NÍVEL

Os valores a considerar necessitam de ser ajustados por um desvio, que corresponde ao ponto de referência da medição, ou seja, o valor de referência em torno do qual ocorrem as variações em relação à condição normal. A normalidade é definida pela ausência ideal de perturbação, ou pela presença de perturbações não relacionadas com os efeitos das obras. Dado que é impossível estabelecer uma normalidade precisa, uma vez que não existe um ponto zero real, mas apenas uma medição contínua com flutuações, é necessário encontrar uma abordagem para estimar a tendência dos valores que seriam registados na ausência de perturbações.

Neste contexto, optou-se por avaliar a variação do nível com base em um ponto inicial. O valor do ponto inicial, para cada Sensor de Nível, determina a referência a ser subtraída de todos os sensores, incluindo o Sensor de Nível de Referência (SN_00-Ref).

Após a subtração dos desvios, as variações registadas pelo SN_00-Ref representam as oscilações no nível da mangueira de água devido a efeitos externos ao sistema que conecta todos os sensores de nível, tais como a evaporação, uma vez que este sensor está posicionado em uma área onde não são esperados assentamentos.

Os valores medidos pelo SN_00-Ref são subtraídos dos valores medidos pelos outros sensores, de modo a mitigar a influência desses efeitos externos. Essa abordagem permite desconsiderar variações no nível da água causadas por fenómenos não relacionados com a estrutura monitorizada, garantindo assim uma avaliação mais precisa das condições reais do sistema.

Após a aplicação dos desvios e da compensação em relação à referência nos sensores de nível, os valores resultantes são inseridos nos *dataframes* originais. Este procedimento de processamento dos dados é detalhado no código apresentado na Figura 4.4.

```
def processamento_sensores_nivel(dataframes_list, sensor_data):
    # Criar um dicionário para armazenar os dataframes SN_Ref indexados pelo bucket
    sn_ref_dataframes = {}

    # Iterar sobre os dataframes dos sensores de nível
    for _measurement, dataframe in dataframes_list:
        print(f"Processando o sensor: {_measurement}")

        # Encontrar o offset correspondente ao sensor
        offset = next((info["offset"] for info in sensor_data if info["_measurement"] == _measurement), 0)

        # Subtrair o offset aos valores da coluna "values"
        dataframe['values'] = dataframe['values'] - offset

        # Se for o sensor de referência (SN_Ref), armazená-lo no dicionário
        if _measurement == 'SN_00-Ref':
            sn_ref_dataframes[_measurement] = dataframe
        else:
            # Se não for o sensor de referência, realizar a compensação utilizando o SN_Ref do mesmo bucket
            sn_ref_dataframe = sn_ref_dataframes.get('SN_00-Ref')
            if sn_ref_dataframe is not None:
                dataframe['values'] = dataframe['values'] - sn_ref_dataframe['values']

    return dataframes_list
```

Figura 4.4: Tratamento dos Sensores de Nível
Fonte: Silva et al. (2024)

4.2.3. TRATAMENTO DOS CLINÓMETROS

A Secção 3.3.3.2 mostra que a série de valores do sensor CL_02_Y_local é invertida, ou seja, todos os seus valores são multiplicados por -1 .

Posteriormente, os valores das séries X_Local e Y_Local, que aqui representam já os valores no sistema de eixos de montagem (x' e y'), são atribuídos às direções globais, ocorrendo a troca dos eixos nesse processo. Tal ação é realizada mediante a aplicação das Equações 3.1 e 3.2. Em seguida, os valores resultantes são substituídos nos *dataframes* originais, conforme apresenta a Figura 4.5.

```
def processamento_clinometros(dataframes_list, sensor_data):
    # Dicionário temporário para armazenar os resultados das operações
    temp_results = {}

    for _measurement, dataframe in dataframes_list:
        # Aceder ao dicionário sensor_data e obter o offset específico para esse sensor
        offset = next(item for item in sensor_data if item["_measurement"] == _measurement)["offset"]

        # Subtrair o offset aos valores da coluna "values"
        dataframe['values'] = dataframe['values'] - offset

        # Se for o sensor CL_02_Y_local, multiplicar todos os valores por -1
        if _measurement == 'CL_02_Y_Local':
            dataframe['values'] = dataframe['values'] * -1

        # Verificar se o dataframe CL_02_X_local está presente na lista
        cl02_x_dataframe = next((dataframe for measurement, dataframe in dataframes_list if measurement == 'CL_02_X_Local'), None)
        if cl02_x_dataframe is not None:
            cl02_x_values = cl02_x_dataframe['values']
            cl02_y_values = next(dataframe for measurement, dataframe in dataframes_list if measurement == 'CL_02_Y_Local')['values']

            # Realizar a segunda operação entre os dois dataframes originais
            temp_results['CL_02_X_Local'] = (-0.224951) * cl02_x_values + 0.974370 * cl02_y_values

            # Realizar a primeira operação entre os dois dataframes originais
            temp_results['CL_02_Y_Local'] = (-0.974370) * cl02_x_values + (-0.224951) * cl02_y_values

        # Substituir os valores nos dataframes originais após a realização das operações
        for _measurement, dataframe in dataframes_list:
            if _measurement in ['CL_02_Y_Local', 'CL_02_X_Local']:
                dataframe['values'] = temp_results[_measurement]
```

Figura 4.5: Tratamento dos Clinómetros
Fonte: Silva et al. (2024)

4.2.4. TRATAMENTO DOS ACELERÓMETROS

Efetua-se a transformação dos valores por meio das componentes nos eixos locais de montagem (no código designados por X_local e Y_local), utilizando a informação fornecida na Secção 3.3.3.1 como referência. Estes valores são então substituídos nos *dataframes* originais. Conforme ilustrado na Figura 4.6, o processo se inicia com o sensor VB_00, seguido pelo sensor VB_02.

```
def processamento_acelerometros(dataframes_list, sensor_data):
    vb00_x_dataframe = next((dataframe for measurement, dataframe in dataframes_list if measurement == 'VB_00_Y_Local'), None)
    vb00_y_dataframe = next((dataframe for measurement, dataframe in dataframes_list if measurement == 'VB_00_Z'), None)
    vb02_x_dataframe = next((dataframe for measurement, dataframe in dataframes_list if measurement == 'VB_02_Y_Local'), None)
    vb02_y_dataframe = next((dataframe for measurement, dataframe in dataframes_list if measurement == 'VB_02_X_Local'), None)

    if vb00_x_dataframe is not None and vb00_y_dataframe is not None:
        vb00_x_values = vb00_x_dataframe['values']
        vb00_y_values = vb00_y_dataframe['values']

        temp_results = {}
        temp_results['VB_00_Y_Local'] = (-0.224951) * vb00_x_values + 0.974370 * vb00_y_values
        temp_results['VB_00_Z'] = (-0.974370) * vb00_x_values + (-0.224951) * vb00_y_values

        for _measurement, dataframe in dataframes_list:
            if _measurement in ['VB_00_Y_Local', 'VB_00_Z']:
                dataframe['values'] = temp_results[_measurement]

    if vb02_x_dataframe is not None and vb02_y_dataframe is not None:
        vb02_x_values = vb02_x_dataframe['values']
        vb02_y_values = vb02_y_dataframe['values']

        temp_results = {}
        temp_results['VB_02_Y_Local'] = (-0.224951) * vb02_x_values - 0.974370 * vb02_y_values
        temp_results['VB_02_X_Local'] = (-0.974370) * vb02_x_values + (0.224951) * vb02_y_values

        for _measurement, dataframe in dataframes_list:
            if _measurement in ['VB_02_Y_Local', 'VB_02_X_Local']:
                dataframe['values'] = temp_results[_measurement]
```

Figura 4.6: Tratamento dos Acelerómetros
Fonte: Silva et al. (2024)

4.3. DESENVOLVIMENTO DO MODELO ESTRUTURAL EM SAP2000

Partindo do princípio apresentado na Secção 3.3.1, foi desenvolvido um modelo estrutural final, desta vez com elementos sólidos volumétricos, em vez de elementos de barras, utilizando o MEF. Definiu-se uma dimensão máxima de 0,50 metros para cada lado do elemento, o que garantiu resultados adequados sem prolongar demasiadamente o tempo de cálculo. A Figura 4.7 ilustra este modelo.

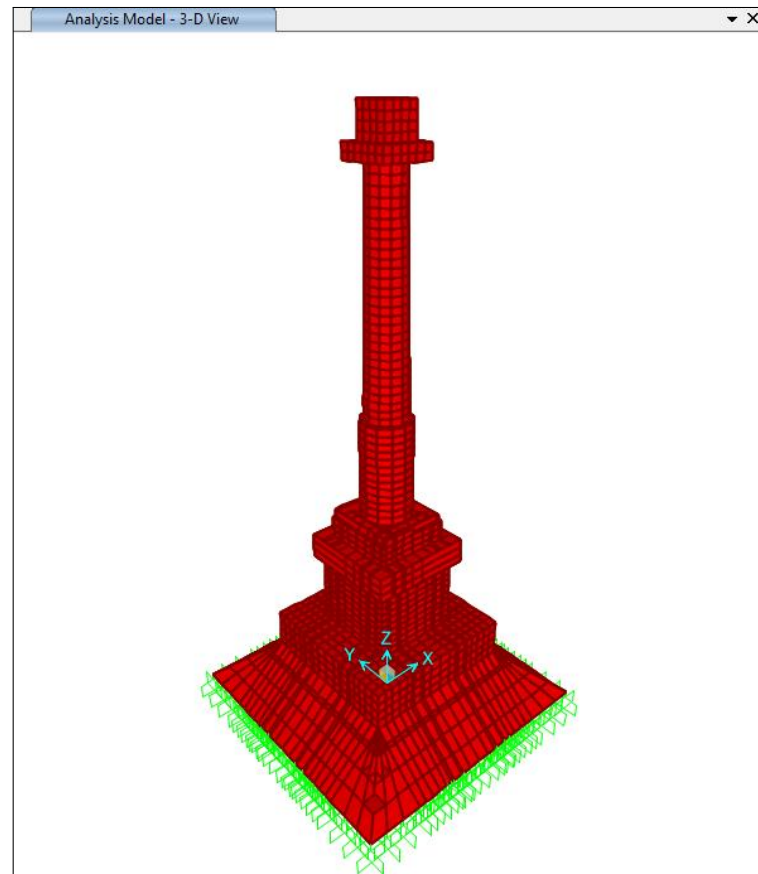


Figura 4.7: Modelo Estrutural em Elementos Sólidos no SAP2000
Fonte: Captura de Tela do SAP2000 (2024)

As dimensões coincidem com as do modelo BIM, com algumas simplificações necessárias devido à natureza mais simplificada do modelo. Quanto às propriedades mecânicas dos materiais, seguiu-se a mesma abordagem do modelo em *frames*. Este foi um ponto complexo para obter um modelo mais próximo do objeto real. Tendo em vista que não foram realizados ensaios mecânicos nem houve recolha de provetes, foi necessário definir de forma empírica e de acordo com pesquisas relacionadas ao material do Obelisco (granito).

A Figura 4.8 apresenta a janela do SAP2000 para editar as propriedades dos materiais. Dos parâmetros possíveis, definiu-se o valor do peso volúmico do granito igual a $24kN/m^3$ e o coeficiente de Poisson igual a 0.2. O valor do módulo de elasticidade foi definido inicialmente em $6GPa$, mas foi posteriormente alterado para que o modelo fosse calibrado.

Material Property Data	
General Data	
Material Name and Display Color	Granito
Material Type	Other
Material Grade	
Material Notes	Modify/Show Notes...
Weight and Mass	
Weight per Unit Volume	24.
Mass per Unit Volume	2.4473
Units	
	KN, m, C
Isotropic Property Data	
Modulus Of Elasticity, E	
Poisson, U	0.2
Coefficient Of Thermal Expansion, A	9.000E-06
Shear Modulus, G	0.

Figura 4.8: Janela de propriedades dos materiais
Fonte: Captura de Tela do SAP2000 (2024)

Durante a instalação dos instrumentos de monitorização em altura, foi realizada uma verificação *in loco* das esculturas em bronze, constatando-se que são ocas. Isso implica que o peso das esculturas não possui grande representatividade em relação ao peso da estrutura de granito. Portanto, as figuras escultóricas não foram incluídas no modelo estrutural.

4.3.1. CALIBRAÇÃO DO MODELO ESTRUTURAL

Para completar o modelo estrutural, é essencial estabelecer uma metodologia de calibração que represente satisfatoriamente o objeto real. Considerando que o Monumento é uma consola, a calibração foi baseada na frequência natural de oscilação. Após a instalação do acelerómetro em altura (VB_02), obteve-se a série de acelerações. Utilizou-se, então, a Transformada de Fourier como ferramenta para converter essa série, que está no domínio do tempo, para um sinal no domínio da frequência. A Figura 4.9 ilustra o conceito da Transformada de Fourier. A partir disso, foram determinadas as frequências naturais para os principais modos de vibração.

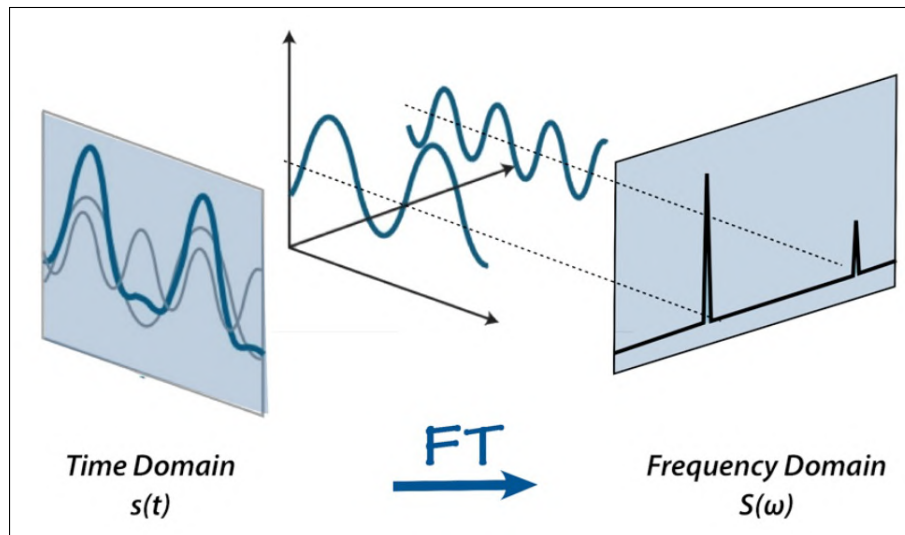


Figura 4.9: Transformada de Fourier

Fonte: STEMmporium (2023)

Utilizou-se o *software* SeismoSignal¹ para realizar a Transformada de Fourier. O SeismoSignal constitui uma forma fácil e eficiente de processar sinais de dados de movimentos, sendo capaz de derivar vários parâmetros de movimentos exigidos por engenheiros. O programa lê acelerogramas salvos em diferentes formatos de arquivos de texto, que podem ser filtrados e corrigidos na linha de base. Ele calcula os espectros de Fourier através da Transformada Rápida de Fourier (FFT), um algoritmo que calcula a Transformada Discreta de Fourier e a sua inversa, o Teorema Inverso de Fourier.

Tendo em vista que, no momento do desenvolvimento deste projeto, as obras de escavação do Metro do Porto ainda não chegaram à região do Monumento, não foi fácil obter um momento com maior vibração e, a partir dos dados dos acelerómetros, identificar com clareza as frequências naturais com a FFT. A Figura 4.10a apresenta um espectro em que não há destaque das principais frequências de vibração, enquanto a Figura 4.10b apresenta um espectro com destaque claro das frequências naturais do primeiro e segundo modos de vibração.

¹ <https://seismosoft.com/products/seismosignal/>

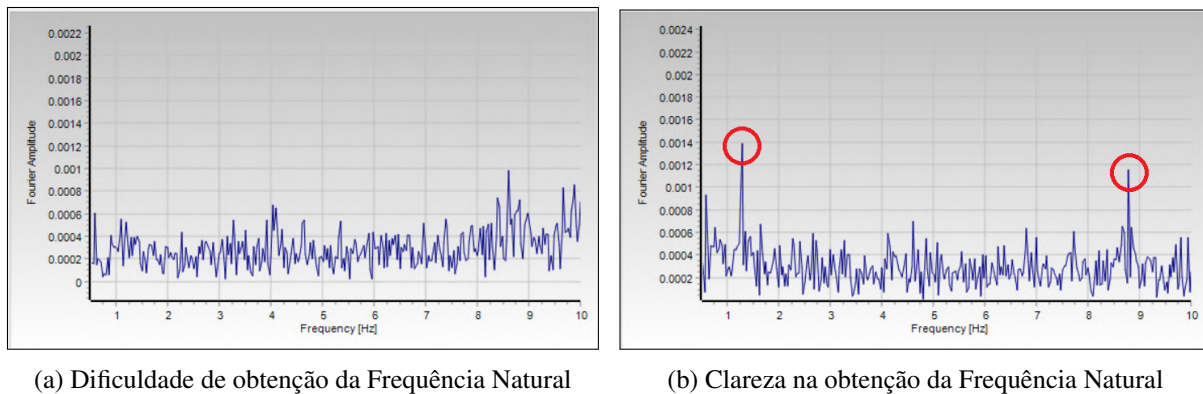


Figura 4.10: Diagramas da Amplitude de Fourier
Fonte: Autoria Própria (2024)

Os instantes em que as frequências naturais de vibração se tornaram claramente identificáveis foram selecionados, resultando na escolha de cinco espectros distintos para análise. A partir desses dados, tabularam-se os resultados correspondentes aos Modos de Vibração 1 e 2, conforme apresentado nas Figuras 4.11 e 4.12. No Modo 1, verificou-se uma uniformidade em três² dos cinco instantes, com uma média de frequência de 1,253Hz. Os outros dois valores, por se distanciarem do padrão, foram desconsiderados. Devido à ausência de um padrão identificável nas frequências naturais do Modo 2, optou-se por buscar uma calibração que se aproximasse ao máximo das frequências do Modo 1, com um erro máximo de 10% e que, no Modo 2, estivesse dentro do intervalo de frequências obtido, entre 6,470Hz e 8,789Hz.

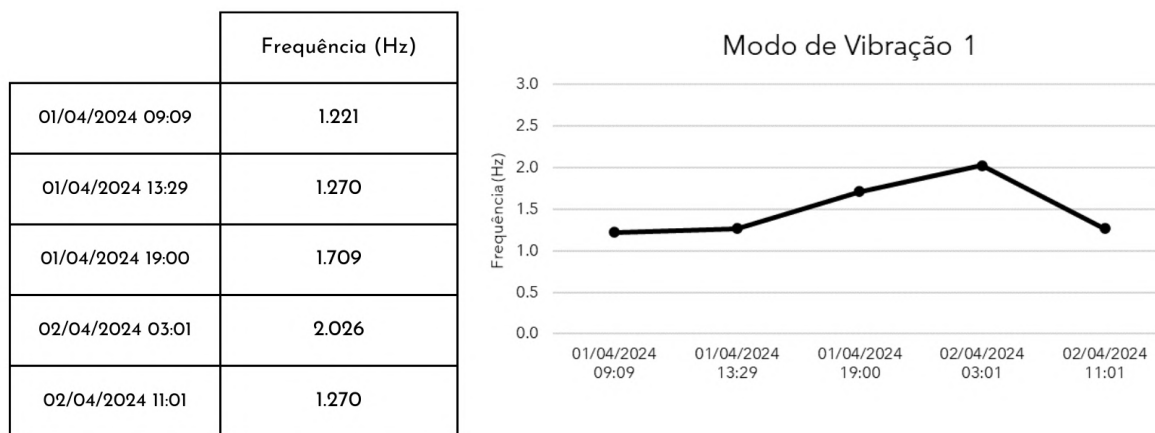


Figura 4.11: Frequência Natural - Modo de Vibração 1
Fonte: Autoria Própria (2024)

² 01/04/2024 às 09:09, 01/04/2024 às 13:29 e 02/04/2024 às 11:01

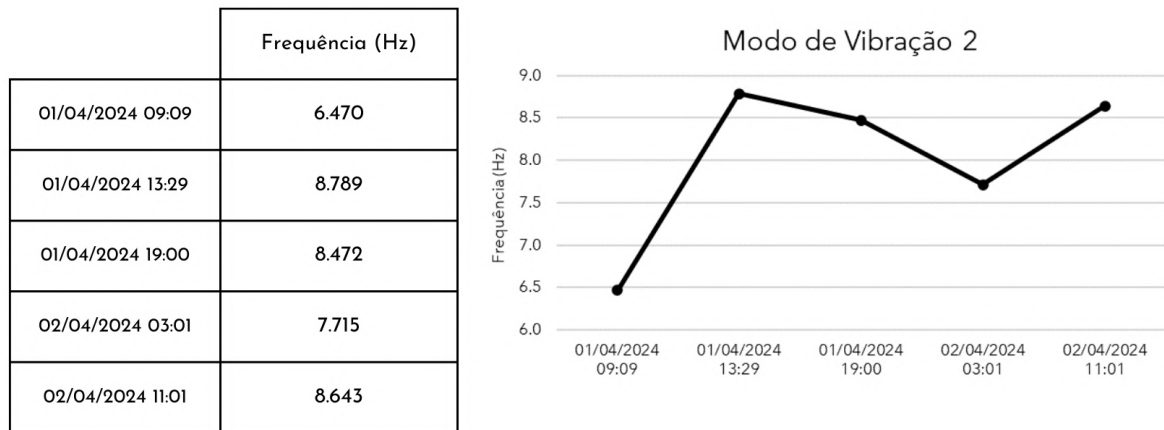


Figura 4.12: Frequência Natural - Modo de Vibração 2
Fonte: Autoria Própria (2024)

Convém salientar que a determinação das frequências de vibração do Monumento não constitui o objetivo principal da instrumentação e do sistema instalados, que foram escolhidos para a monitorização a longo prazo. Por essa razão, não foi possível registar séries temporais de acelerações com duração adequada para a obtenção precisa das frequências de vibração, em função das limitações de transmissão *wireless* do equipamento. Além disso, a obtenção das configurações dos modos de vibração, que contribuiria para uma melhor calibração das propriedades estruturais, também não foi viável devido à presença de apenas um sensor colocado em altura no monumento.

Adicionalmente, durante o desenvolvimento desta dissertação, as excitações externas registadas no Monumento não foram suficientemente intensas para identificar com precisão as suas frequências de vibração. Ainda assim, dado que o objetivo principal do trabalho não é a representação exata do Monumento, mas sim a obtenção de resultados aproximados que se assemelhem ao comportamento do objeto real, a continuidade dos trabalhos utilizando a metodologia adotada não foi considerada comprometida.

No modelo estrutural adotado, definiu-se uma divisão em duas regiões distintas, denominadas “Base” e “Fuste”, conforme ilustrado na Figura 4.13. A partir dessa configuração, buscou-se alcançar valores objetivados das frequências naturais, realizando variações no módulo de elasticidade. Como resultado, foram obtidos 1.384Hz para o Modo de Vibração 1 (com um erro de 9.42%) e 6.473Hz para o Modo de Vibração 2 (dentro do intervalo de 6,470Hz e 8,789Hz), considerando $E = 10.25GPa$ no Fuste e $E = 6.55GPa$ na Base.

Considera-se que, para os propósitos deste trabalho, a calibração alcançada se afigura razoável, embora se reconheça que os valores dos módulos de elasticidade possam estar ligeiramente elevados. Admite-se que um possível refinamento da solução envolveria a consideração da deformabilidade da fundação, o que contribuiria para a redução dos módulos de elasticidade ao longo da altura. No entanto, tal abordagem foi considerada fora do escopo desta tese.

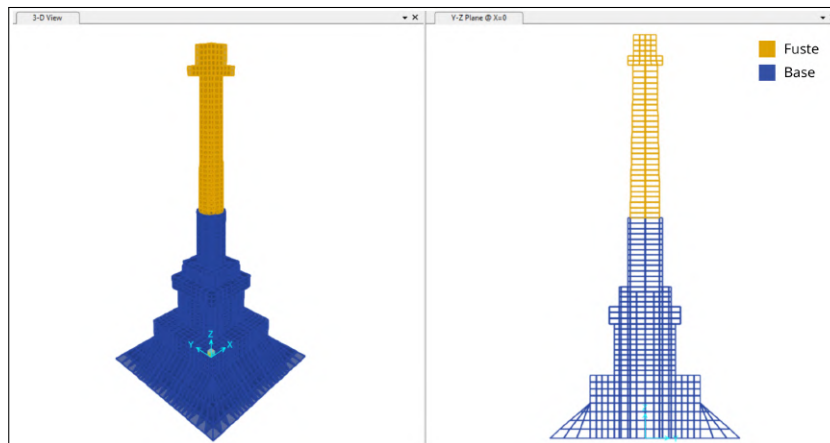


Figura 4.13: Divisão do Modelo Estrutural
Fonte: Autoria Própria (2024)

A Tabela 4.1 apresenta os resultados dos períodos e frequências obtidos no SAP2000, destacando o Modo de Vibração 1, com referências (Modo) 1 para o movimento em Y e 2 para o movimento em X, e o Modo de Vibração 2, com referências 3 para o movimento em Y e 4 para o movimento em X.

Verificou-se uma baixa quantidade de massa mobilizada pelos esforços modais nos doze primeiros modos apresentados. Isso é justificado pela geometria do modelo e pela visualização da deformada dos esforços modais. Nas Figuras 4.14a e 4.14b, observa-se que os deslocamentos concentram-se principalmente no Fuste e em muito menor medida na Base. Concomitantemente, 90% da massa do obelisco concentra-se na zona da Base, justificando a baixa percentagem de massa mobilizada.

Modo	Período	Frequência	Participação de Massa		
			X	Y	Z
1	0.727	1.376	0.01%	6.22%	0.00%
2	0.718	1.393	6.21%	0.01%	0.00%
3	0.155	6.458	0.04%	9.66%	0.00%
4	0.154	6.489	9.90%	0.04%	0.00%
5	0.089	11.249	0.10%	14.62%	0.00%
6	0.089	11.286	14.38%	0.10%	0.00%
7	0.084	11.877	0.00%	0.00%	0.00%
8	0.061	16.373	0.00%	0.00%	0.00%
9	0.057	17.536	0.00%	0.00%	21.07%
10	0.050	20.164	0.01%	2.95%	0.08%
11	0.049	20.303	3.07%	0.01%	0.01%
12	0.034	29.205	0.00%	0.00%	0.00%
Soma:			33.71%	33.61%	21.16%

Tabela 4.1: Modos de Vibração - Período, Frequência e Participação de Massa
Fonte: Autoria Própria (2024)

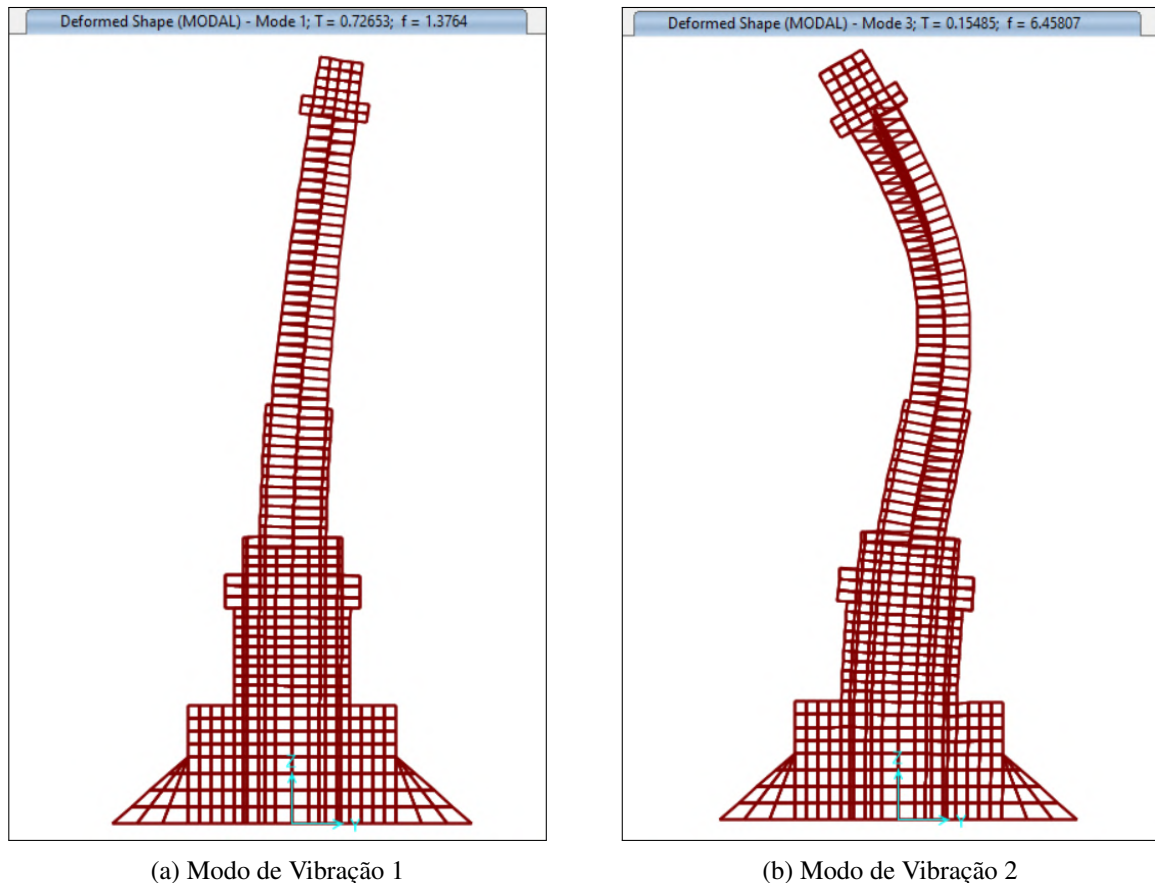


Figura 4.14: Deformadas dos Principais Modos de Vibração
Fonte: Captura de Tela do SAP2000 (2024)

4.3.2. VERIFICAÇÃO SUMÁRIA DO MODELO CALIBRADO

Após a calibração do modelo com base nas frequências naturais, foi verificada a qualidade do modelo através da análise das tensões de compressão e de tração em várias secções, a diferentes níveis do modelo, considerando apenas os esforços gerados pelo Peso Próprio (PP). Nesta etapa, foram excluídas todas as influências externas que poderiam alterar os resultados, permitindo uma avaliação mais adequada do comportamento estrutural apenas devido ao PP.

Verificou-se que as zonas de transição de secções e as áreas próximas não são ideais para obter as tensões. Por isso, os níveis seleccionados para o estudo foram todos na cota central da secção, onde as condições são mais representativas e consistentes para a análise das tensões.

A sequência de Figuras a seguir apresenta o nível em que foi feito o corte (*Section Cut*) e os respetivos diagramas em cores das tensões de compressão e de tração, todos na mesma escala e unidade (0 *kPa* a 500 *kPa*). Verificou-se que a ordem de grandeza das tensões está adequada, com valores na ordem de 300 *kPa* para compressão e praticamente nulos para tração.

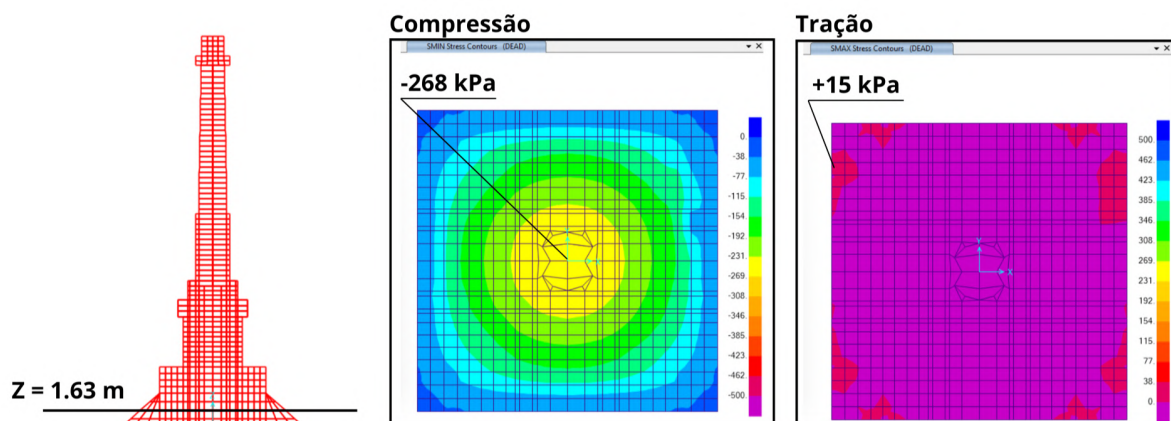


Figura 4.15: Tensões devido ao Peso Próprio na Secção em Cota 1.63m
Fonte: Autoria Própria (2024)

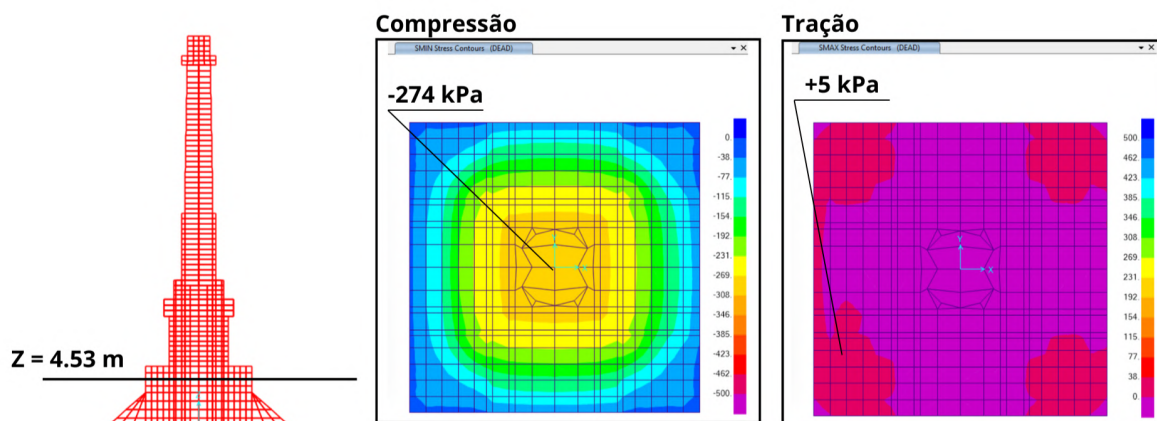


Figura 4.16: Tensões devido ao Peso Próprio na Secção em Cota 4.53m
Fonte: Autoria Própria (2024)

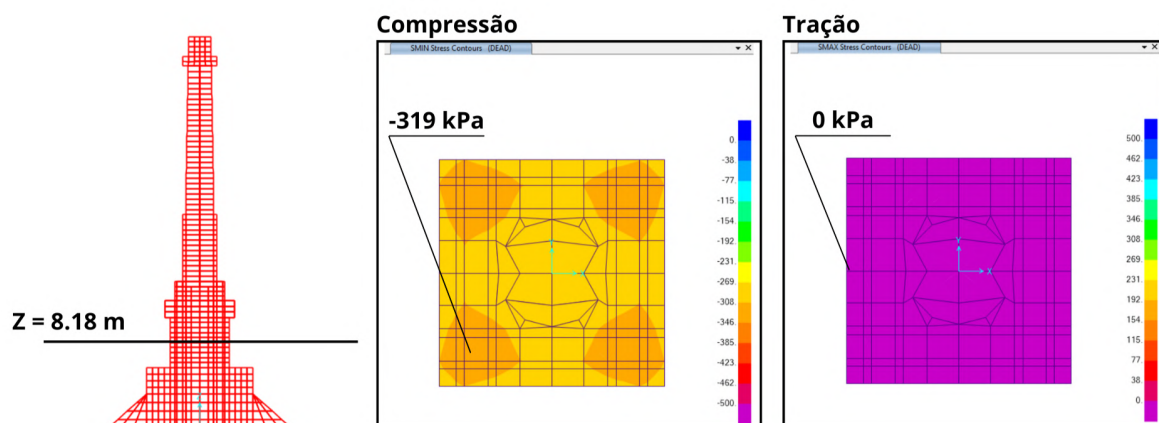


Figura 4.17: Tensões devido ao Peso Próprio na Secção em Cota 8.18m
Fonte: Autoria Própria (2024)

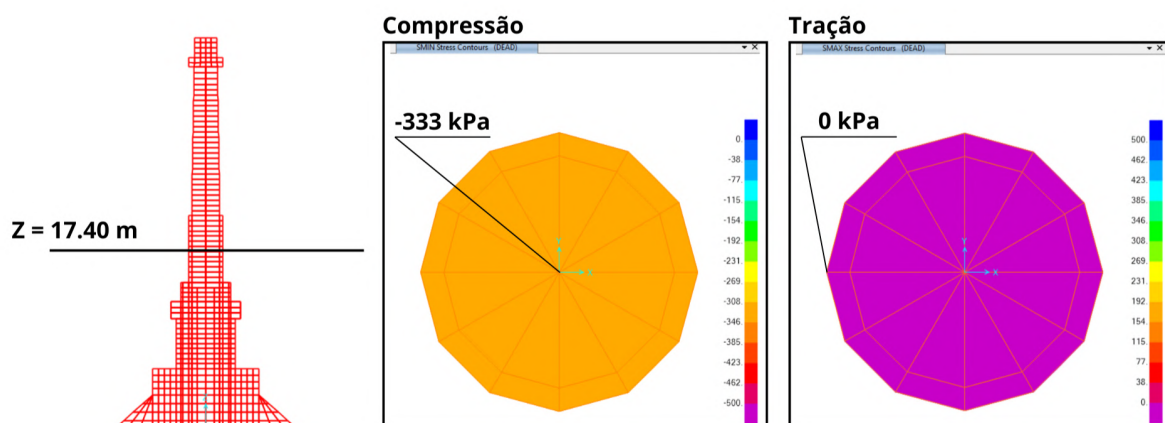


Figura 4.18: Tensões devido ao Peso Próprio na Secção em Cota 17.40m
Fonte: Autoria Própria (2024)

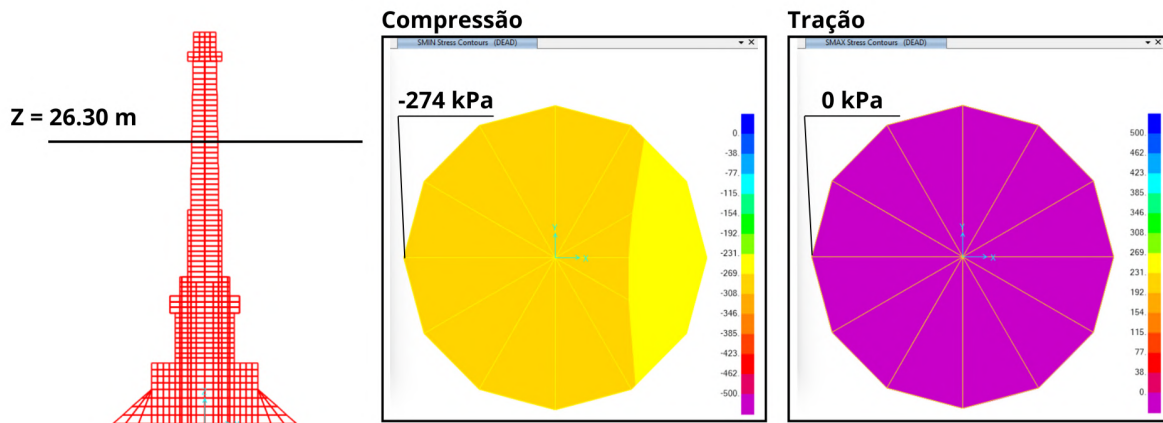


Figura 4.19: Tensões devido ao Peso Próprio na Secção em Cota 26.30m
Fonte: Autoria Própria (2024)

O *software* SAP2000 permite obter valores integrados de esforço axial e momento fletor em determinadas secções. Realizou-se, portanto, um cálculo para a secção apresentada na Figura 4.19, cujos resultados extraídos do SAP2000 estão apresentados na Tabela 4.2. Em seguida, efetuou-se um cálculo de Flexão Composta, considerando as propriedades geométricas da secção (Área = $4.917m^2$ e Momentos de Inércia em X e em Y = $1.924m^4$).

SectionCut	OutputCase	F1	F2	F3	M1	M2	M3
		kN	kN	kN	kN-m	kN-m	kN-m
SectionCut_26.30m	PP	0.000	0.000	-1254.186	-0.175	-4.920	0.000

Tabela 4.2: Valores integrados da Section Cut a 26.30m

Fonte: Autoria Própria (2024)

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M_x \cdot y}{I_x} \pm \frac{M_y \cdot x}{I_y} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} \sigma &= -\frac{1254.186}{4.917} \pm \frac{0.175 \cdot y}{1.924} \pm \frac{4.9197 \cdot x}{1.924} = \\ &= -255.092 \pm \cancel{0.091 \cdot x} \pm \cancel{2.558 \cdot y} = \\ &\cong -255.092 \text{ kPa} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Observa-se, na Equação 4.2, que os termos relacionados aos momentos são irrelevantes e podem ser considerados desprezáveis para o cálculo da tensão. Desta forma, obteve-se o resultado aproximado de tensão total igual à tensão devido à carga axial, de 255 kPa , em compressão. Este valor difere em 6,90% do resultado obtido na Figura 4.19.

4.4. PROCEDIMENTO DE DESENVOLVIMENTO DO DIGITAL TWIN

Para desenvolver uma aplicação *web* que exiba um *digital twin*, é necessário criar um sistema que integre a aquisição, armazenamento e processamento dos dados gerados pelos sensores instalados no objeto de estudo. Este sistema deve ser capaz de integrar esses dados em um modelo 3D, proporcionando a melhor visualização possível das informações coletadas.

O procedimento de implementação do DT consiste, primeiramente, em estabelecer um canal de comunicação com a base de dados existente no InfluxDB. Em seguida, é necessário carregar o modelo em uma plataforma *web* acessível a partir de um servidor. Além disso, deve-se implementar uma *interface* intuitiva, permitindo aos utilizadores visualizar as informações sobre o modelo de maneira eficiente.

A extensão “Data Visualization” (*DataViz Extensions*) do APS permite a visualização interativa dos dados dos sensores, utilizando *sprites* – elementos bidimensionais sobrepostos ao modelo para representar os sensores. Esta extensão inclui vários componentes que facilitam e guiam o processo de criação de um gémeo digital, fornecendo uma aplicação de referência em *JavaScript* vocacionada para a criação de *interfaces* de utilizador em páginas *web*.

4.4.1. IMPLEMENTAÇÃO DA APLICAÇÃO WEB PARA DIGITAL TWIN VIA APS

O desenvolvimento da aplicação *web* no APS segue um procedimento disponibilizado pela própria empresa Autodesk, através de um repositório aberto no GitHub do desenvolvedor Petr Broz. Existe um repositório específico³ para quando a base de dados é proveniente do InfluxDB.

Foi necessário criar uma conta no APS, configurar uma aplicação e obter as credenciais para inserção no programa. Além disso, é imprescindível ter uma conta no InfluxDB para permitir a sincronização dos dados.

Adicionalmente, foi preciso instalar o *Node.js*, um *software* de código aberto e multiplataforma que permite a execução de código *JavaScript* fora de um navegador *web*, e o *Yarn package manager*, um gestor de pacotes open-source para projetos *JavaScript*, que facilita a instalação, atualização, configuração e remoção de dependências, otimizando o alcance de objetivos.

Além disso, utilizou-se o *Visual Studio Code* (VSCode) para o desenvolvimento e edição dos ficheiros que compõem o *digital twin*. Para isso, instalou-se a extensão do APS no VSCode (Figura 4.20) e inseriu-se o ficheiro do Revit com o modelo 3D apresentado na Secção 4.1 (Figura 4.21). O modelo BIM precisa passar por uma “tradução” pelo APS para que suas informações possam ser visualizadas em ambiente *web*.

³ <https://github.com/autodesk-platform-services/aps-iot-extensions-demo/tree/influxdb>

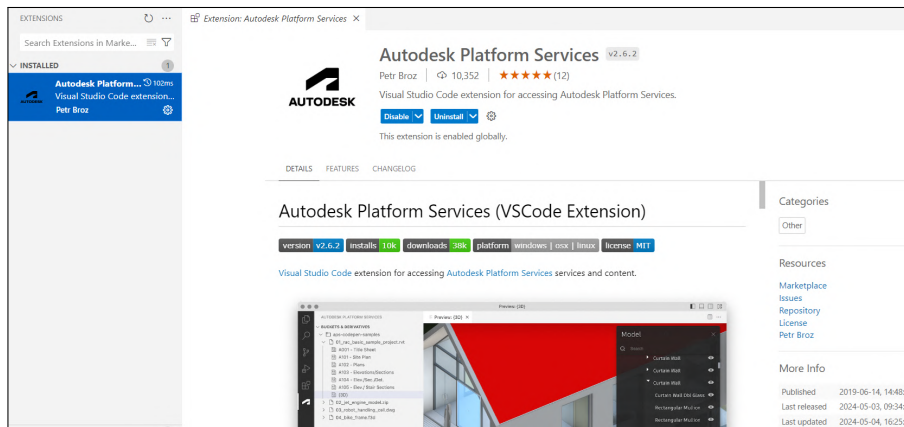


Figura 4.20: Extensão no VSCode do Autodesk Platform Services
Fonte: Captura de Tela do VSCode (2024)

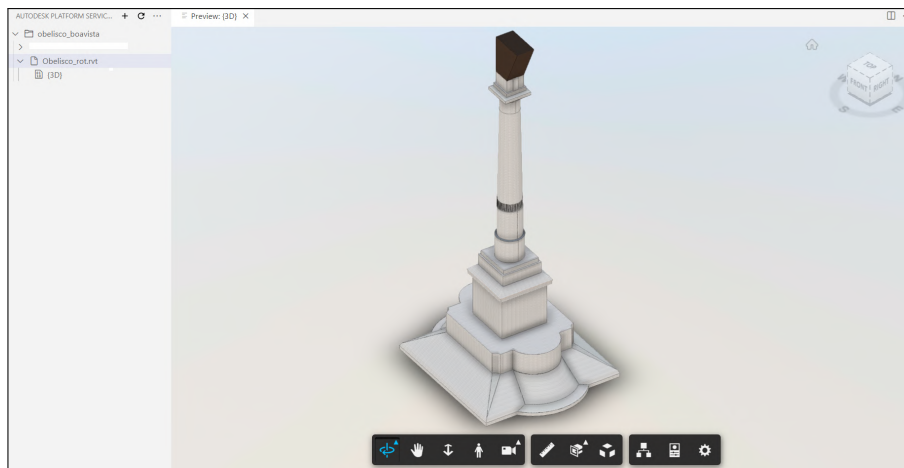


Figura 4.21: Modelo Revit dentro do ambiente VSCode
Fonte: Captura de Tela do VSCode (2024)

Em seguida, são inseridas todas as credenciais do APS e do InfluxDB em um ficheiro “.env” e, ainda nesse ficheiro, é definida a porta em que o APS será aberto (neste caso foi a porta 3000). Dessa forma, é possível aceder a uma versão prévia, ainda não configurada, do APS através do servidor local, no endereço definido (<http://localhost:3000/>). Importa realçar que é necessário utilizar uma ligação *Virtual Private Network*, ou Rede Virtual Privada (VPN) com a rede da FEUP, para que ocorra o acesso aos dados do InfluxDB.

4.4.2. AJUSTE DO DIGITAL TWIN

Após a integração bem-sucedida do *digital twin* com o InfluxDB, é necessário realizar ajustes na aplicação *web*. Um ajuste inicial, embora simples, evita a constante revisão das linhas de código: a definição da linha temporal. No modelo original, as datas de início e fim eram fixas e precisariam ser editadas conforme o momento em que o DT fosse visualizado. No presente projeto, a linha do tempo foi ajustada para exibir sempre o período desde o dia de abertura da página *web* até sete dias antes.

As configurações dos sensores são realizadas através de ficheiros *JavaScript Object Notation* (JSON), uma formatação utilizada para estruturar dados em texto e transmiti-los entre sistemas ou internamente. Há dois ficheiros JSON configurados. O primeiro (denominado “*sensors.json*”) contém informações como as coordenadas dos sensores, a definição do grupo em que serão exibidos na aplicação final e, o principal, o “*id*” do sensor que será pesquisado no InfluxDB. O segundo ficheiro (chamado “*channels.json*”) contém a informação do tipo de sensor, unidade a ser exibida, o intervalo a ser definido nos gráficos da aplicação e outro “*id*” que obtém as orientações de movimento daquele sensor específico e as exibe em diferentes gráficos. As Figuras 4.22a e 4.22b apresentam as configurações do sensor VB_02 nos ficheiros JSON.

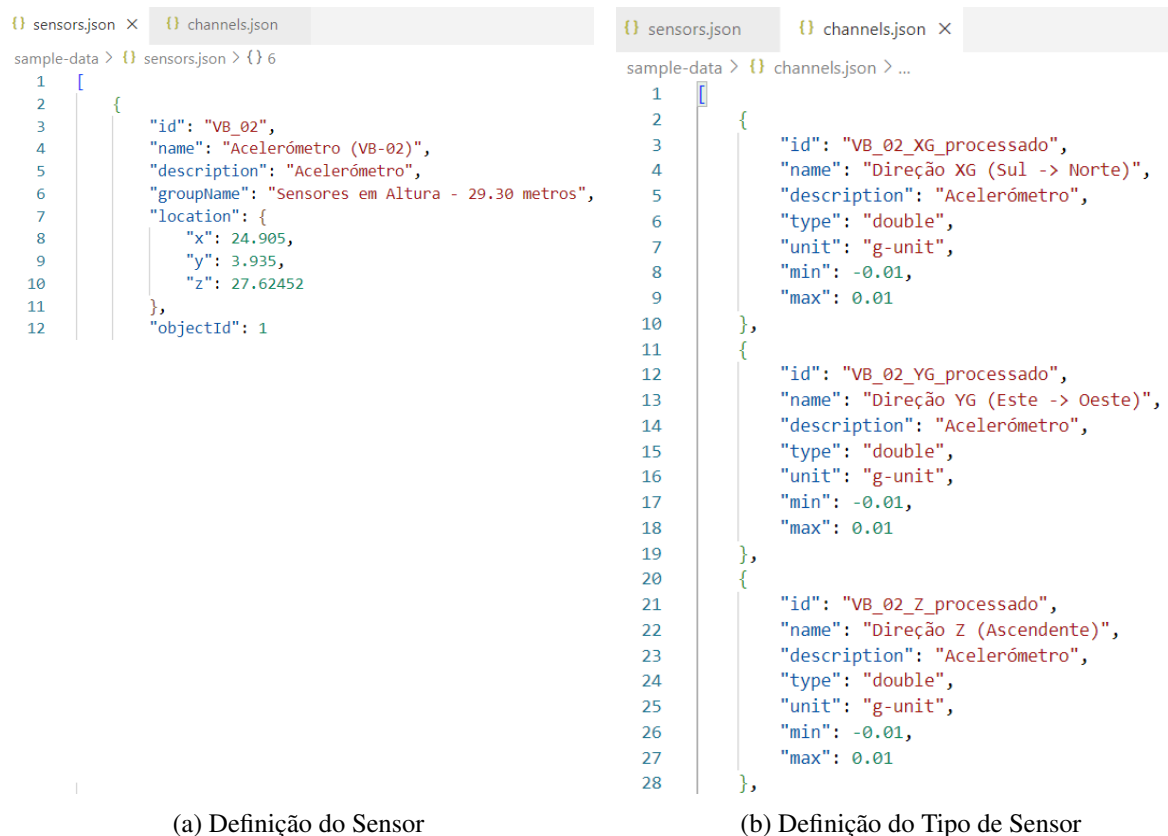


Figura 4.22: Definições do VB_02 nos arquivos JSON
Fonte: Autoria Própria (2024)

A integração ocorre através de um programa em JavaScript embutido na própria aplicação. Este programa usa os “*id*”s dos ficheiros “*sensors.json*” e “*channels.json*” para buscar os filtros de “*_measurement*” e “*Sensor_id*”, respetivamente, na base de dados do InfluxDB. Essa interseção de informações permite que a aplicação do APS exiba o sensor selecionado nas coordenadas específicas, juntamente com os gráficos adequados ao tipo de sensor. A Figura 4.23, abaixo, mostra o ecrã do InfluxDB com os filtros selecionados e os gráficos correspondentes ao sensor de exemplo.



Figura 4.23: Ecrã do InfluxDB com a definição dos filtros
Fonte: Captura de Tela do InfluxDB (2024)

Esses ajustes principais, aliados a algumas otimizações gráficas e de exibição, tais como dimensionamento e posicionamento de janelas, bem como a configuração dos *sprites* que representam os sensores, contribuem para a visualização bem-sucedida do *digital twin* em ambiente *web*, conforme apresenta a Figura 4.24.

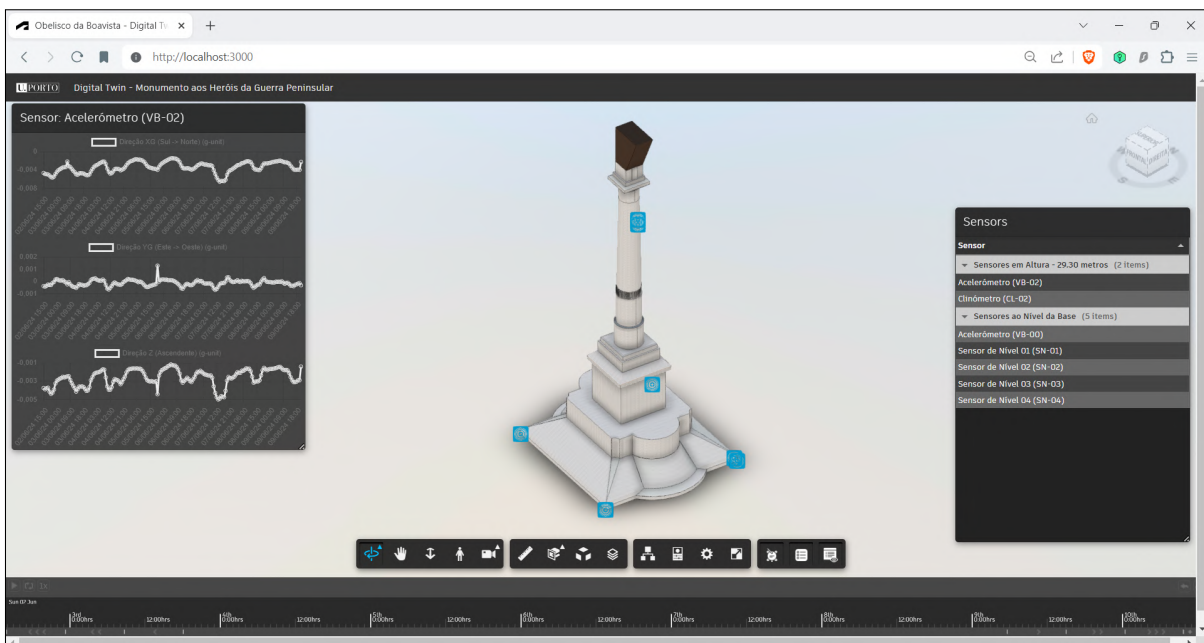


Figura 4.24: Visualização do *Digital Twin* em ambiente *web*
Fonte: Captura de Tela do APS (2024)

4.5. DIGITAL TWIN ESTRUTURAL

No presente trabalho, o *digital twin* estrutural consiste na integração entre a aplicação existente no APS com os resultados do cálculo estrutural obtidos no SAP2000. Esse vínculo é realizado pela inserção manual dos resultados no InfluxDB. O processo adiciona à base de dados um conjunto de valores gerados a partir das simulações sequenciais, utilizando como *inputs* os dados de assentamentos provenientes dos sensores de nível.

Um programa em *Visual Basic for Application* (VBA) foi criado dentro do Excel para interagir com o SAP2000 através de uma API, cuja documentação está no ficheiro “*CSI_OAPI_Documentation.chm*”, disponível junto aos ficheiros instalados com o SAP2000. A Figura 4.25 apresenta o trecho do código VBA responsável por criar uma instância do objeto SAP2000 que implementa a API e, em seguida, define e abre o modelo de trabalho.

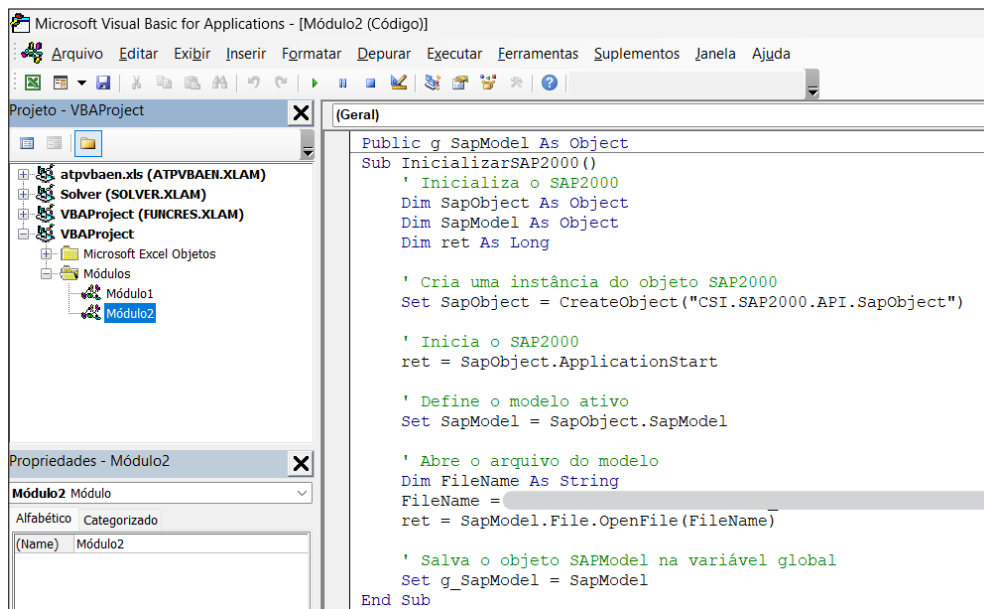


Figura 4.25: Código VBA responsável por Abrir o SAP2000
Fonte: Autoria Própria (2024)

O objetivo do programa em VBA é interagir com o SAP2000 para realizar uma série de simulações no modelo estrutural, inserindo os dados de SN_01, SN_02, SN_03 e SN_04 nos nós correspondentes. Os valores dos assentamentos máximos dos quatro sensores de nível, registados em intervalos de uma hora, são extraídos da base de dados no InfluxDB para serem utilizados nas simulações do modelo estrutural. A Figura 4.26 apresenta a secção do código em que são definidos os deslocamentos nos nós da base, seguida pela análise do modelo.

```

' Deleta os deslocamentos de carga em todos os nós
ret = g_SapModel.SelectObj.All ' Selecciona todos os objetos
ret = g_SapModel.PointObj.DeleteLoadDispl("", "RCP", 2) ' Deleta todas as cargas de deslocamento do padrão de carga "RCP"

g_SapModel.SelectObj.ClearSelection ' Limpa a seleção atual

' ***** APLICA OS DESLOCAMENTOS NA BASE *****
' Grupo SN-01
ret = g_SapModel.SelectObj.Group("SN-01")
Value(2) = deslocSN01 ' Deslocamento em Z
ret = g_SapModel.PointObj.SetLoadDispl("", "RCP", Value, True, "GLOBAL", 2) ' ItemType = SelectedObjects

' Grupo SN-02
g_SapModel.SelectObj.ClearSelection ' Limpa a seleção atual
ret = g_SapModel.SelectObj.Group("SN-02")
Value(2) = deslocSN02 ' Deslocamento em Z
ret = g_SapModel.PointObj.SetLoadDispl("", "RCP", Value, True, "GLOBAL", 2) ' ItemType = SelectedObjects

' Grupo SN-03
g_SapModel.SelectObj.ClearSelection ' Limpa a seleção atual
ret = g_SapModel.SelectObj.Group("SN-03")
Value(2) = deslocSN03 ' Deslocamento em Z
ret = g_SapModel.PointObj.SetLoadDispl("", "RCP", Value, True, "GLOBAL", 2) ' ItemType = SelectedObjects

' Grupo SN-04
g_SapModel.SelectObj.ClearSelection ' Limpa a seleção atual
ret = g_SapModel.SelectObj.Group("SN-04")
Value(2) = deslocSN04 ' Deslocamento em Z
ret = g_SapModel.PointObj.SetLoadDispl("", "RCP", Value, True, "GLOBAL", 2) ' ItemType = SelectedObjects

g_SapModel.SelectObj.ClearSelection ' Limpa a seleção atual

' ***** REALIZA A SIMULAÇÃO DO MODELO *****
' Bloqueia o modelo
ret = g_SapModel.SetModelIsLocked(True)

' Executa a análise
ret = g_SapModel.Analyze.RunAnalysis

```

Figura 4.26: Código VBA para Atribuir os Deslocamentos e Realizar a Análise no SAP2000
Fonte: Autoria Própria (2024)

Em seguida, o programa obtém, mediante uma combinação de cargas denominada Estado de Serviço (ES), que considera o PP + Assentamentos:

1. Os dados de deslocamento (δ), em *mm*, nas direções X, Y e Z, nas cotas de 29.30 metros e no topo do monumento, aos 37.30 metros (Figura 4.27).

```

' ***** OBTÉM OS DESLOCAMENTOS AO NÍVEL 29.30M *****
' Extrai os deslocamentos no joint 15726
ret = g_SapModel.Results.JointDispl("15726", 1, NumberResults, Obj, Elm, LoadCase, StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3)

' Escreve os resultados no arquivo Excel aberto
Dim xlApp As Object
Dim xlSheet As Object

Set xlApp = GetObject(, "Excel.Application")
Set xlSheet = ThisWorkbook.Sheets("Joint_Displ_15726")
xlSheet.Cells.ClearContents
xlSheet.Cells(1, 1).Value = "Joint"
xlSheet.Cells(1, 2).Value = "Deslocamento X"
xlSheet.Cells(1, 3).Value = "Deslocamento Y"
xlSheet.Cells(1, 4).Value = "Deslocamento Z"

xlSheet.Cells(2, 1).Value = "15726"
xlSheet.Cells(2, 2).Value = U1(0) * 1000
xlSheet.Cells(2, 3).Value = U2(0) * 1000
xlSheet.Cells(2, 4).Value = U3(0) * 1000

' ***** OBTÉM OS DESLOCAMENTOS AO NÍVEL DO TOPO *****
' Extrai os deslocamentos no joint 15505
ret = g_SapModel.Results.JointDispl("15505", 1, NumberResults, Obj, Elm, LoadCase, StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3)

Set xlApp = GetObject(, "Excel.Application")
Set xlSheet = ThisWorkbook.Sheets("Joint_Displ_15505")
xlSheet.Cells.ClearContents
xlSheet.Cells(1, 1).Value = "Joint"
xlSheet.Cells(1, 2).Value = "Deslocamento X"
xlSheet.Cells(1, 3).Value = "Deslocamento Y"
xlSheet.Cells(1, 4).Value = "Deslocamento Z"

xlSheet.Cells(2, 1).Value = "15505"
xlSheet.Cells(2, 2).Value = U1(0) * 1000
xlSheet.Cells(2, 3).Value = U2(0) * 1000
xlSheet.Cells(2, 4).Value = U3(0) * 1000

```

Figura 4.27: Código VBA para Obter os Deslocamentos a 29.30m e 37.30m
Fonte: Autoria Própria (2024)

2. Os dados de tensão (σ), em *kPa*, e deformação (ϵ), em *mm/mm*, máximos (SMAX, SMIN, EMAX e EMIN) em *Section Cuts* de alguns níveis pré-definidos (Figura 4.28).

```

'..... OBTÉM AS TENSÕES E DEFORMAÇÕES EM DIVERSOS NÍVEIS .....
' Define os grupos e as planilhas correspondentes
grupos = Array("SC_1.63", "SC_4.53", "SC_8.18", "SC_17.40", "SC_26.30")
planilhas = Array("Tensoes_1.63m", "Tensoes_4.53m", "Tensoes_8.18m", "Tensoes_17.40m", "Tensoes_26.30m")

' Seleciona o caso de carga/combo "ELS" para a saída
ret = g_SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput("ELS")

Dim i As Integer
For i = LBound(grupos) To UBound(grupos)

    ' Obtém as tensões dos sólidos para o grupo atual
    ret = g_SapModel.Results.SolidStress(grupos(i), 2, NumberResults, Obj, Elm, PointElm, LoadCase, StepType, StepNum, S11, S22, S33, _
    S12, S13, S23, SMax, SMin, SVM, DirCosMax1, DirCosMax2, DirCosMax3, DirCosMid1, DirCosMid2, DirCosMid3, DirCosMin1, _
    DirCosMin2, DirCosMin3)

    ' Obtém as deformações dos sólidos para o grupo atual
    ret = g_SapModel.Results.SolidStrain(grupos(i), 2, NumberResults, Obj, Elm, PointElm, LoadCase, StepType, StepNum, E11, E22, E33, _
    G12, G13, G23, EMax, EMin, EVM, DirCosMax1, DirCosMax2, DirCosMax3, DirCosMid1, DirCosMid2, DirCosMid3, DirCosMin1, _
    DirCosMin2, DirCosMin3)

    ' Escreve os resultados na planilha correspondente
    Dim lastRow As Long

    Set xlApp = GetObject(, "Excel.Application")
    Set xlSheet = ThisWorkbook.Sheets(planilhas(i))

```

Figura 4.28: Código VBA para Obter as Tensões e Deformações nos Níveis Determinados
Fonte: Autoria Própria (2024)

Percebe-se, na Figura 4.27, que os resultados são multiplicados por 1000, para serem obtidos em milímetros. Além disso, na Figura 4.28, são obtidos os resultados de tensões e deformações para todos os sólidos que estão incluídos nos grupos denominados “SC_Nível”. Entretanto, para o presente trabalho, são necessários apenas os valores máximos de tração e compressão. Foram inseridas linhas de código para obter esses valores máximos.

Os níveis definidos para a obtenção de tensões e deformações, apresentados na Figura 4.29, foram estabelecidos nas cotas intermédias das secções para evitar as interferências causadas pelas zonas de transição, conforme explicado na Secção 4.3.2.

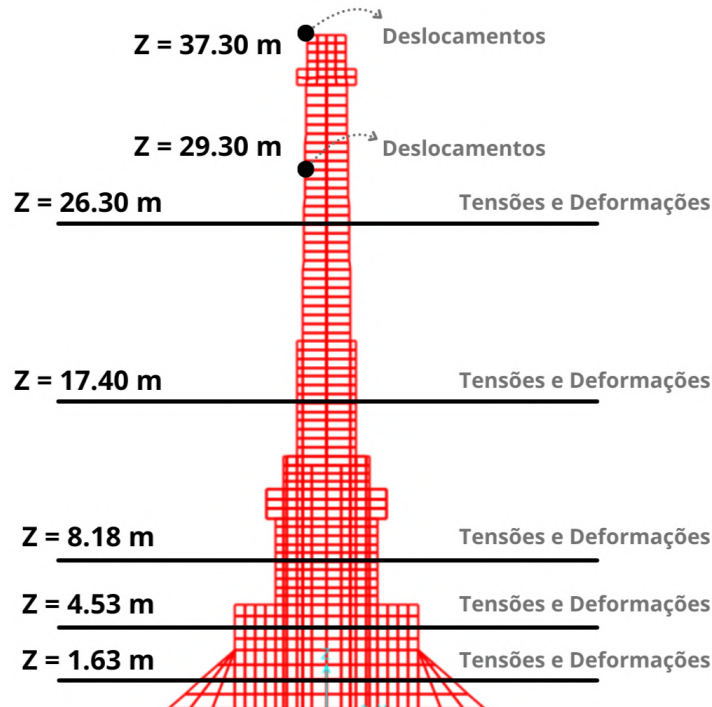


Figura 4.29: Níveis de Obtenção dos resultados do SAP2000
Fonte: Autoria Própria (2024)

Em seguida, são gravados ficheiros “.csv” para realizar *upload* manual com novos filtros “_measurement” e “Sensor_id”, com as nomenclaturas adequadas no InfluxDB (Figura 4.30). A partir disso, um processo semelhante ao descrito na Secção 4.4.2 é realizado para a exibição dos resultados dos cálculos estruturais, a cada intervalo de tempo definido, na aplicação do APS.

```

' AJUSTA E EXPORTA O CSV
wbModeloRegistos.Activate

Dim channel As String
Dim tableCounter As Long
Dim prevMeasurement As String
Dim startValue As String
Dim stopValue As String
Dim savePath As String

' Limpar as células da linha 5 para baixo na planilha Exportar_CSV
wsExport.Rows("5:" & wsExport.Rows.Count).ClearContents

' Pegar os valores fixos
startValue = wsModeloRegistos.Cells(3, 1).Value
stopValue = wsModeloRegistos.Cells(wsModeloRegistos.Rows.Count, 1).End(xlUp).Value

' Inicializar variáveis
k = 5
tableCounter = 0
channel = "ch5"
prevMeasurement = wsModeloRegistos.Cells(1, 2).Value ' Inicializa com o primeiro measurement

' Iterar sobre as colunas B até AA (2 a 27)
For j = 2 To 27
    If wsModeloRegistos.Cells(1, j).Value <> prevMeasurement Then
        channel = "ch" & (Val(Mid(channel, 3)) + 1)
        prevMeasurement = wsModeloRegistos.Cells(1, j).Value
    End If

    For i = 3 To wsModeloRegistos.Cells(wsModeloRegistos.Rows.Count, j).End(xlUp).Row
        ' Preencher dados na planilha Exportar_CSV
        wsExport.Cells(k, 1).Value = "" ' Coluna result
        wsExport.Cells(k, 3).Value = tableCounter ' Coluna table
        wsExport.Cells(k, 4).Value = Format(startValue, "yyyy-mm-dd\THH:MM:SS\Z") ' Coluna _start
        wsExport.Cells(k, 5).Value = Format(stopValue, "yyyy-mm-dd\THH:MM:SS\Z") ' Coluna _stop
        wsExport.Cells(k, 6).Value = Format(wsModeloRegistos.Cells(1, 1).Value, "yyyy-mm-dd\THH:MM:SS\Z") ' Coluna _time
        wsExport.Cells(k, 7).Value = wsModeloRegistos.Cells(i, j).Value ' Coluna _value
        wsExport.Cells(k, 8).Value = channel ' Coluna Channel
        wsExport.Cells(k, 9).Value = wsModeloRegistos.Cells(2, j).Value ' Coluna Sensor_id
        wsExport.Cells(k, 10).Value = "Result Gerados" ' Coluna _field
        wsExport.Cells(k, 11).Value = wsModeloRegistos.Cells(1, j).Value ' Coluna _measurement

        k = k + 1
    Next i

    ' Atualizar tableCounter ao mudar de coluna
    tableCounter = tableCounter + 1
Next j

' Caminho para salvar o arquivo CSV
savePath = ThisWorkbook.Path & "Resultados_" & Format(startValue, "yyyy-mm-dd_HH-MM-SS") & "-" & Format(stopValue, "yyyy-mm-dd_HH-MM-SS") & ".csv"

' Salvar a planilha Exportar_CSV como CSV
wsExport.Copy
With ActiveWorkbook
    .SaveAs FileName:=savePath, FileFormat:=xlCSV, CreateBackup:=False, Local:=True
    .Close SaveChanges:=False
End With

```

Figura 4.30: Código VBA para Gravar os Ficheiros CSV
Fonte: Autoria Própria (2024)

Para apresentar os detalhes de forma melhor organizada, foi criado um grupo denominado “Sensores Virtuais”, que inclui todos os *sprites* relacionados aos resultados obtidos. Esses *sprites* foram configurados com ícones e cores distintas (azul para sensores reais e amarelo para virtuais), a fim de diferenciá-los dos sensores reais. A Figura 4.31 mostra o *digital twin* estrutural em sua fase final, pronto para visualização pelo usuário. Na Secção 4.6, serão descritos os procedimentos disponíveis na aplicação, acompanhados de uma breve explicação sobre como executá-los.

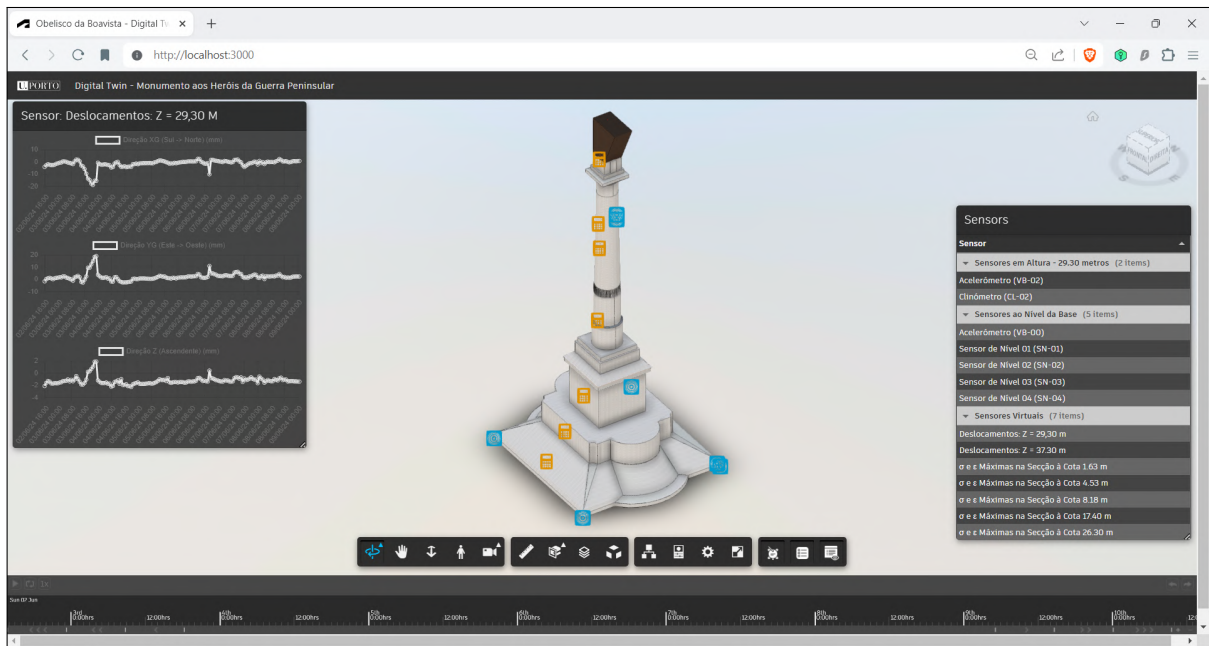


Figura 4.31: Visualização do *Digital Twin* Estrutural
Fonte: Captura de Tela do APS (2024)

4.6. OPERACIONALIDADE DO DIGITAL TWIN ESTRUTURAL

A aplicação *web* está acessível apenas para utilizadores autorizados, uma vez que os dados possuem um grau de sigilo. O utilizador deve estar conectado à rede da FEUP, seja presencialmente ou por meio de VPN. Assim, ao iniciar a aplicação, a tela inicialmente apresentada é a da Figura 4.32.

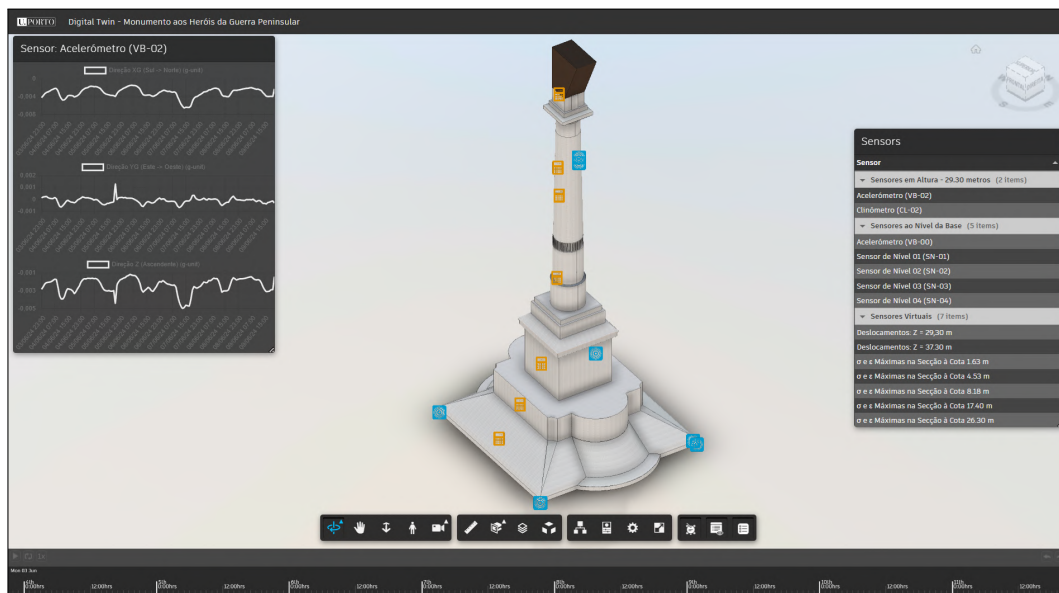


Figura 4.32: Tela inicial do DTE
Fonte: Captura de Tela do APS (2024)

Os botões do rato permitem girar, fazer *zoom* e transladar o modelo, permitindo a visualização de diversos ângulos. A Figura 4.33 apresenta o modelo com destaque para a região do topo, onde estão inseridos os sensores reais (a azul) e virtuais (a amarelo).

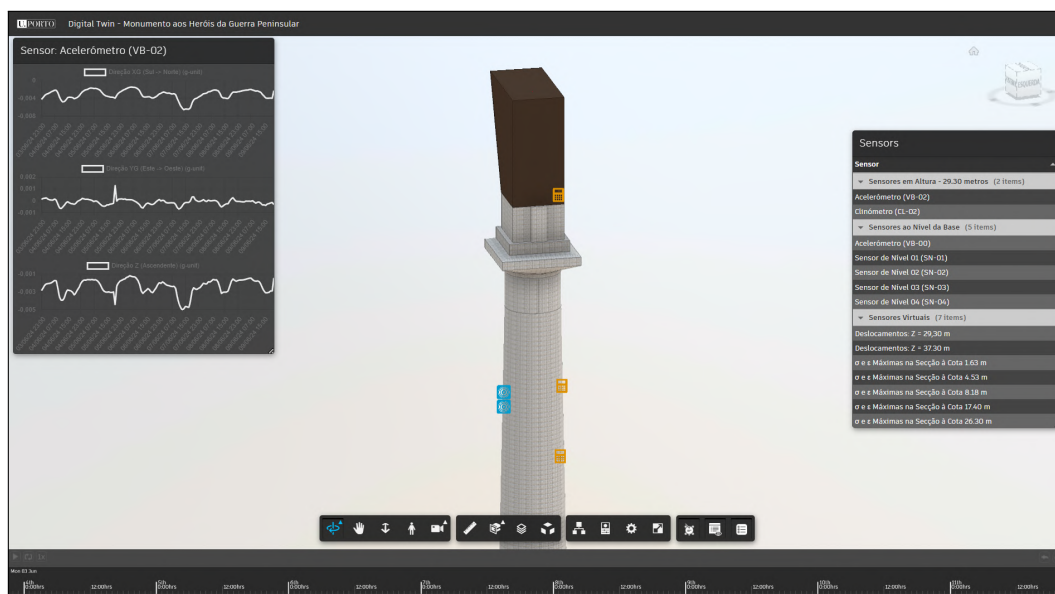


Figura 4.33: Destaque da Região do Topo no DTE
Fonte: Captura de Tela do APS (2024)

Os gráficos dos sensores podem ser destacados por dois métodos: selecionando os símbolos dos sensores no Monumento ou clicando no nome do sensor na lista *Sensors*, localizada no lado direito do ecrã. A Figura 4.34 mostra o gráfico do sensor SN_02 selecionado através do ícone do Monumento.

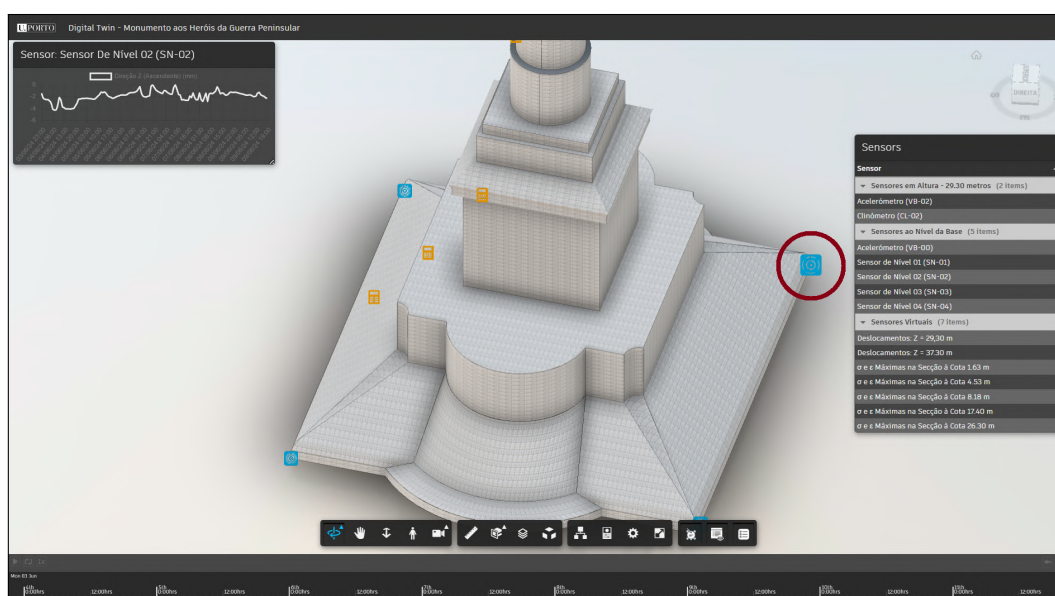


Figura 4.34: Destaque do SN_02
Fonte: Captura de Tela do APS (2024)

O intervalo de tempo para a apresentação dos resultados pode ser alterado, desde que o novo intervalo esteja dentro dos 7 dias programados no APS. Para seleccionar este novo intervalo, é necessário marcar as datas de início e fim na linha do tempo, localizada na região inferior da aplicação. A Figura 4.35 ilustra o procedimento de recorte na linha do tempo.

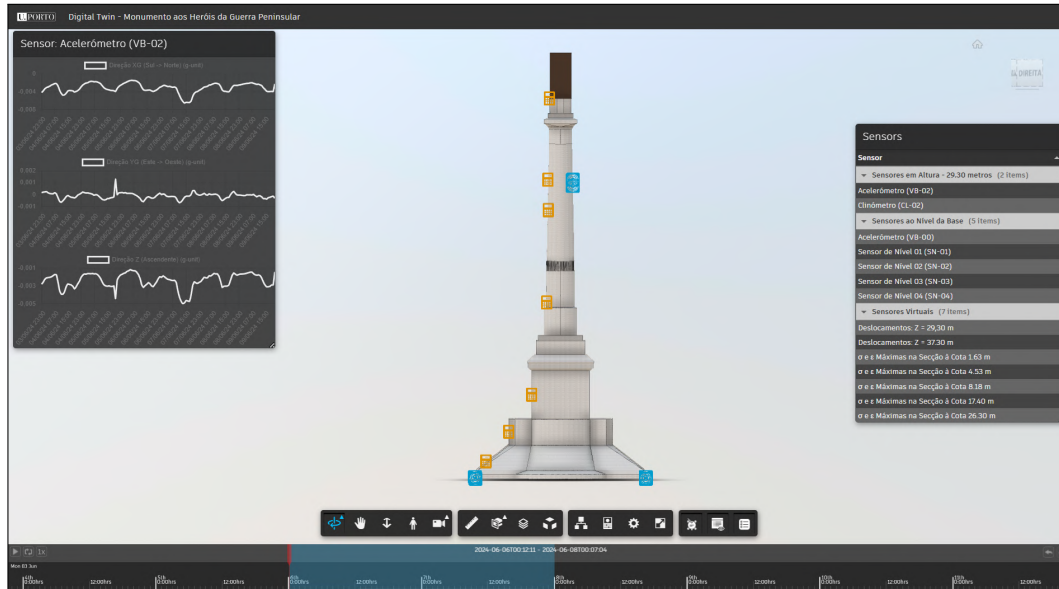


Figura 4.35: Seleção da Nova Linha Temporal
Fonte: Captura de Tela do APS (2024)

É possível, ao mover o cursor do rato sobre o gráfico do sensor seleccionado, obter em detalhe o valor daquele instante específico, conforme apresenta a Figura 4.36.

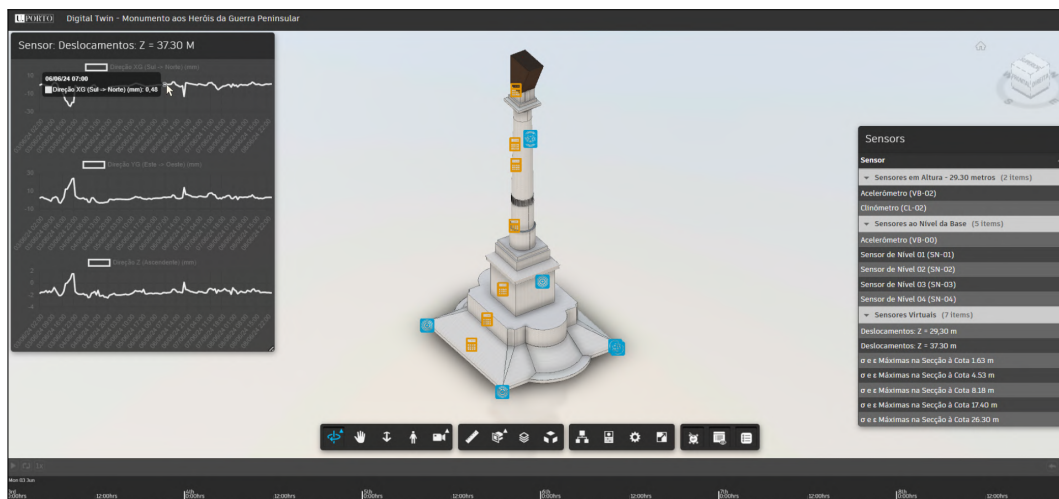


Figura 4.36: Obtenção de um Valor Específico no Gráfico
Fonte: Captura de Tela do APS (2024)

A Figura 4.37 apresenta as opções disponíveis no menu inferior da aplicação.

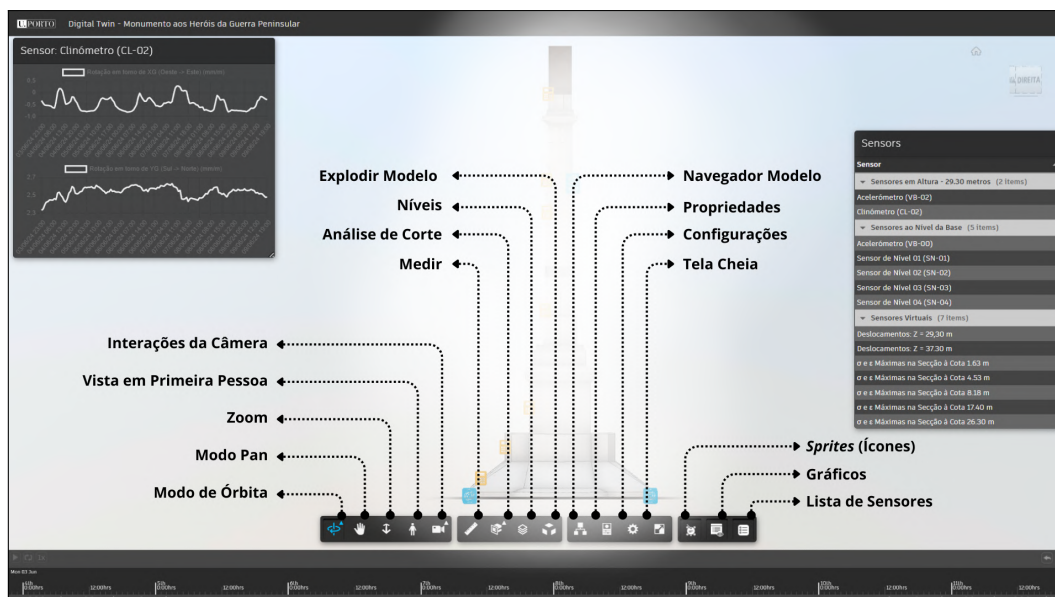


Figura 4.37: Menu da Aplicação
Fonte: Captura de Tela do APS (2024)

O *digital twin* exige procedimentos complexos para ser implementado, mas deve ser projetado para proporcionar uma experiência de utilizador intuitiva. Para alcançar esse objetivo, foram adotadas medidas como a segmentação em grupos, a diferenciação de *sprites* com cores distintas para sensores reais e virtuais, e a clara indicação das unidades de medida. Com poucos minutos de uso, a aplicação mostra-se simples de navegar e compreender.

5

RESULTADOS

5.1. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS DO DT: SENSORES REAIS

Apresentam-se, a seguir, os resultados do *digital twin* para todos os sensores reais, num período que compreende as datas de 20/06/2024 a 26/06/2024. As secções a seguir apresentam a visualização do ecrã completo do DT, de modo a apresentar o sensor real selecionado e os gráficos referentes a estes.

5.1.1. ACELERÓMETROS

As Figuras 5.1 e 5.2 exibem, respetivamente, as seleções e os resultados obtidos dos acelerómetros VB_00 e VB_02.

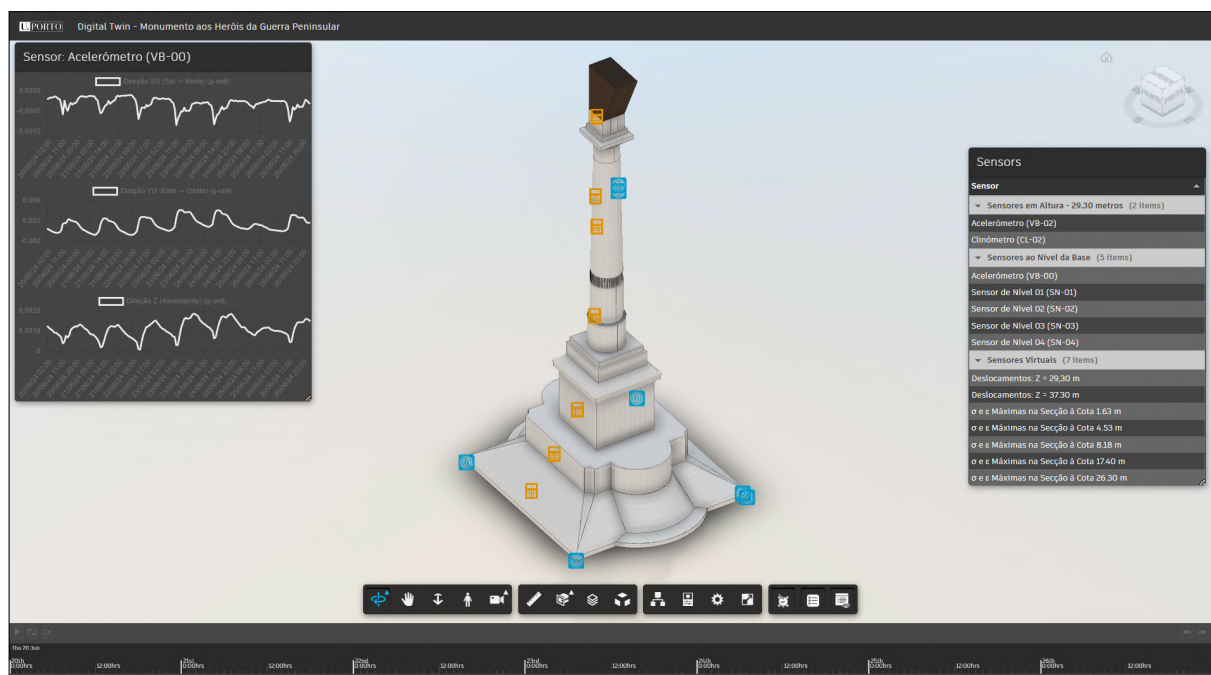


Figura 5.1: Seleção no DT do Sensor Acelerómetro VB_00
Fonte: Captura de Tela do APS (2024)

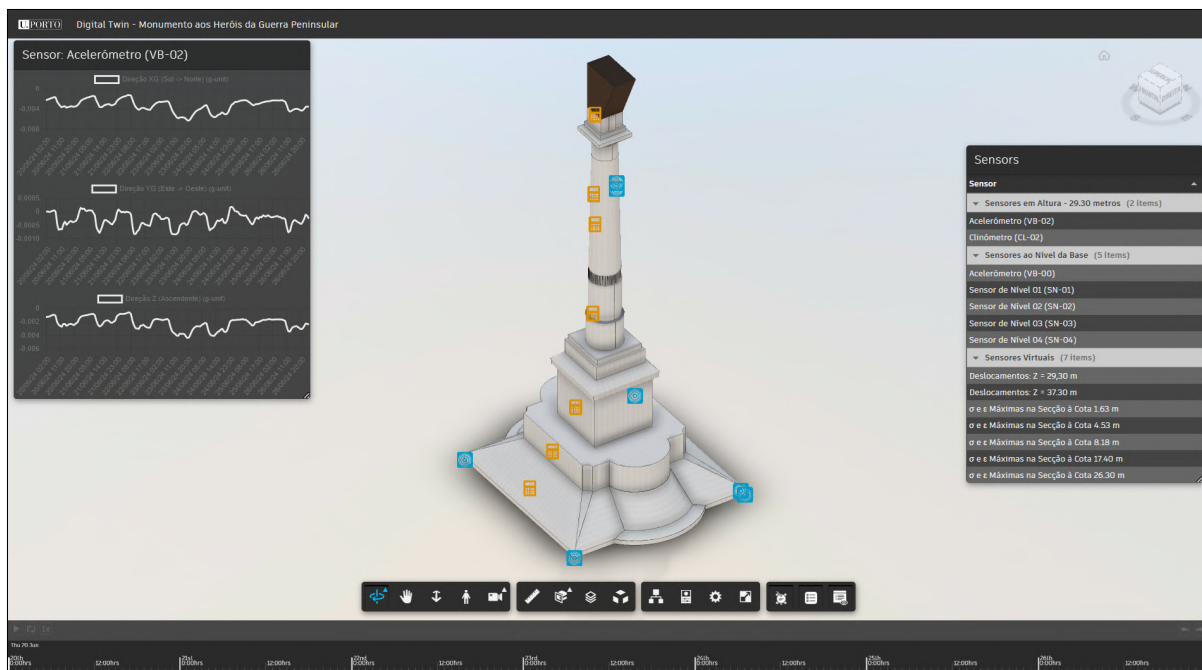


Figura 5.2: Seleção no DT do Sensor Acelerómetro VB_02
Fonte: Captura de Tela do APS (2024)

5.1.2. CLINÓMETRO

A Figura 5.3 mostra a seleção e os resultados referentes ao clinómetro CL_02.

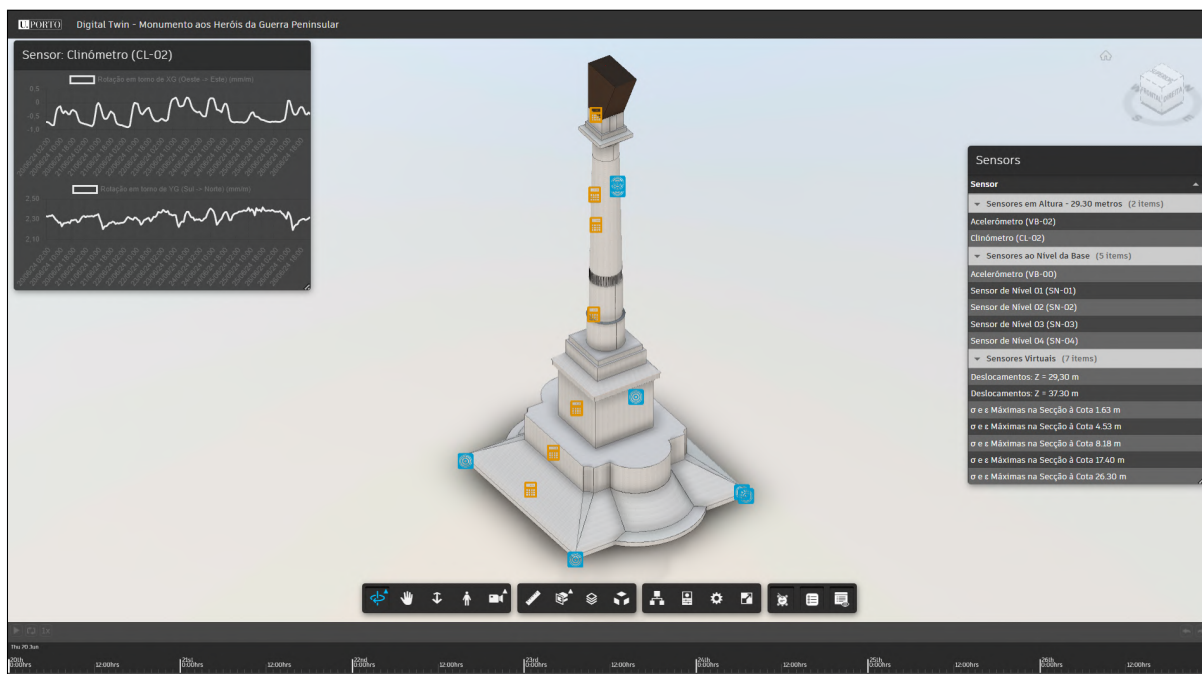


Figura 5.3: Seleção no DT do Sensor Clinómetro CL_02
Fonte: Captura de Tela do APS (2024)

5.1.3. SENSORES DE NÍVEL

As Figuras 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7 ilustram, respetivamente, as seleções e os resultados dos sensores de nível SN_01, SN_02, SN_03 e SN_04.

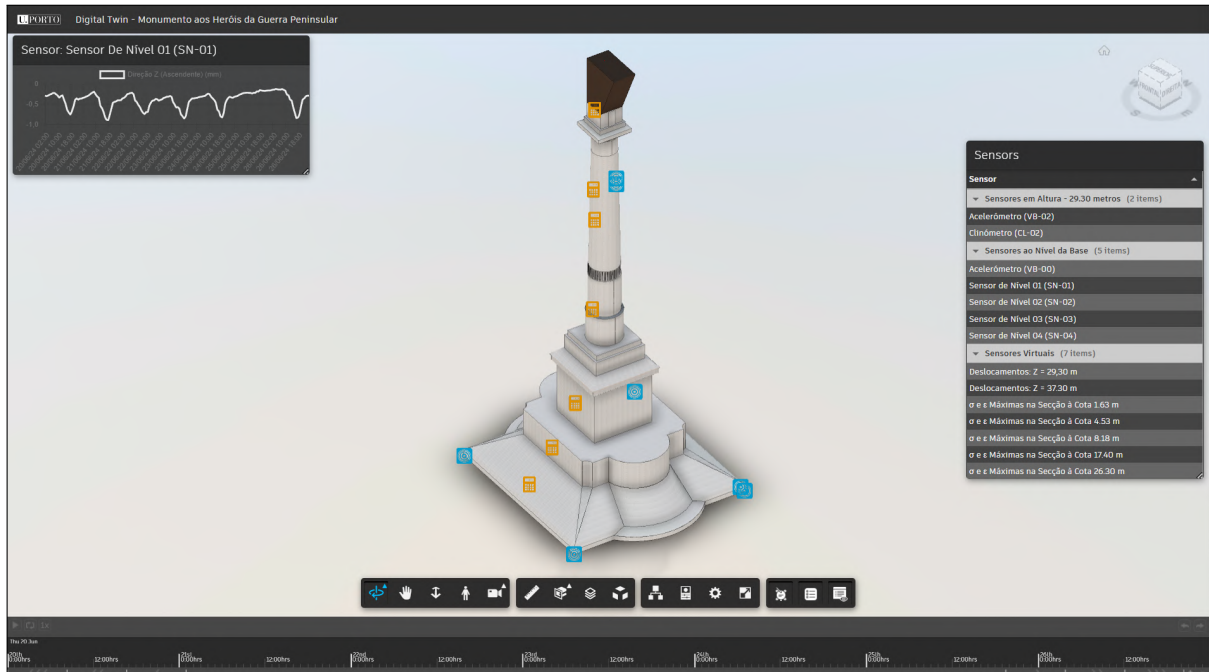


Figura 5.4: Seleção no DT do Sensor Clinómetro SN_01
Fonte: Captura de Tela do APS (2024)

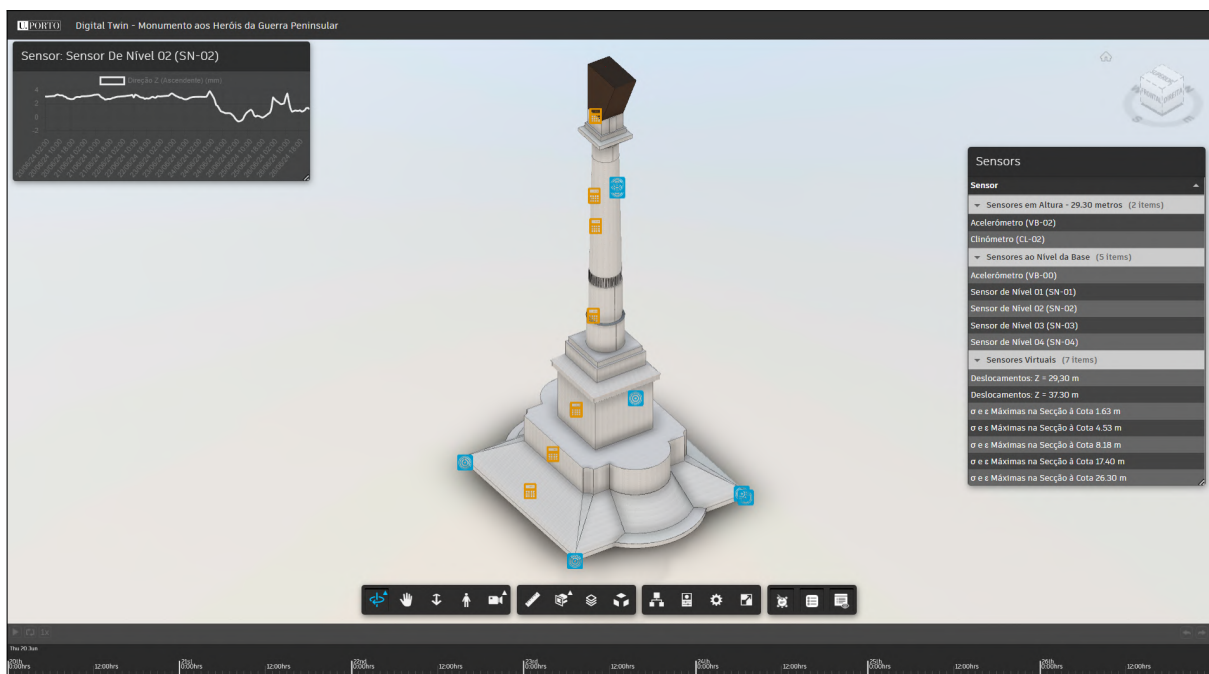


Figura 5.5: Seleção no DT do Sensor Clinómetro SN_02
Fonte: Captura de Tela do APS (2024)

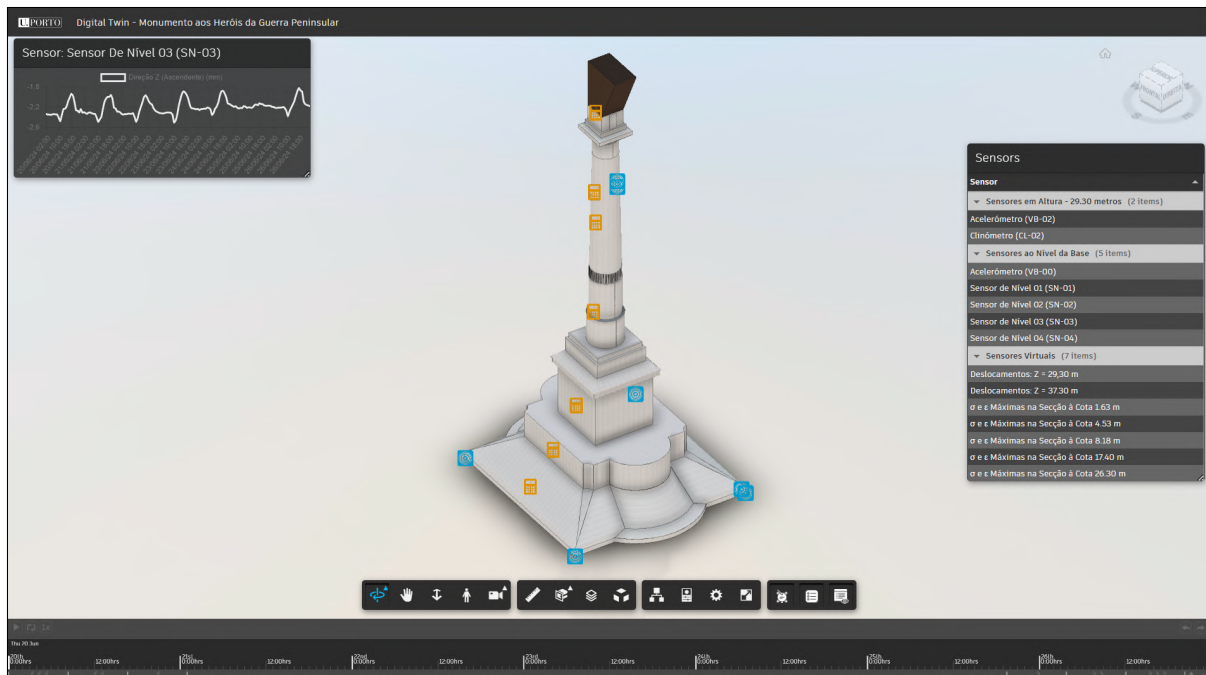


Figura 5.6: Seleção no DT do Sensor Clinómetro SN_03
Fonte: Captura de Tela do APS (2024)

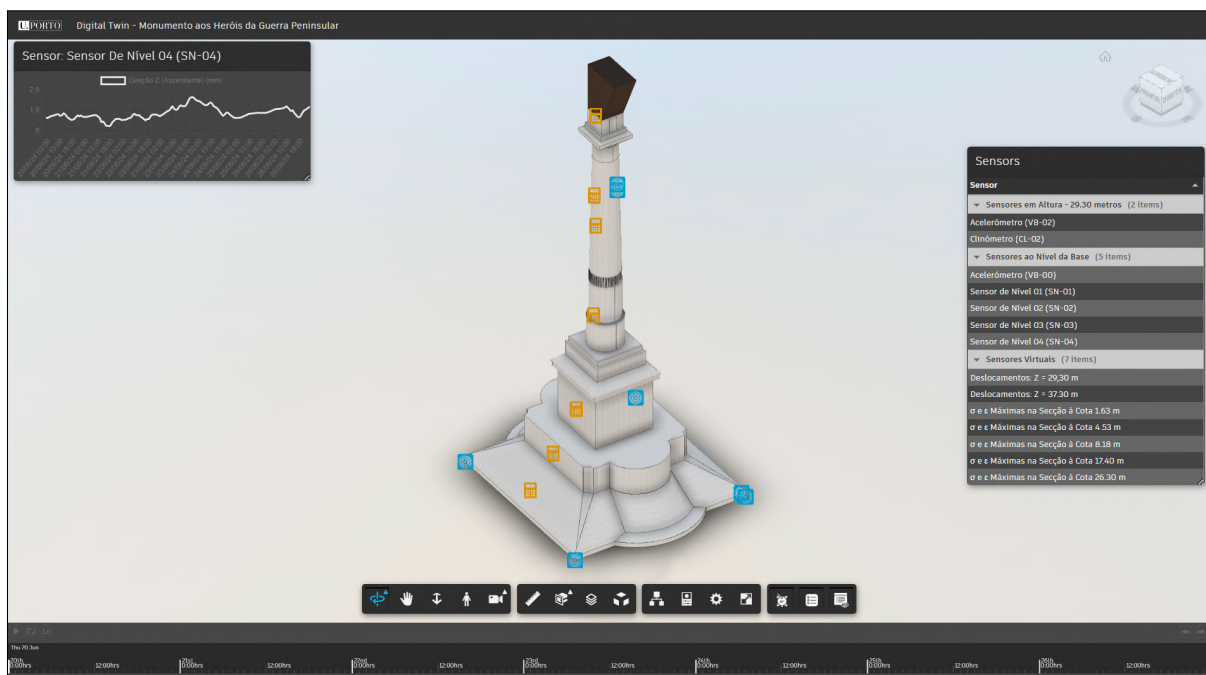


Figura 5.7: Seleção no DT do Sensor Clinómetro SN_04
Fonte: Captura de Tela do APS (2024)

5.2. INTEGRAÇÃO ENTRE O DT E MODELO ESTRUTURAL: ASSENTAMENTOS IMPOSTOS

Esta Secção visa demonstrar a interação entre o modelo de análise estrutural do SAP2000 e o *digital twin*, por meio de uma representação visual detalhada dos resultados. No *digital twin* estrutural, os resultados são apenas apresentados por meio de gráficos, os quais são aqui apresentados através de mapas e *section cuts*.

Para tanto, foi realizada uma análise do modelo estrutural utilizando o software SAP2000, aplicando assentamentos arbitrários (Figura 5.8). Esse procedimento permitiu, além da representação visual mencionados anteriormente, uma avaliação abrangente do comportamento do modelo estrutural e, consequentemente, do monumento.

Os resultados a seguir discutidos são relacionados à carga de Peso Próprio e à combinação que engloba os esforços de Peso Próprio e Assentamentos, denominada ES. Entretanto, é relevante ressaltar que os gráficos apresentados na aplicação do DTE referem-se exclusivamente à combinação de ES.

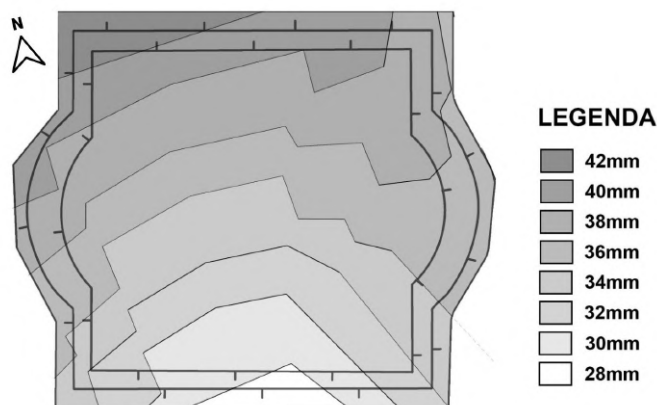
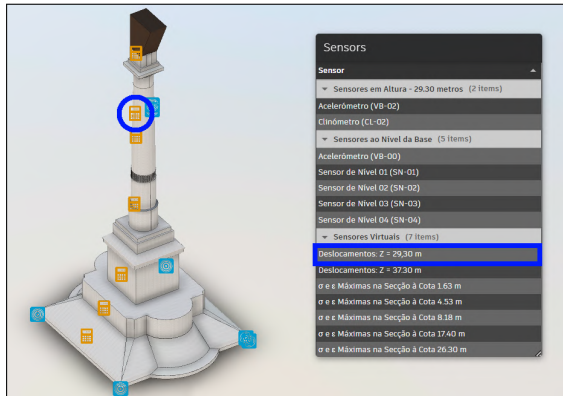


Figura 5.8: Mapa de Assentamentos Impostos
Fonte: Autoria Própria (2024)

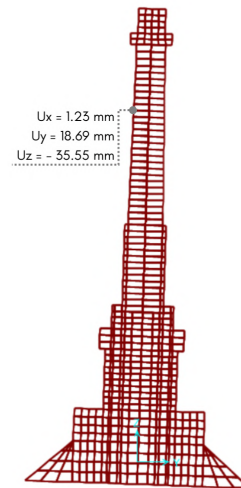
Foram analisados deslocamentos nodais, tensões de tração e compressão em vários níveis, como mostrado na Figura 4.29. Os valores destacados nas figuras subsequentes refletem os dados apresentados no *digital twin* estrutural. É importante destacar que esses valores correspondem a um instante específico nos gráficos do DTE, enquanto os demais pontos são obtidos por meio de simulações sequenciais e da obtenção dos resultados dessas.

5.2.1. DESLOCAMENTOS AOS NÍVEIS 29.30 METROS E 37.30 METROS

A seguir são apresentadas as capturas de tela do DTE, que mostram a seleção dos sensores responsáveis pelos deslocamentos nodais nos níveis de 29.30 metros (Figura 5.9a) e 37.30 metros (Figura 5.10a). Os resultados exibidos levam em conta os assentamentos impostos mencionados anteriormente.

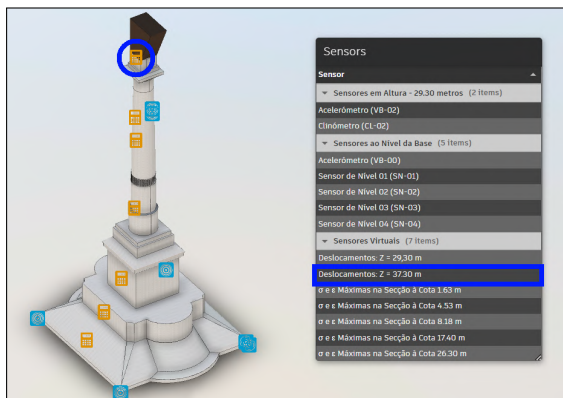


(a) Seleção do Sensor Virtual de Deslocamentos no DTE

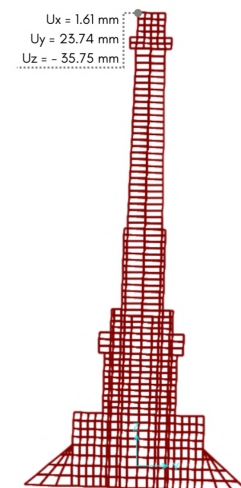


(b) Deslocamentos no Nível 29.30 metros

Figura 5.9: Seleção do Sensor Virtual do DTE e Deslocamentos em ES (Nível 29.30 metros)
Fonte: Autoria Própria (2024)



(a) Seleção do Sensor Virtual de Deslocamentos no DTE

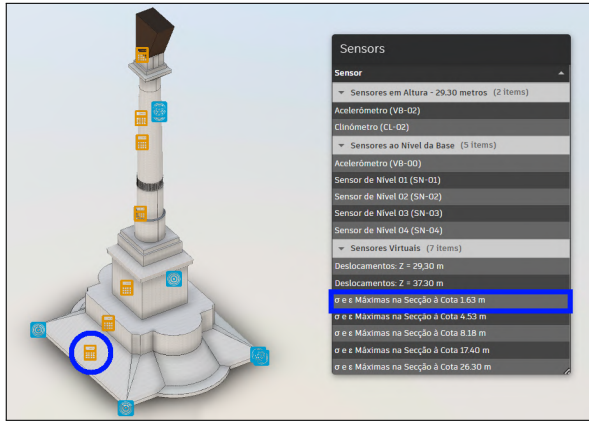


(b) Deslocamentos no Nível 37.30 metros

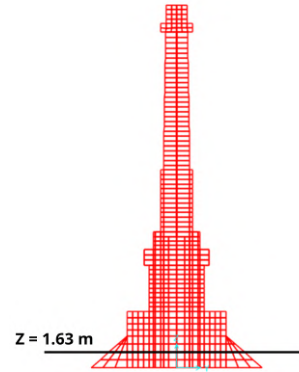
Figura 5.10: Seleção do Sensor Virtual do DTE e Deslocamentos em ES (Nível 37.30 metros)
Fonte: Autoria Própria (2024)

5.2.2. TENSÕES PRINCIPAIS DE TRAÇÃO E DE COMPRESSÃO: NÍVEL 1.63 METROS

A seguir, apresentam-se as figuras que ilustram a seleção do sensor virtual responsável pela análise das principais tensões no DTE na secção de corte localizada a 1,63 metros, com uma representação em alçado dessa posição. Em seguida, são exibidos os resultados das tensões de tração e compressão, enfatizando os valores máximos identificados em cada mapa.

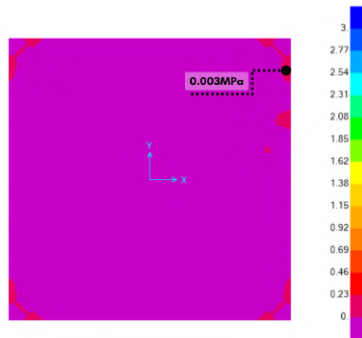


(a) Seleção do Sensor Virtual das Tensões no DTE

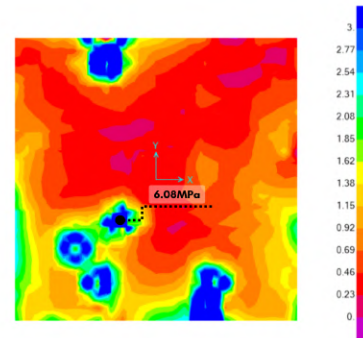


(b) Cota da Section Cut

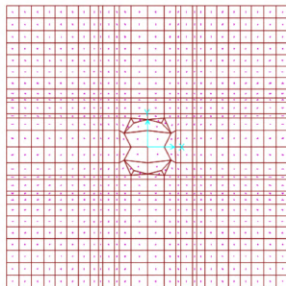
Figura 5.11: Seleção do Sensor Virtual do DTE e Cota da Section Cut (Nível 1.63 metros)
Fonte: Autoria Própria (2024)



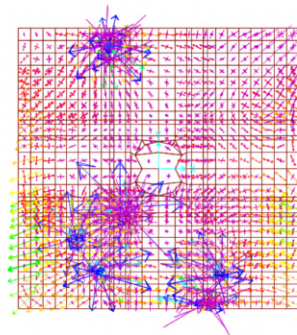
(a) Tensões de Tração por PP (Mapa de Cores)



(b) Tensões de Tração no ES (Mapa de Cores)

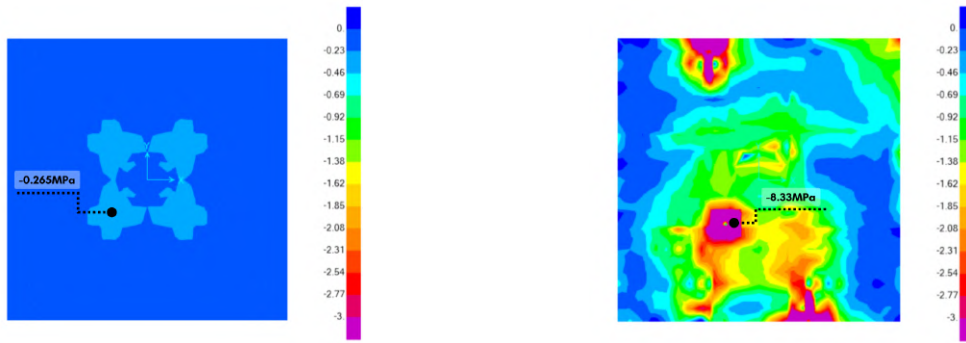


(c) Tensões de Tração por PP (Mapa Vetorial)



(d) Tensões de Tração no ES (Mapa Vetorial)

Figura 5.12: Tensões Principais de Tração na Cota 1.63 metros (Escala: 0 MPa a 3 MPa)
Fonte: Autoria Própria (2024)



(a) Tensões de Compressão por PP (Mapa de Cores)

(b) Tensões de Compressão no ES (Mapa de Cores)



(c) Tensões de Compressão por PP (Mapa Vetorial)

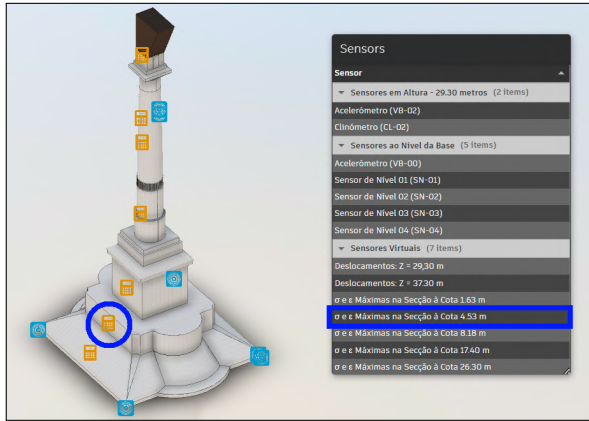
(d) Tensões de Compressão no ES (Mapa Vetorial)

Figura 5.13: Tensões Principais de Compressão na Cota 1.63 metros (Escala: -3 MPa a 0 MPa)
Fonte: Autoria Própria (2024)

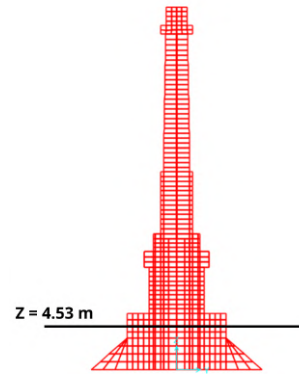
Para esse nível, que ainda se encontra na região da “Base”, há áreas nas secções em que as tensões de tração são consideradas elevadas, parcialmente atribuíveis ao alto Módulo de Elasticidade. O mapa de tensões revela uma distribuição não uniforme para o ES, com pontos de acúmulo de tensões, enquanto para o PP essa característica não é observada.

5.2.3. TENSÕES PRINCIPAIS DE TRAÇÃO E DE COMPRESSÃO: NÍVEL 4.53 METROS

Abaixo, estão as figuras que mostram a escolha do sensor virtual responsável pela análise das principais tensões no DTE na *section cut* situada a 4,53 metros, acompanhadas de uma representação em alçado dessa localização específica. Apresentam-se também os resultados das tensões de tração e compressão, destacando os valores máximos obtidos em cada representação gráfica.

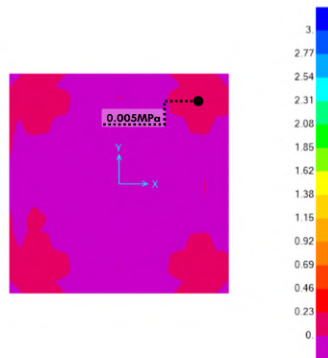


(a) Seleção do Sensor Virtual das Tensões no DTE

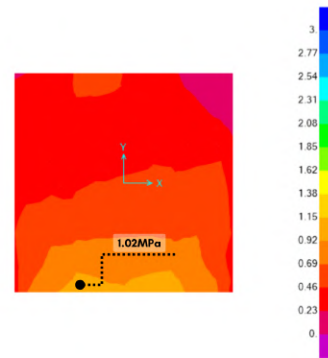


(b) Cota da Section Cut

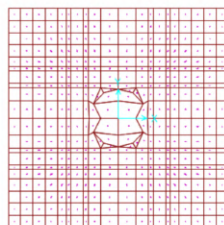
Figura 5.14: Seleção do Sensor Virtual do DTE e Cota da Section Cut (Nível 4.53 metros)
Fonte: Autoria Própria (2024)



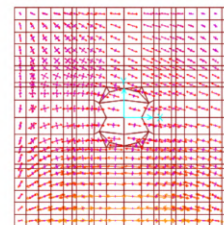
(a) Tensões de Tração por PP (Mapa de Cores)



(b) Tensões de Tração no ES (Mapa de Cores)



(c) Tensões de Tração por PP (Mapa Vetorial)



(d) Tensões de Tração no ES (Mapa Vetorial)

Figura 5.15: Tensões Principais de Tração na Cota 4.53 metros (Escala: 0 MPa a 3 MPa)
Fonte: Autoria Própria (2024)

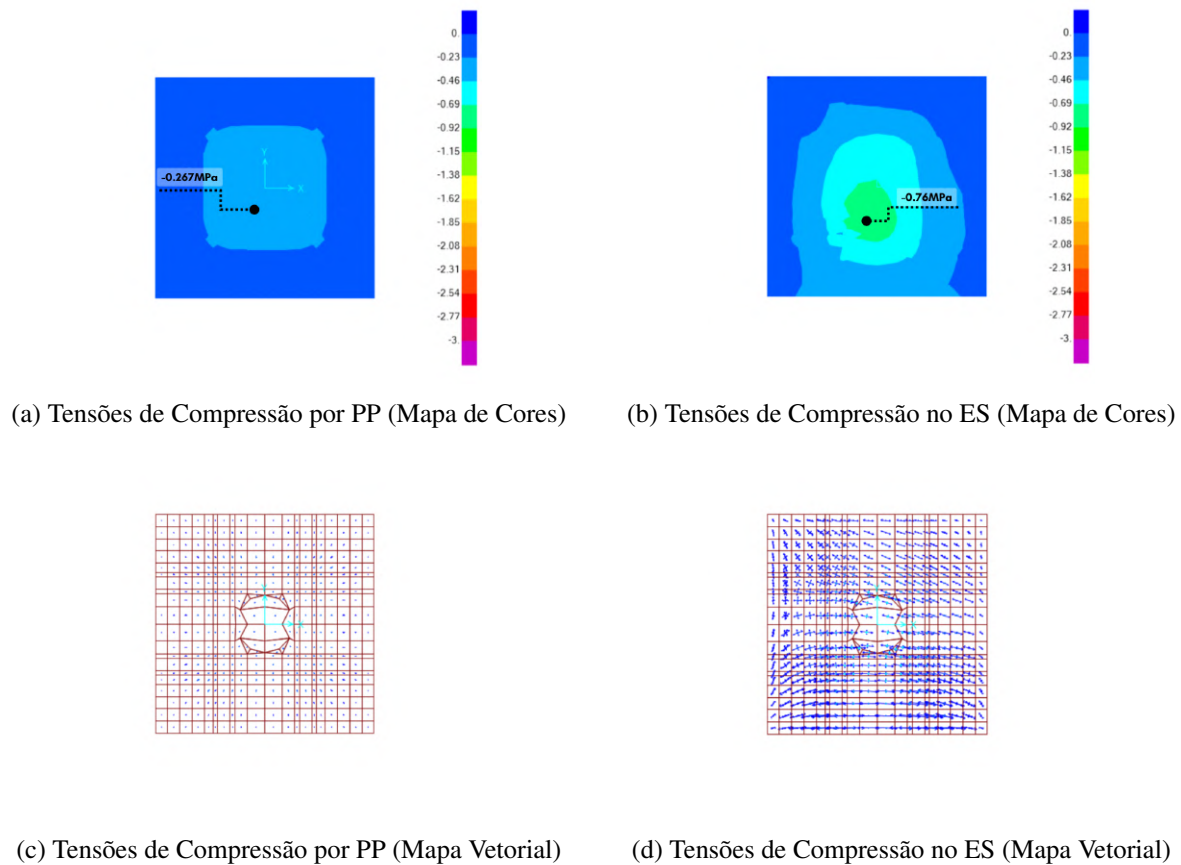
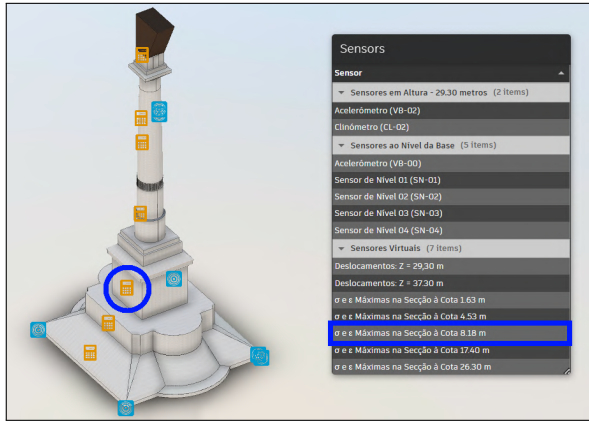


Figura 5.16: Tensões Principais de Compressão na Cota 4.53 metros (Escala: -3 MPa a 0 MPa)
 Fonte: Autoria Própria (2024)

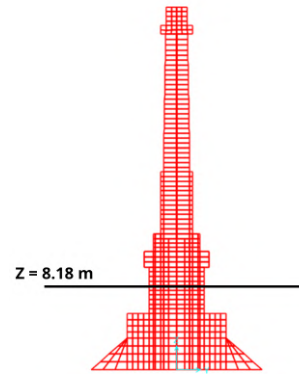
Nesse nível, que continua na região da “Base”, foram identificadas áreas onde as tensões de tração são elevadas, também influenciadas pelo alto Módulo de Elasticidade. Entretanto, observa-se uma maior uniformidade na distribuição das tensões, com uma redução nos pontos de acúmulo de tensões, diferente do observado no nível anterior.

5.2.4. TENSÕES PRINCIPAIS DE TRAÇÃO E DE COMPRESSÃO: NÍVEL 8.18 METROS

A seguir, são exibidas as imagens que demonstram a configuração do sensor virtual utilizado para analisar as principais tensões no DTE na secção de corte posicionada a 8,18 metros, acompanhadas por uma representação em alçado desta área. Posteriormente, são apresentados os resultados das tensões de tração e compressão, com ênfase nos valores máximos observados em cada figura.

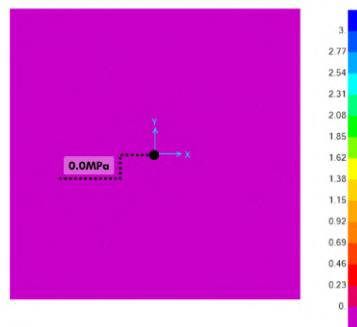


(a) Seleção do Sensor Virtual das Tensões no DTE

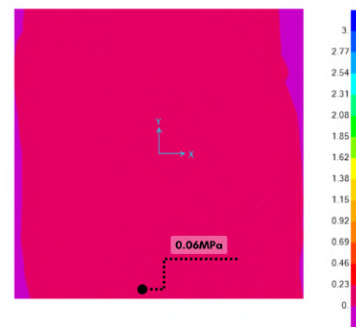


(b) Cota da Section Cut

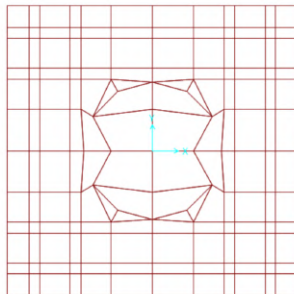
Figura 5.17: Seleção do Sensor Virtual do DTE e Cota da Section Cut (Nível 8.18 metros)
Fonte: Autoria Própria (2024)



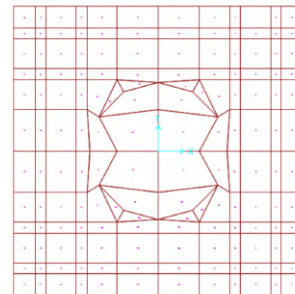
(a) Tensões de Tração por PP (Mapa de Cores)



(b) Tensões de Tração no ES (Mapa de Cores)

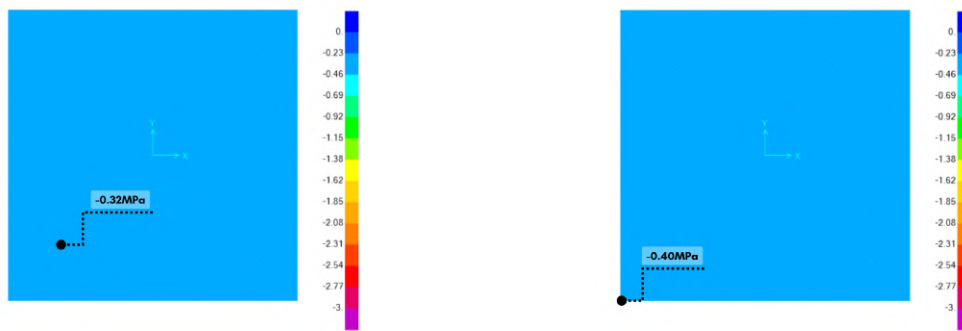


(c) Tensões de Tração por PP (Mapa Vetorial)



(d) Tensões de Tração no ES (Mapa Vetorial)

Figura 5.18: Tensões Principais de Tração na Cota 8.18 metros (Escala: 0 MPa a 3 MPa)
Fonte: Autoria Própria (2024)



(a) Tensões de Compressão por PP (Mapa de Cores)

(b) Tensões de Compressão no ES (Mapa de Cores)



(c) Tensões de Compressão por PP (Mapa Vetorial)

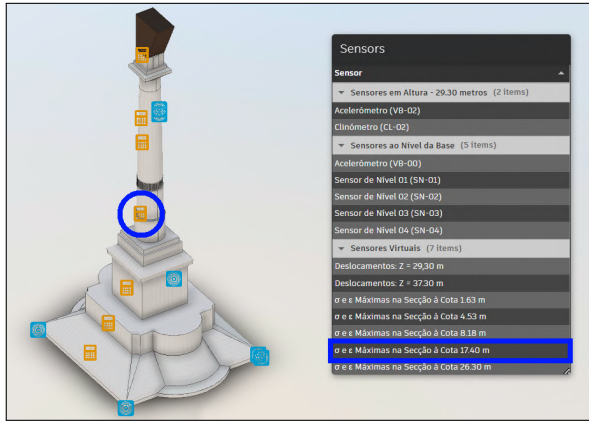
(d) Tensões de Compressão no ES (Mapa Vetorial)

Figura 5.19: Tensões Principais de Compressão na Cota 8.18 metros (Escala: -3 MPa a 0 MPa)
Fonte: Autoria Própria (2024)

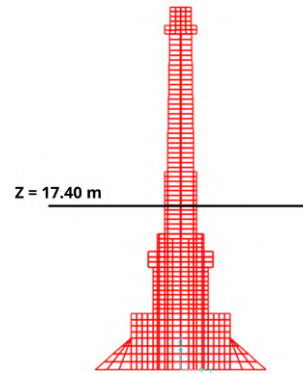
Neste nível, que ainda faz parte da região da “Base”, embora com menor rigidez devido à geometria, as tensões de tração já se aproximam de $0,00 \text{ MPa}$, o que é considerado adequado. A análise indica que as tensões de tração e compressão são mais uniformes e controladas, refletindo uma distribuição mais equilibrada.

5.2.5. TENSÕES PRINCIPAIS DE TRAÇÃO E DE COMPRESSÃO: NÍVEL 17.40 METROS

A seguir, são mostradas as capturas que indicam a seleção do sensor virtual para análise das principais tensões no DTE na secção de corte localizada a 17,40 metros, além de uma representação em alçado dessa posição específica. A seguir, são detalhados os resultados das tensões de tração e compressão, evidenciando os valores máximos encontrados em cada mapa.

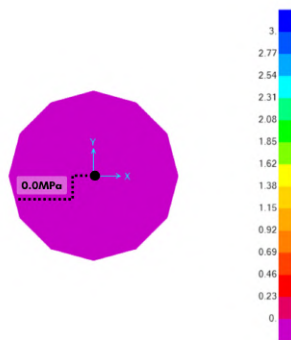


(a) Seleção do Sensor Virtual das Tensões no DTE

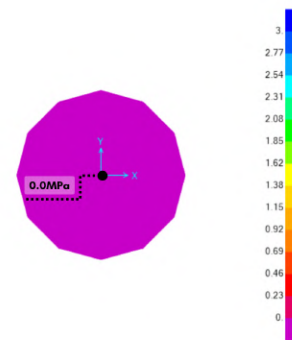


(b) Cota da Section Cut

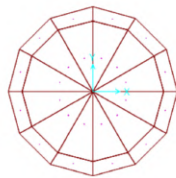
Figura 5.20: Seleção do Sensor Virtual do DTE e Cota da Section Cut (Nível 17.40 metros)
Fonte: Autoria Própria (2024)



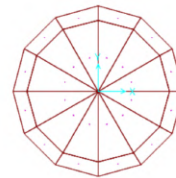
(a) Tensões de Tração por PP (Mapa de Cores)



(b) Tensões de Tração no ES (Mapa de Cores)



(c) Tensões de Tração por PP (Mapa Vetorial)



(d) Tensões de Tração no ES (Mapa Vetorial)

Figura 5.21: Tensões Principais de Tração na Cota 17.40 metros (Escala: 0 MPa a 3 MPa)
Fonte: Autoria Própria (2024)

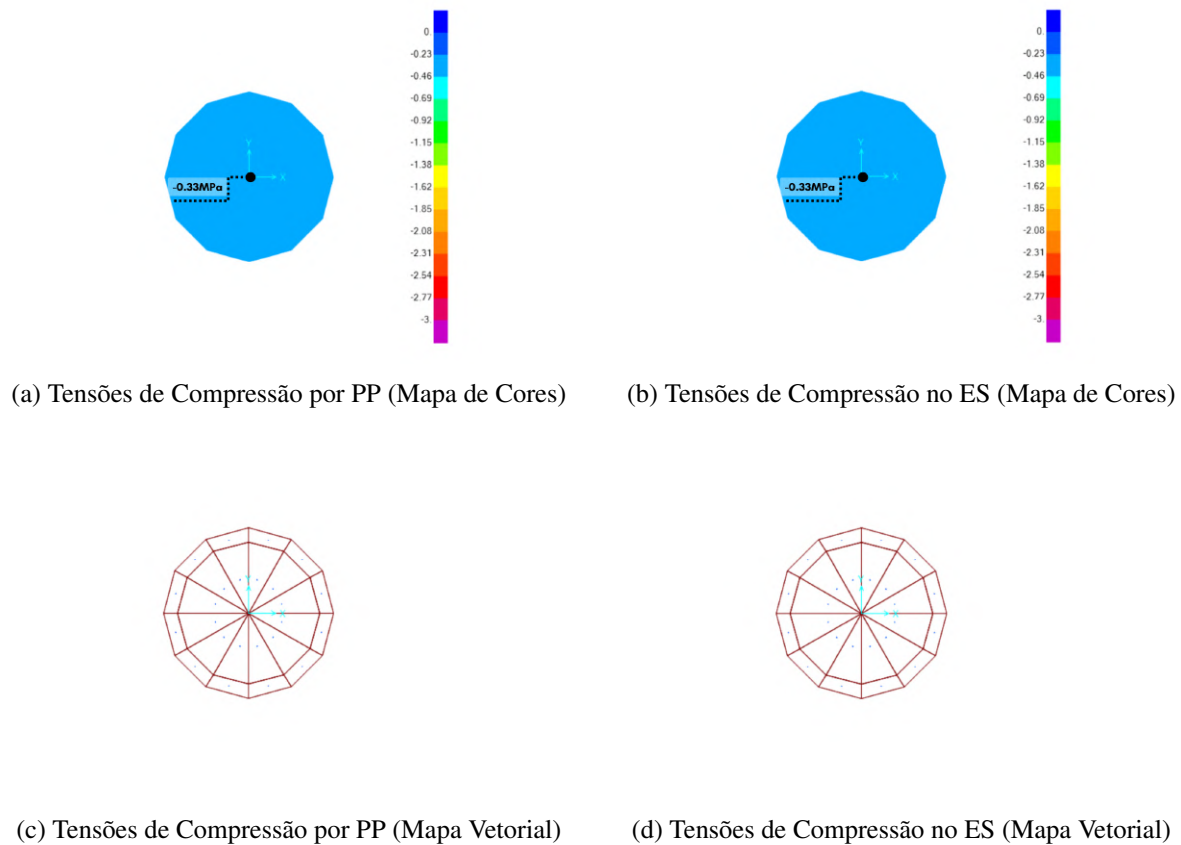
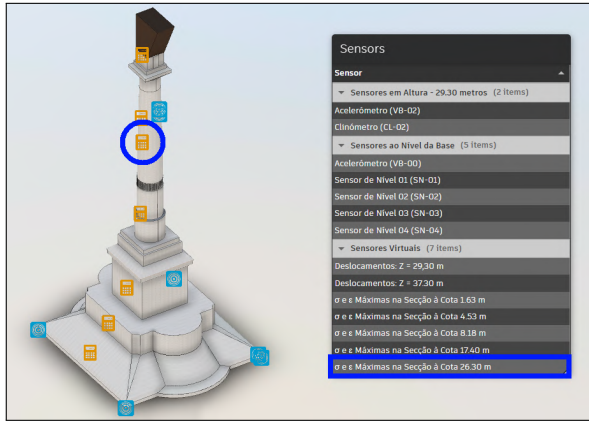


Figura 5.22: Tensões Principais de Compressão na Cota 17.40 metros (Escala: -3 MPa a 0 MPa)
 Fonte: Autoria Própria (2024)

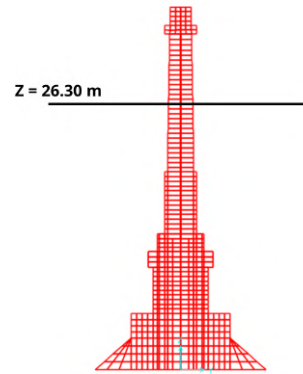
Na zona do “Fuste”, localizada a 17,40 metros, os resultados das análises são adequados, com tensões de tração se aproximando de $0,00 \text{ kPa}$ para todos os cenários analisados. As tensões de compressão também estão dentro dos limites aceitáveis para a secção de corte realizada.

5.2.6. TENSÕES PRINCIPAIS DE TRAÇÃO E DE COMPRESSÃO: NÍVEL 26.30 METROS

Abaixo, são apresentadas as imagens que exemplificam a escolha do sensor virtual responsável pela análise das principais tensões no DTE na *section cut* posicionada a 26,30 metros, acompanhadas de uma representação em alçado dessa área específica. Posteriormente, são fornecidos os resultados das tensões de tração e compressão, com destaque para os valores máximos encontrados em cada figura.

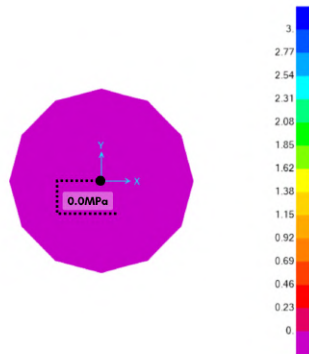


(a) Seleção do Sensor Virtual das Tensões no DTE

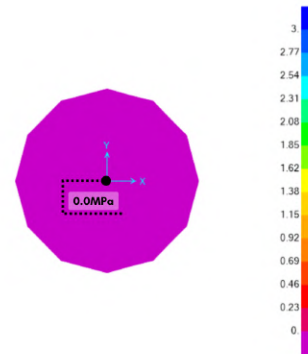


(b) Cota da Section Cut

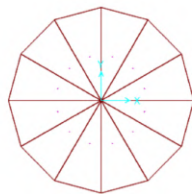
Figura 5.23: Seleção do Sensor Virtual do DTE e Cota da Section Cut (Nível 26.30 metros)
Fonte: Autoria Própria (2024)



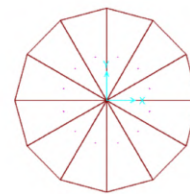
(a) Tensões de Tração por PP (Mapa de Cores)



(b) Tensões de Tração no ES (Mapa de Cores)



(c) Tensões de Tração por PP (Mapa Vetorial)



(d) Tensões de Tração no ES (Mapa Vetorial)

Figura 5.24: Tensões Principais de Tração na Cota 26.30 metros (Escala: 0 MPa a 3 MPa)
Fonte: Autoria Própria (2024)

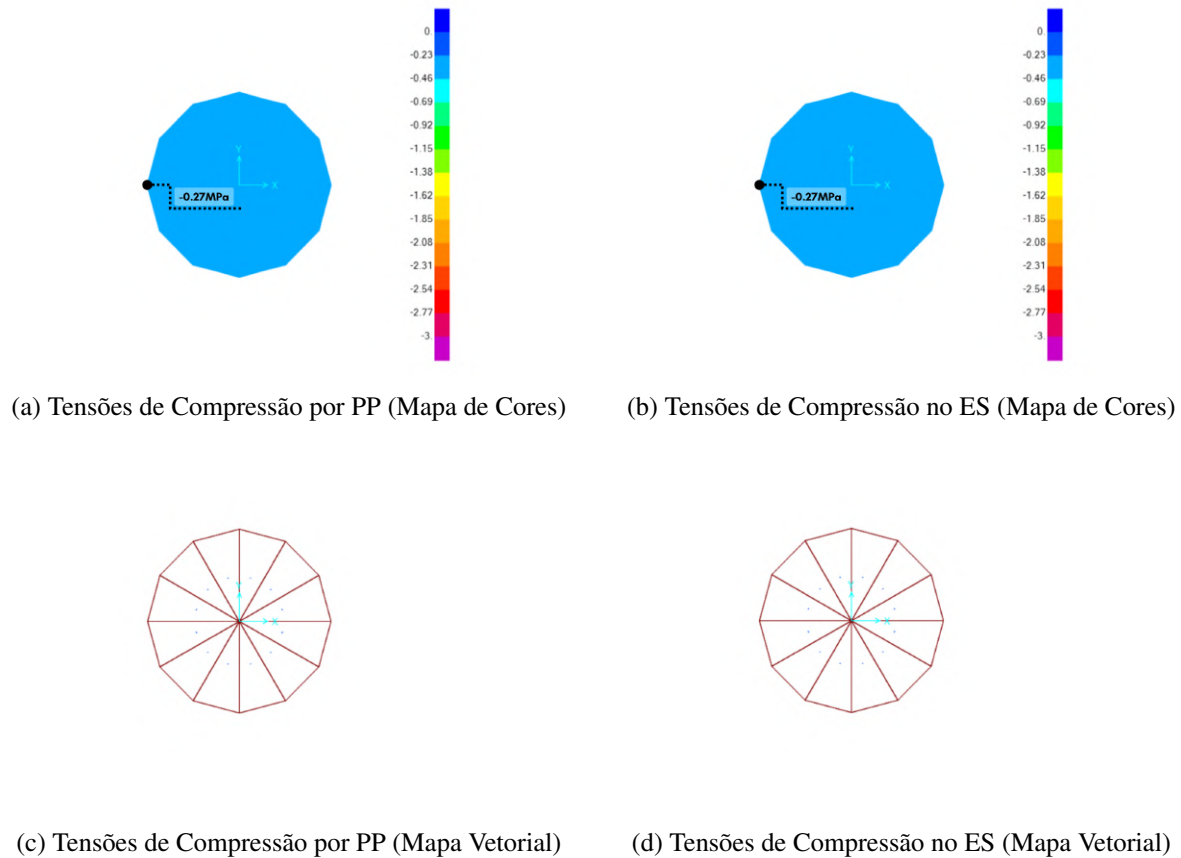


Figura 5.25: Tensões Principais de Compressão na Cota 26.30 metros (Escala: -3 MPa a 0 MPa)
 Fonte: Autoria Própria (2024)

Neste nível, também na região do “Fuste”, os resultados são satisfatórios, com as tensões de tração se aproximando de $0,00 \text{ kPa}$ para todos os cenários analisados. As tensões de compressão permanecem dentro dos parâmetros adequados para a *section cut*.

6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. CONCLUSÕES

A adoção de um DT em conjunto com a monitorização de estruturas marca um avanço significativo na engenharia civil, oferecendo uma alternativa eficiente, acessível e confiável em relação aos métodos convencionais de avaliação das edificações. Dada a natureza emergente e exploratória desta tecnologia, é essencial compreender a possível e provável evolução dos componentes tecnológicos abordados neste trabalho. Além disso, é necessário estabelecer uma base de conhecimento para permitir que outros pesquisadores se integrem ao campo de estudo e contribuam para o avanço dos *digital twins*, especialmente aqueles relacionados a estruturas de engenharia civil.

O *digital twin* estrutural representa uma evolução do DT tradicional, permitindo uma integração mais profunda entre a visualização em tempo real, os dados de monitorização e a modelação estrutural. Embora ainda não tenha sido alcançada uma integração totalmente autónoma entre esses elementos, foi observada a viabilidade de realizar este feito. A ferramenta do DTE não só auxilia na tomada de decisões relacionadas com a manutenção e segurança, mas também fornece uma visão abrangente do estado da estrutura ao longo do tempo, possibilitando que até mesmo aqueles sem experiência em ferramentas de modelação estrutural possam ter acesso aos resultados através de uma aplicação *web* acessível.

A modelação estrutural constitui a base do *digital twin* estrutural, mediante a criação de uma representação virtual da estrutura real, visando representar, com o maior número de detalhes possível, as características geométricas, materiais e o comportamento mecânico. Quando integrada com dados de monitorização em tempo real, esta representação digital permite acompanhar o comportamento da estrutura em condições reais, disponibilizando informações para as quais, por vezes, não há sensores reais disponíveis para fornecer. Esses resultados podem ser muito oportunos para a tomada de decisões relacionadas com a manutenção, segurança e optimização do desempenho estrutural.

Um passo importante para o sucesso dos DT e DTE é a monitorização estrutural, que requer a instrumentação adequada das construções para garantir a sua segurança e integridade ao longo do tempo. Perceber o funcionamento da instrumentação e utilizar as ferramentas adequadas, como sensores de deformação e de vibração, é fundamental para obter dados precisos sobre o desempenho da estrutura em tempo real. Este trabalho também discutiu o tema da monitorização das estruturas e apresentou, no caso de estudo tratado, as estratégias adotadas para a realização desta.

O caso de estudo presente recai sobre a monitorização do Monumento aos Heróis da Guerra Peninsular e permitiu alcançar objetivos relacionados com a criação de uma aplicação mais eficiente e intuitiva, bem como com os procedimentos e a sistematização de uma abordagem para o desenvolvimento futuro de ferramentas de *digital twin* estrutural. Cada caso de estudo deve ser avaliado individualmente, considerando fatores internos, como a disponibilidade de dados e a viabilidade da modelação tridimensional, e externos, como o financiamento e as tecnologias existentes e acessíveis, que influenciam a viabilidade do desenvolvimento do DT.

É necessário reconhecer os desafios atuais na indústria AEC, como a importância da formação de especialistas em programação voltada para a engenharia civil e a necessidade de manter o conhecimento constantemente atualizado para lidar com as novas tecnologias e demandas do mercado.

Em resumo, o desenvolvimento e a implementação do *digital twin* estrutural representam uma oportunidade notável para aprimorar a gestão do controlo de estruturas na engenharia civil. Quando adotada uma abordagem direcionada para as finalidades específicas, esta ferramenta tem o potencial de revolucionar a forma como as estruturas são monitorizadas e mantidas, garantindo maior segurança e eficiência ao longo do tempo.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A dissertação tem como objetivo estabelecer uma base sólida para investigações sobre *digital twins*, além de apresentar propostas para o avanço de estudos posteriores. A seguir, são apresentadas algumas sugestões e ideias para trabalhos futuros:

- Integrar em tempo real o *digital twin* e o modelo estrutural, implementando um algoritmo contínuo que, de forma automática, colete dados dos sensores, realize simulações no modelo, extraia resultados e os armazene no InfluxDB.
- Com base nos resultados obtidos pelo modelo estrutural, automatizar a realização de alterações no modelo 3D, de modo a torná-lo capaz de evidenciar, de forma intuitiva para o utilizador, as implicações das informações coletadas pelos sensores na construção. Um exemplo seria a exibição das deformadas do modelo.
- Integrar os sensores e os parâmetros que registam nos elementos do modelo, para gerar mapas de cores que representem os valores medidos em tempo real e calculados pelo modelo estrutural. Estes mapas seriam acompanhados de uma legenda de cores, indicando o nível de alerta associado a cada valor.
- Representar com precisão máxima ou o mais próximo disso a edificação em estudo, através de várias abordagens que podem ser consideradas. Do ponto de vista do modelo BIM, seria necessário explorar tecnologias como *laser scanning*, por exemplo. Em relação ao modelo estrutural, é possível buscar métodos adicionais de caracterização da estrutura. Dependendo da edificação, também pode ser viável obter informações do projeto estrutural, realizar a extração de provetes e executar ensaios para a caracterização geotécnica, por exemplo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arêde, A., Pinto, N. e Nogueira, G. Relatório da Fase 2 - Relatório de instalação do sistema de monitorização estrutural - Monumento aos Heróis da Guerra Peninsular (em desenvolvimento), 2024.
- Ashton, K. That “Internet of Things” Thing. *RFID Journal*, páginas 97–114, 2009. Disponível em: <https://www.rfidjournal.com/that-internet-of-things-thing>. Acedido em 03 de maio de 2024.
- Attaran, M. e Celik, B. G. Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities. *Decision Analytics Journal*, 6:100165, 2023. ISSN 2772-6622. DOI: 10.1016/j.dajour.2023.100165. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100165>. Acedido em 12 de março de 2024.
- Azenha, M., Lino, J. C. e Granja, J. L. BIM aplicado a edifícios históricos: HBIM. Apresentação Power-Point, 2018. Disponível em: <https://docplayer.com.br/95025041-Bim-aplicado-a-edificios-historicos-hbim.html>. Acedido em 04 de maio de 2024.
- Azevedo, Á. F. M. *Método dos Elementos Finitos*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1ª Edição, 2003.
- Azhar, S., Khalfan, M. e Maqsood, T. Building information modeling (BIM): Now and beyond. *Australasian Journal of Construction Economics and Building*, 12:15–28, 2012. ISSN 18379133. DOI: 10.5130/ajceb.v12i4.3032. Disponível em: <https://doi.org/10.5130/AJCEB.v12i4.3032>. Acedido em 10 de fevereiro de 2024.
- Baptista, A. R. R. T. G. Utilização De Ferramentas BIM No Planeamento De Trabalhos De Construção – Estudo De Caso. *Faculdade de Engenharia - Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto*, 2015. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10216/78182>. Acedido em 12 de fevereiro de 2024.
- BIMware. History of Robobat and the BIMware Brand, s.d. Disponível em: <https://bimware.com/company/history.html>. Acedido em 03 de maio de 2024.
- Cook, R. D., Malkus, D. S. e Plesha, M. E. *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. John Wiley & Sons, Inc., 3ª Edição, 1989.
- CRERE Portugal. Restauro do Obelisco da Boavista – Monumento aos Heróis da Guerra Peninsular (Porto), s.d. Disponível em: <http://crereportugal.com/pt/restore/detail/19>. Acedido em 15 de fevereiro de 2024.
- Dassault Systèmes. 40+ Years of Innovation and Success, 2022. Disponível em: <https://www.3ds.com/about/company/history>. Acedido em 04 de maio de 2024.
- Direção-Geral do Património Cultural. Monumento aos Heróis da Guerra Peninsular, 2011. Disponível em: http://www.monumentos.gov.pt/Site/APP_PagesUser/SIPA.aspx?id=5466. Acedido em 15 de fevereiro de 2024.
- Dix, P. Why time series matters for metrics, real-time analytics and sensor data, 2023. Disponível em: <https://get.influxdata.com/rs/972-GDU-533/images/why%20time%20series.pdf>. Acedido em 05 de maio de 2024.

- Eastman, C., Teicholz, P., Sack, R. e Liston, K. *BIM handbook: a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*. John Wiley & Sons, Inc, 2ª Edição, 2011. ISBN 978-0-470-54137-1.
- GitHub - Grafana. Grafana - Overview, 2023. Disponível em: <https://awesome-astra.github.io/docs/pages/tools/integration/grafana/#contacts>. Acedido em 05 de maio de 2024.
- Grieves, M. e Vickers, J. *Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems*, páginas 85–113. Springer International Publishing, Cham, 2017. ISBN 978-3-319-38756-7. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7>. Acedido em 13 de fevereiro de 2024.
- InfluxData. InfluxData - Dashboards, 2024. Disponível em: <https://www.influxdata.com/dashboards/>. Acedido em 05 de maio de 2024.
- Labfacility. Pt100 Class B Sensors with Teflon insulated lead - Type PRT, s.d. Disponível em: <https://www.labfacility.com/pt100-class-b-sensors-with-teflonr-insulated-lead-type-prt.html>. Acedido em 24 de abril de 2024.
- Lawrence, W. Autodesk Forge is becoming Autodesk Platform Services. *Autodesk Community Blog*, 2022. Disponível em: <https://aps.autodesk.com/blog/autodesk-forge-becoming-autodesk-platform-services>. Acedido em 13 de março de 2024.
- Løfaldli, H. e Haugen, B. Digital Twin Solution for Structural Health Monitoring of Stadia Structures - Monitoring of Vibrations Caused by Dynamic Crowd Loads at Lerkendal Stadion. Tese de Mestrado, Norwegian University of Science and Technology, 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11250/2562812>. Acedido em 14 de fevereiro de 2024.
- McClelland, C. IoT 101: What is a Gateway?, 2017. Disponível em: <https://medium.com/iotforall/iot-101-what-is-a-gateway-be066763b98d>. Acedido em 03 de maio de 2024.
- McClelland, C. What is the Cloud? How Does it Fit into the Internet of Things (IoT)?, 2020. Disponível em: <https://www.iotforall.com/what-is-the-cloud>. Acedido em 03 de maio de 2024.
- Monteiro, F. A. C. Monitorização de Estruturas. Tese de Mestrado, Universidade da Beira Interior, 2010. Disponível em: https://ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.6/3452/1/MONITORI_DE ESTRUTURAS.pdf. Acedido em 04 de maio de 2024.
- Move Solutions. Move Solutions, s.d. Disponível em: <https://www.movesolutions.it/wp-content/uploads/2021/09/howitworks-1.png>. Acedido em 03 de maio de 2024.
- Nakasone, Y., Yoshimoto, S. e Stolarski, T. A. *Engineering Analysis with ANSYS Software*. Elsevier's Science & Technology, 2007. DOI: 10.1016/B978-0-7506-6875-0.X5030-3.
- Narciso, M. M. R. C. C. Contributo para a normalização BIM em Portugal - Proposta de adenda de apoio à contratação Engenharia Civil. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, 2016. Disponível em: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/cursos/mec/dissertacao/846778572211630>. Acedido em 10 de fevereiro de 2024.
- Noletto, C. Banco de dados: tipos, o que é, e suas diferenças, 2020. Disponível em: <https://blog.betrybe.com/tecnologia/bancos-de-dados/#1>. Acedido em 05 de maio de 2024.
- Nour El-Din, M., Pereira, P. F., Poças Martins, J. e Ramos, N. M. M. Digital Twins for Construction Assets Using BIM Standard Specifications. *Buildings*, 12(12), 2022. DOI: 10.3390/buildings12122155. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings12122155>. Acedido em 12 de fevereiro de 2024.

- Pinto, G. Como funcionam os sensores inteligentes em soluções de IoT?, 2023. Disponível em: <https://v2com.com/2023/12/23/iot-sensores-inteligentes/>. Acedido em 03 de maio de 2024.
- Santos, D., Sousa, H. S., Cabaleiro, M. e Branco, J. M. HBIM Application in Historic Timber Structures: A Systematic Review. *International Journal of Architectural Heritage*, 17, 2023. ISSN 15583066. DOI: 10.1080/15583058.2022.2034071. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15583058.2022.2034071>. Acedido em 13 de fevereiro de 2024.
- Sarawagi, S. What is Grafana? Why Use It? Everything You Should Know About It, 2021. Disponível em: <https://scaleyourapp.com/what-is-grafana-why-use-it-everything-you-should-know-about-it/>. Acedido em 05 de maio de 2024.
- Silva, H. Desenvolvimento de Um Digital Twin no Contexto da Monitorização de Estruturas. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2022. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10216/144269>. Acedido em 24 de janeiro de 2024.
- Silva, H., Arêde, A. e Castro, J. M. Relatório dos Procedimentos de Aquisição e Processamento de Dados - Sistema de monitorização estrutural - Monumento aos Heróis da Guerra Peninsular (em desenvolvimento), 2024.
- STEMmporium. What is the Fourier Transform and how is it used in Image processing?, 2023. Disponível em: <https://stemporium.blog/2023/04/13/what-is-the-fourier-transform-and-how-is-it-used-in-image-processing/>. Acedido em 30 de maio de 2024.
- Utilizando BIM. O que é LOD em um projeto BIM?, 2019. Disponível em: <https://utilizandobim.com/blog/o-que-e-lod-bim/>. Acedido em 12 de fevereiro de 2024.
- Wahab, M. A. The Mechanics of Adhesives in Composite and Metal Joints: Finite Element Analysis with ANSYS. *DEStech Publications*, página 59, 2014.
- Walmsley, K. The Past and Future of Digital Twins at Autodesk: From Project Dasher to Autodesk Tandem and Beyond. Em: *Design Computation Input/Output Conference*, 2021. DOI: 10.47330/DCIO.2021.JSZE2664. Disponível em: <https://doi.org/10.47330/DCIO.2021.ENAB9070>. Acedido em 13 de março de 2024.
- Xu, L. D., Xu, E. L. e Li, L. Industry 4.0: state of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, 56(8):2941–2962, 2018. DOI: 10.1080/00207543.2018.1444806. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>. Acedido em 05 de março de 2024.
- Yu, S., Li, D. e Ou, J. Digital twin-based structure health hybrid monitoring and fatigue evaluation of orthotropic steel deck in cable-stayed bridge. *Structural Control and Health Monitoring*, 29(8):e2976, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/stc.2976>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/stc.2976>. Acedido em 16 de abril de 2024.
- Zuppa, D., Issa, R. R. e Suermann, P. C. BIM's impact on the success measures of construction projects. Em: *Computing in Civil Engineering (2009)*, Volume 346, 2009. DOI: 10.1061/41052(346)50. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/41052\(346\)50](https://doi.org/10.1061/41052(346)50). Acedido em 10 de fevereiro de 2024.

ANEXO A

EQUIPAMENTOS DE MONITORIZAÇÃO

A.1. SENSORES DE NÍVEL

Os sensores de nível utilizados neste projeto são, em boa verdade, sensores de pressão compostos por uma célula cerâmica para medição de baixos valores de pressão com transmissão elétrica analógica. As especificações técnicas destes sensores estão descritas na Tabela A.1.

Estando interligados entre si por um sistema hidráulico (de água, no presente caso), estes sensores medem a variação de pressão da coluna de água nos seus respetivos pontos, permitindo assim obter o desnível desses pontos relativamente a um local onde se espera não haver variação de nível (local monitorizado com um sensor de nível designado por “sensor de referência”).

Este equipamento, designado de **PR-41X**, possui um sensor de temperatura integrado e um microprocessador que realiza, de forma automática, a compensação de efeitos térmicos, que podem afetar os resultados da medição de pressão diretamente obtida na célula cerâmica.

SENSOR DE NÍVEL	
Fornecedor	KELLER
Modelo	PR-41X
Alimentação	8 - 28 Vdc
Sinal de saída (output)	4 - 20 mA
Conexão	Cabo (2 fios)
Campo de medida	20 mBar
	200 mmH2O
Resolução (@16Bits; LSB 15)	0.01 mmH2O
Precisão/Linearidade (FS)	0.20% (FS)
	0.04 mBar
	0.4 mmH2O

Tabela A.1: Especificações técnicas – Sensor de Nível
Fonte: Adaptado da Ficha Técnica da Marca (2024)

A.2. SENSORES DE ROTAÇÃO – CLINÓMETROS

Este sensor, um clinómetro MEMS com alcance de medição escalável ($\pm 10^\circ$ e $\pm 90^\circ$), é um transdutor de acelerações baseado em tecnologia MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*). Ele permite monitorar inclinações em torno dos eixos de um corpo ao qual está fixado. O equipamento apresenta alta resolução de 0.0055° e alta precisão ($\pm 0.01^\circ$ para alcance de $\pm 10^\circ$, $\pm 0.02^\circ$ para alcance de $\pm 90^\circ$). Possui um registador de dados embutido com capacidade para até 8 milhões de pontos de dados (com datas de eventos).

A sua carcaça é impermeável com classificação IP67 (Nema 6). Para comunicação, utiliza redes de sensores sem fio operando a 2.4 GHz IEEE 802.15.4E radio sincronizadas no tempo ($\pm 2.5\text{ms}$ de precisão), com excelente conexão de rádio baseada na diversidade de antena de rádio desenvolvida pela Beanair®. Há um certificado de calibração fornecido pelo fabricante. As especificações técnicas destes sensores, designados de **BeanDevice®2.4GHz Hi-InC-SR**, estão descritas na Tabela A.2.

CLINÓMETRO	
Fornecedor	BeanAir
Modelo	BeanDevice®2.4GHz Hi-InC-SR
Alimentação	9V – 30V DC
Conexão	Wireless 2.4 GHz IEEE 802.15.4E
Campo de medida	$\pm 10^\circ$ ou $\pm 90^\circ$, com ajuste automático de faixa dependendo da aplicação.
Resolução (% FS)	0.0055°
Precisão/Linearidade (FS)	$\pm 0.01^\circ$ para uma faixa de $\pm 10^\circ$ $\pm 0.02^\circ$ para uma faixa de $\pm 90^\circ$

Tabela A.2: Especificações técnicas – Clinómetro

Fonte: Adaptado da Ficha Técnica da Marca (2024)

A.3. SENSORES DE TEMPERATURA

O sensor de temperatura utilizado nesta instalação é do tipo RTD (*Resistance Temperature Detector*), mais especificamente composto por uma sonda tipo Pt100 (elemento sensor de platina com resistência de 100Ω a 0°C) cuja resistência elétrica varia com a temperatura. A variação de resistência pode ser convertida, através de um transmissor de temperatura, num sinal de corrente tipicamente de 4-20mA.

O sensor utilizado tem dois fornecedores distintos, sendo um para a própria sonda e outro para o transmissor, conforme descrito na Tabela A.3.

SONDA PT100		TRANSMISSOR DE TEMPERATURA	
Fornecedor	LABFACILITY	Fornecedor	Status Instruments
Modelo	Pt100 PROBE 3.0	Modelo	SEM203/P
Conexão	Cabo (4 fios)	Alimentação	10 - 30 Vdc
Campo de medida	-50°C a +200°C	Sinal de entrada (input)	18 - 390 Ω
		Sinal de saída (output)	4 - 20 mA
Fornecedor	RS-PRO	Conexão	In (3 fios) / Out (2 fios)
Modelo	Pt100 PROBE 5.0	Campo de medida	-195°C a +845°C
Conexão	Cabo (3 fios)	Precisão de entrada	0.2°C $\pm$ 0.05% da leitura
Campo de medida	-20°C a +100°C	Precisão de saída	Máx. [(mA output /2000) ou 5 μ A]

Tabela A.3: Especificações técnicas – Sensor de Temperatura

Fonte: Adaptado da Ficha Técnica das Marcas (2024)

A.4. ACELERÓMETRO TRIAXIAL COM TRANSMISSÃO SEM FIOS

O sensor de vibração, ou acelerómetro, é triaxial e possui transmissão sem fios operando a 2.4 GHz IEEE 802.15.4E radio, com alcance de comunicação de pelo menos 500m em espaço aberto e 50m em ambientes internos. Com um intervalo de medição de $\pm 2g$ e uma resolução mínima de 16 bits, oferece compensação de temperatura e uma largura de banda de entrada DC de até 800Hz, garantindo alta sensibilidade e precisão.

Além disso, o sensor inclui um registador de informações embutido capaz de armazenar até 1 milhão de pontos de dados, e é alimentado por uma bateria de lítio recarregável com capacidade mínima de 1 Ah, compatível com fontes de energia entre 9V e 30V DC. Com um invólucro classificado como IP66 contra água, e certificado de calibração pelo fabricante, oferece fiabilidade e durabilidade em diversas aplicações de monitorização de vibração e aceleração. As especificações técnicas mais relevantes do acelerómetro adotado (**BeanDevice@2.4GHz AX-3D**) encontram-se na Tabela A.4.

ACELERÓMETRO	
Fornecedor	BeanAir
Modelo	BeanDevice@2.4GHz AX-3D
Alimentação	9V – 30V DC
Conexão	Wireless 2.4 GHz IEEE 802.15.4E
Campo de medida	$\pm 2.00g$
Precisão de sincronizador do relógio	Inferior a ± 2.5 ms
Erro máximo de não-linearidade	Inferior a $\pm 0.1\%$

Tabela A.4: Especificações técnicas – Acelerómetros

Fonte: Adaptado da Ficha Técnica da Marca (2024)

A.5. MÓDULO DE AQUISIÇÃO DE SINAIS ANALÓGICOS E DE TRANSMISSÃO SEM FIOS

O modelo utilizado, cujas principais especificações se encontram na Tabela A.5, é designado de **Bean-Device®2.4GHz AN-420** e conta com 4 canais de entradas analógicas com condicionamento de sinal em corrente de 4 a 20 mA. Dispõe de eletrónica integrada, que permite aquisição, condicionamento, filtragem, registo e transmissão de dados via wireless, incluindo um conversor analógico-digital de 16 bits.

Possui modo de funcionamento autónomo graças a um microprocessador, memória de armazenamento local com capacidade de armazenamento de informações superior a 1 milhão de pontos de dados e bateria interna (mas também alimentável externamente).

MÓDULO DE AQUISIÇÃO	
Fornecedor	BeanAir
Modelo	BeanDevice®2.4GHz AN-420
Alimentação - Externa	+8V - 28V DC
Conexão Entrada	Cabo
Conexão Saída	Wireless 2.4 GHz IEEE 802.15.4E
CANAIS DE ENTRADAS ANALÓGICAS (4)	
Campo de Leitura	Circuito de corrente de 4-20 mA
Resolução do Conversor Analógico-Digital	16 bits

Tabela A.5: Especificações técnicas - Módulo de Aquisição de Dados de Tensão

Fonte: Adaptado da Ficha Técnica da Marca (2024)

A.6. MÓDULO DE AGREGAÇÃO DE DADOS E DE SAÍDA (GATEWAY)

O *Gateway* atua como um agregador e coordenador de sinais de sensores, transmitindo dados de forma sem fio mediante uma rede operando em 2.4 GHz IEEE 802.15.4E radio. Equipado com antena integrada e cabo correspondente, garante uma comunicação sem fio confiável com um alcance mínimo de 1000m em áreas externas (em linha de visão), e no mínimo de 70m em ambientes internos (com obstruções), oferecendo uma taxa de transmissão de dados de 250 Kbits/s ou superior. Além disso, o *Gateway* possui conectividade 3G/4G compatível com os protocolos LTE, UMTS/DC-HSPA+, GSM/GPRS/EDGE. Inclui uma antena omnidirecional 4G e o seu cabo de ligação para assegurar uma conexão estável em ambientes exteriores.

Ele é fornecido com uma fonte de alimentação externa de 220V AC e uma UPS (*Uninterruptible Power Supply*) com uma bateria de capacidade mínima de 10Ah, garantindo um funcionamento contínuo mesmo em casos de queda de energia.

As características técnicas principais deste equipamento, cujo modelo é designado de **BeanGateway®2.4GHz 3G/4G/LTE**, encontram-se brevemente resumidas na Tabela A.6.

GATEWAY	
Fornecedor	BeanAir
Modelo	BeanGateway®2.4GHz 3G/4G/LTE
Alimentação	94V - 264V AC
Transmissão sem Fios	Wireless 2.4 GHz IEEE 802.15.4E, 3G/4G, com protocolos LTE, UMTS/DC-HSPA+, GSM/GPRS/EDGE
Capacidade de Bateria	+10Ah
Temperatura de Funcionamento	-15°C a 50°C

Tabela A.6: Especificações técnicas - Agregador de Dados ou *Gateway*

Fonte: Adaptado da Ficha Técnica da Marca (2024)

A.7. ROUTER DE TRANSMISSÃO REMOTA DE DADOS

Além da rede *ethernet* local, também acessível sem fios via WiFi, este equipamento permite estabelecer comunicações com o exterior através de uma rede móvel providenciada por um cartão de dados SIM inserido no próprio *router* para acesso à *internet*. Mediante a utilização de software apropriado suportado pelo *router* (concretamente o *WireGard*), é estabelecida uma rede privada virtual (VPN) entre o *router* e um computador externo remoto, que garante comunicações seguras através de *internet* e permite acesso direto à *gateway*.

Deste modo é possível, a partir de qualquer computador exterior, aceder à *gateway* para configuração e gestão de toda a rede de monitorização wireless, bem como para visualizar e transmitir os resultados da monitorização.

O *router* adotado, cujo modelo é designado de **Rut240**, tem as suas características técnicas principais encontram-se resumidas na Tabela A.7.

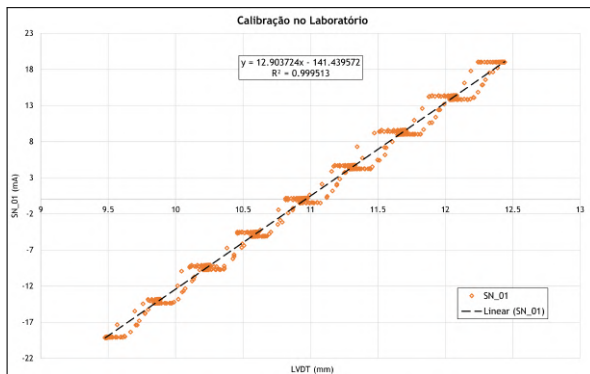
ROUTER	
Fornecedor	Teltonika Networks
Modelo	Rut240
Alimentação	9 – 30 Vdc
Processador	Atheros, MIPS 24Kc, 400 MHz
Sistema Operativo	RutOS (OpenWrt based Linux OS)
Memória	128 MBbRAM ; 16 MB Flash
Conectividade	Mobile 4G/LTE (Cat 4), 3G, 2G
	Ethernet 10/100 Mbps,
	WiFi: IEEE 802.11b/g/n
Protocolos de Rede	Access point (AP), Station (STA)
	TCP, UDP, IPv4, IPv6, ICMP, NTP, DNS,
	HTTP, HTTPS, FTP, SMTP, SSLv3, TLS 1.3, ARP, PPP, PPPoE, DHCP, Telnet

Tabela A.7: Especificações técnicas - *Router*

Fonte: Adaptado da Ficha Técnica da Marca (2024)

ANEXO B

CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE NÍVEL



(a) Calibração no laboratório

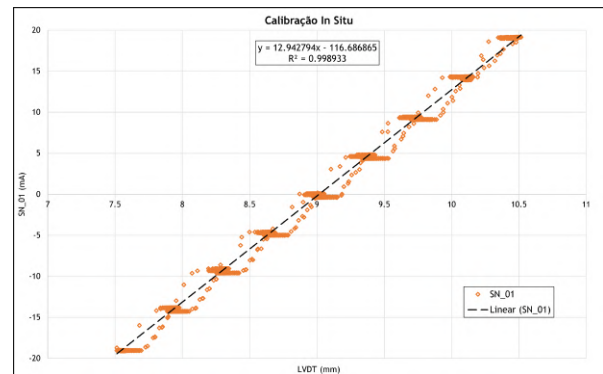
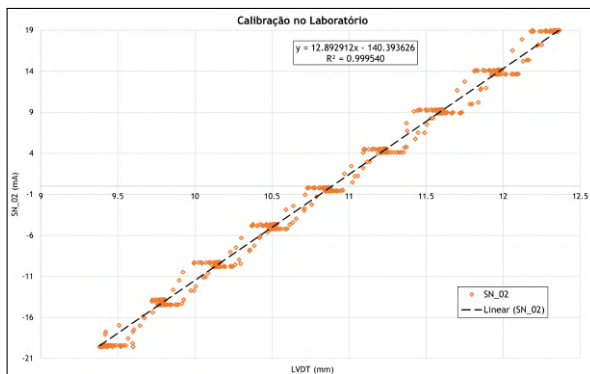
(b) Calibração *in situ*

Figura B.1: Calibração do sensor de nível SN_01
Fonte: Arêde et al. (2024)



(a) Calibração no laboratório

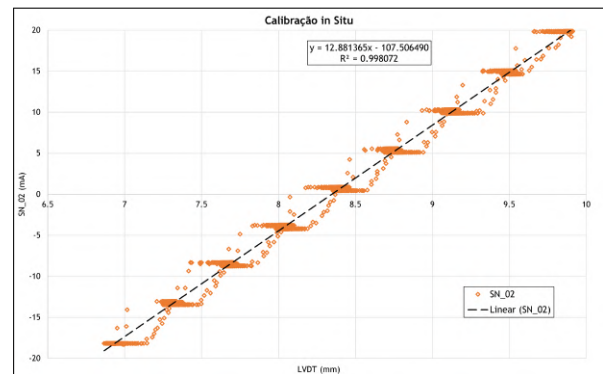
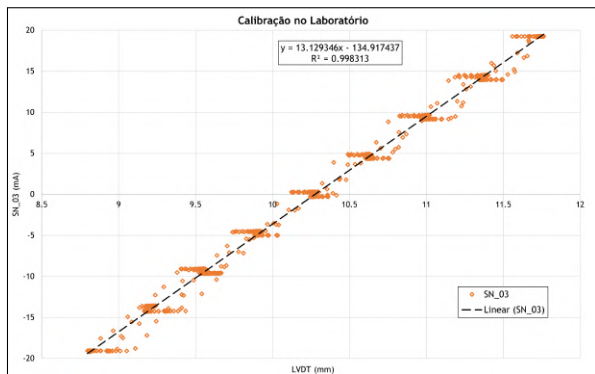
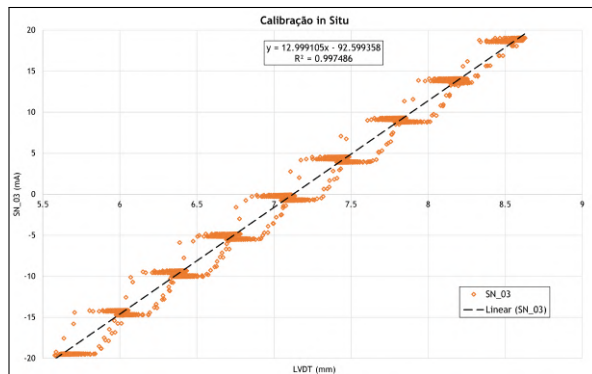
(b) Calibração *in situ*

Figura B.2: Calibração do sensor de nível SN_02
Fonte: Arêde et al. (2024)

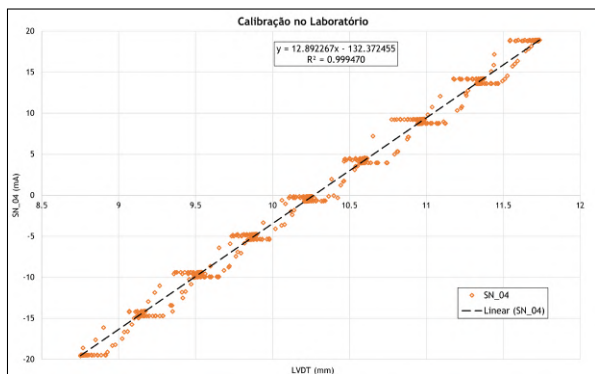


(a) Calibração no laboratório

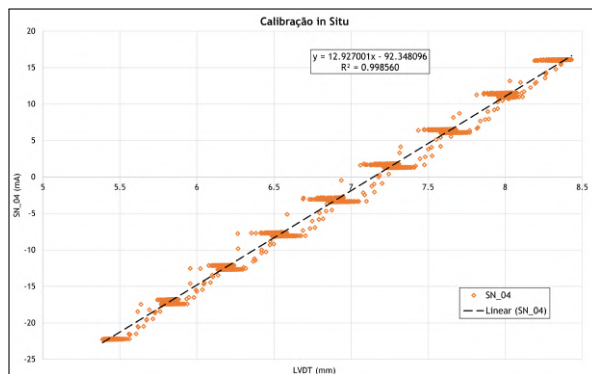


(b) Calibração *in situ*

Figura B.3: Calibração do sensor de nível SN_03
Fonte: Arêde et al. (2024)

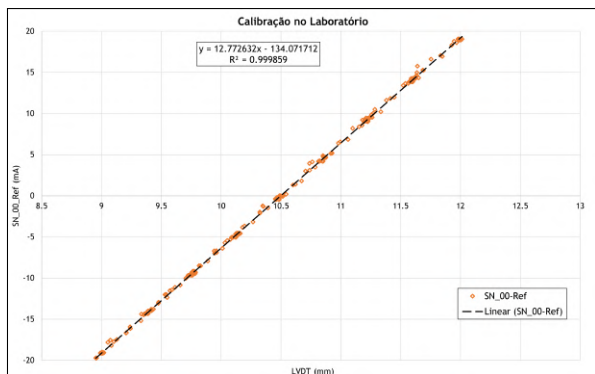


(a) Calibração no laboratório

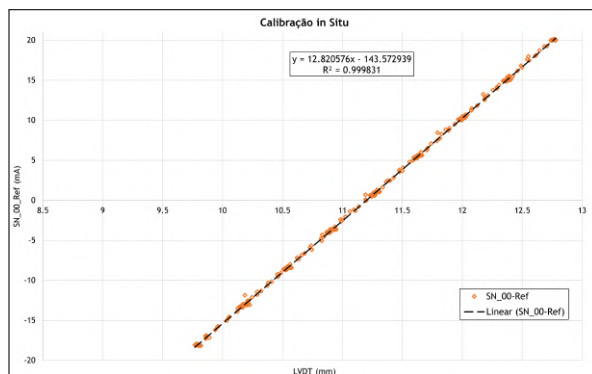


(b) Calibração *in situ*

Figura B.4: Calibração do sensor de nível SN_04
Fonte: Arêde et al. (2024)



(a) Calibração no laboratório



(b) Calibração *in situ*

Figura B.5: Calibração do sensor de nível SN_00_Ref
Fonte: Arêde et al. (2024)

ANEXO C

CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA

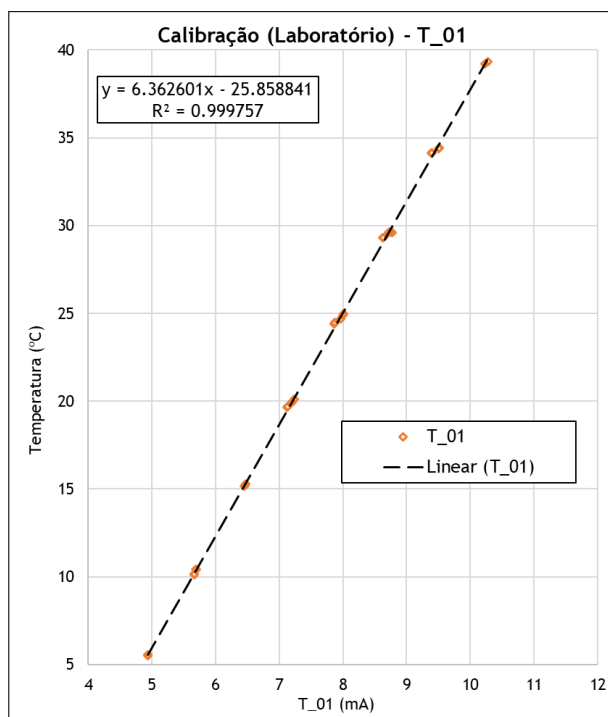


Figura C.1: Calibração do sensor de temperatura T_01
Fonte: Arêde et al. (2024)

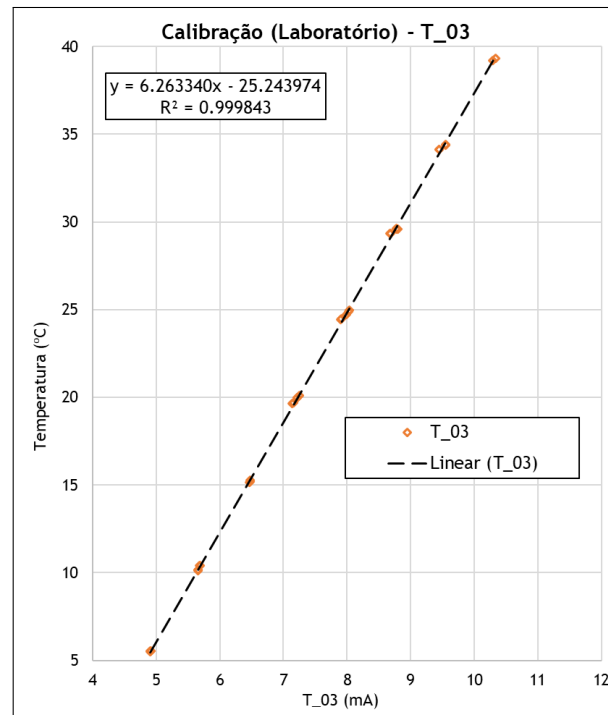


Figura C.2: Calibração do sensor de temperatura T_03
 Fonte: Arêde et al. (2024)

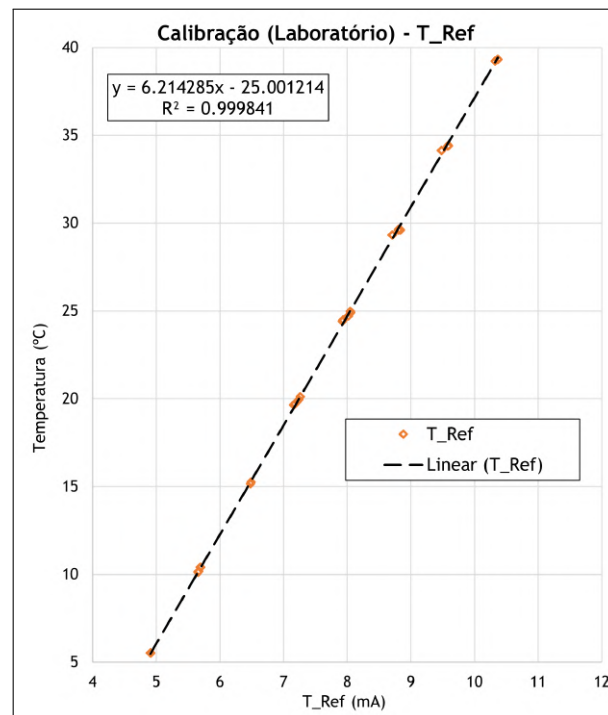


Figura C.3: Calibração do sensor de temperatura T_Ref
 Fonte: Arêde et al. (2024)