

MONITORIZAÇÃO DE UM MONUMENTO COM APOIO DE UM *DIGITAL TWIN*

EMANUEL ANTÓNIO SILVA FERREIRA

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

Orientador: Professor Doutor António José Coelho Dias Arede

Coorientador: Professor Doutor João Pedro da Silva Poças Martins

Responsável na Empresa: Doutor Luís Pedro Neves Sanhudo

JUNHO DE 2024

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2023/2024

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@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 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.

Aos meus,

“Success is the sum of small efforts, repeated day in and day out.”

Robert Collider

AGRADECIMENTOS

Escrever estas palavras é a forma que encontro para expressar o meu profundo agradecimento por tudo o que têm feito por mim ao longo dos anos. Sei que as palavras nunca serão suficientes para transmitir a gratidão que sinto, mas espero que compreendam o quanto são fundamentais na minha vida. Obrigado por me aceitarem como sou, com todas as minhas imperfeições e virtudes, por acreditarem em mim mesmo quando duvidei de mim. A confiança que depositaram em mim deu-me a força necessária para superar obstáculos e sempre procurar o melhor.

Primeiramente, quero expressar a minha profunda gratidão aos meus pais. Desde os primeiros passos até aos momentos mais desafiantes da minha jornada, vocês estiveram sempre ao meu lado, oferecendo amor, apoio e sabedoria. Agradeço por todas as noites sem dormir, por cada conselho dado, e por todas as vezes que me incentivaram a perseguir os meus sonhos. Vocês foram os meus primeiros mestres, ensinando-me o valor da honestidade, do trabalho árduo e da compaixão.

Da mesma forma, agradeço aos meus irmãos pela constante presença na minha vida, pelos conselhos sábios, pelas palavras de conforto nos momentos difíceis e pelas celebrações nas conquistas. Cada um de vocês possui qualidades únicas que admiro profundamente. Vocês ensinaram-me o valor da união e da compreensão. Sou eternamente grato por tudo o que fizeram e continuam a fazer por mim.

Aos meus amigos de Lousada, o meu sincero agradecimento pelas discussões enriquecedoras e pelo incentivo constante que me motivaram a avançar, por cada riso partilhado, por cada conselho dado, por cada palavra de apoio e por cada momento de silêncio reconfortante. Ter amigos como vocês faz toda a diferença. Vocês são a prova viva de que a verdadeira amizade existe e que é possível encontrar na vida pessoas que realmente se preocupam connosco.

Aos estimados colegas de Malins, o meu sincero agradecimento. A vossa calorosa receção na universidade e a vossa presença constante, tanto nos momentos de estudo intenso como nas pausas para recarregar energias, foram fundamentais para o meu sucesso ao longo destes últimos cinco anos na FEUP. A vossa amizade e apoio são um presente inestimável e valorizo cada momento que partilhamos juntos. Saibam que estarei sempre aqui para vocês, assim como vocês estiveram para mim.

Aos meus orientadores, António Arêde e João Poças, gostaria de expressar a minha imensa gratidão pelo apoio constante ao longo dos últimos meses. Agradeço pela partilha de conhecimentos, palavras de motivação e paciência, além da experiência enriquecedora de desenvolver uma dissertação que se destaca no campo da engenharia civil.

Por fim, mas não menos importante, não posso deixar de expressar o meu sincero reconhecimento ao Built CoLAB, que me acolheu durante este período, proporcionando-me assistência, tempo e valiosos ensinamentos. Agradeço a todos os colaboradores que, com a sua ajuda contínua, me fizeram sentir integrado. Foi uma honra desenvolver a tese nesta empresa. Um agradecimento especial aos engenheiros Luís Sanhudo, Vítor Cardoso, Hélder Silva e Débora Pinto, e ao Arquiteto/Músico/Programador Nuno Oliveira, pela generosa partilha de conhecimentos e pela constante disponibilidade em responder aos meus pedidos de ajuda, ajudando-me a superar muitos dos desafios que enfrentei.

A todos, o meu mais profundo e sincero obrigado.

RESUMO

Esta dissertação explora a aplicação do conceito de *Digital Twin* na monitorização de edifícios históricos, com o objetivo de aprimorar a preservação e manutenção desses patrimónios culturais. Um *Digital Twin* é uma replica virtual de um objeto físico, que permite a simulação e análise em tempo real.

O foco recai sobre o projeto de monitorização estrutural da Estação de São Bento, dado que, durante o período desta dissertação, está em curso o desenvolvimento da nova linha do Metro do Porto, que ligará a Casa da Música a São Bento. Propõe-se desenvolver um *Digital Twin* em ambiente web representativo do sistema de monitorização aplicado no monumento, permitindo a visualização dos dados adquiridos pelos sensores instalados de forma gráfica em tempo real, assim como o desenvolvimento de um modelo BIM da estação no *software* Revit, seguindo o plano de execução da Universidade da Pensilvânia e em consonância com as normas EN 17412-1, ISO 19650 e ISO 16739-1.

A metodologia envolveu a implementação do visualizador de modelos 3D e a integração dos dados dos sensores, através de componentes *open source*. O visualizador foi desenvolvido com a biblioteca da That Open Company, enquanto a integração dos dados foi realizada por meio de uma API desenvolvida pela própria base de dados para essa finalidade.

A implementação e o uso de *Digital Twins* representam um avanço significativo na monitorização de patrimónios históricos, providenciando uma abordagem inovadora em relação aos métodos tradicionais utilizados. Futuras pesquisas podem explorar a integração de tecnologias adicionais, como inteligência artificial, para aprimorar ainda mais a eficácia dos *Digital Twins* na conservação de edifícios históricos.

Além disso, a expansão do uso de *Digital Twins* para outros edifícios históricos e monumentos culturais pode ampliar os benefícios dessa abordagem, contribuindo para a preservação do património histórico construído de uma forma mais ampla.

PALAVRAS-CHAVE: *Digital Twin*, monitorização estrutural, BIM, *open source*

ABSTRACT

This dissertation explores the application of the Digital Twin concept to the monitoring of heritage buildings, with the aim of improving the preservation and maintenance of these cultural heritage sites. A Digital Twin is a virtual replica of a physical object, which allows it to be simulated and analysed in real time.

The focus is on the São Bento Station structural monitoring project, given that during the period of this dissertation the development of the new Metro do Porto line, which will connect Casa da Música to São Bento, is underway. The proposal is to develop a Digital Twin in a web environment that is representative of the monitoring system applied to the monument, allowing the data acquired by the installed sensors to be visualised graphically in real time, as well as the development of a BIM model of the station in Revit software, following the University of Pennsylvania's execution plan and in line with the EN 17412-1, ISO 19650 and ISO 16739-1 standards.

The methodology involved implementing the 3D model viewer and integrating sensor data using open source components. The viewer was developed using the That Open Company library, while data integration was carried out using an API developed by the database itself for this purpose.

It is concluded that the use of *Digital Twins* represents a significant advance in the monitoring of historical heritage sites, offering an innovative approach to the traditional methods used. Future research could explore the integration of additional technologies, such as artificial intelligence, to further improve the effectiveness of *Digital Twins* in the conservation of heritage buildings.

In addition, expanding the use of *Digital Twins* to other heritage buildings and cultural monuments could extend the benefits of this approach, contributing to the preservation of heritage sites around the world. The implementation and use of *Digital Twins* represents a significant advance in the monitoring of heritage buildings, providing an innovative approach to the traditional methods used. Future research may explore the integration of additional technologies, such as artificial intelligence, to further enhance the effectiveness of *Digital Twins* in the conservation of heritage buildings.

In addition, expanding the use of *Digital Twins* to other heritage buildings and cultural monuments could extend the benefits of this approach, contributing to the preservation of built heritage more broadly.

KEYWORDS: *Digital Twin*, monitoring, BIM

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO GERAL	1
1.2. MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS	2
1.3. METODOLOGIA	3
1.4. ORGANIZAÇÃO	5
2 ESTADO DA ARTE	7
2.1. MONITORIZAÇÃO DE EDIFÍCIOS HISTÓRICOS	7
2.1.1. INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO	8
2.1.2. MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL	10
2.1.2.1. Classificação dos métodos de SHM	10
2.1.2.2. Monitorização Local	11
2.1.2.3. Monitorização Global	12
2.1.3. SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO	12
2.1.4. IOT- <i>INTERNET DAS COISAS</i>	13
2.1.4.1. Aquisição - sistema de sensores	13
2.1.4.2. Transmissão - <i>Gateway</i>	14
2.1.4.3. Computação na Nuvem - Base de dados e Análise	14
2.1.4.4. Interpretação dos dados e Mensagem de alerta/Tomada decisão	14
2.1.5. CLASSIFICAÇÃO DO NÍVEL DOS SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO	14
2.2. BUILDING INFORMATION MODELING	15
2.2.1. CONCEITO	15
2.2.1.1. Usos BIM	17
2.2.1.2. ISO 19650	18
2.2.1.3. EN 17412-1, Level of Information Need	19
2.2.1.4. <i>Product Data Templates</i>	19
2.2.1.5. ISO 16739-1, <i>Industry Foundation Classes (IFC)</i>	20
2.2.2. O BIM NA CONSTRUÇÃO CIVIL	21
2.2.2.1. HBIM- Heritage Building Information Modeling	21
2.2.2.2. Tecnologias para realização de levantamentos	21
2.2.2.3. Caso exemplificativo	22
2.3. DIGITAL TWIN	23

2.3.1. CONCEITO	23
2.3.2. CLASSIFICAÇÃO DOS <i>DIGITAL TWINS</i>	24
2.3.2.1. Tipologia	24
2.3.2.2. Níveis de Integração	25
2.3.3. TECNOLOGIAS QUE APOIAM O <i>DIGITAL TWIN</i>	25
2.3.4. ÁREAS DE APLICAÇÃO E VANTAGENS	26
2.3.4.1. Na indústria	26
2.3.4.2. No setor da energia	26
2.3.4.3. Na Saúde	26
2.3.4.4. No transporte	27
2.3.4.5. Na Engenharia Civil e Construção	27
2.4. DO BIM AO <i>DIGITAL TWIN</i>.....	28
2.4.1. BASE DE DADOS	28
2.4.2. INTEGRAÇÃO IOT.....	29
2.4.2.1. Autodesk Platform Services.....	29
2.4.2.2. Bentley iTwin Plataforma	29
2.4.2.3. Microsoft Azure Digital Twin	29
2.4.2.4. Xeokit 3D	29
2.4.2.5. Three.js	30
2.4.2.6. Open BIM Components	30
2.5. SÍNTESE	30
3 CASO DE ESTUDO	31
3.1. ENQUADRAMENTO E OBJETO DE ESTUDO	31
3.1.1. ESTAÇÃO DE SÃO BENTO	31
3.2. METODOLOGIA DE MONITORIZAÇÃO.....	34
3.2.1. INSTRUMENTAÇÃO.....	34
3.2.1.1. Sensores de nível	35
3.2.1.2. Sensores de deslocamento	35
3.2.1.3. Clinómetros.....	36
3.2.1.4. Sensores de temperatura	36
3.2.1.5. Acelerómetro	37
3.2.1.6. Módulo de aquisição e registo de dados	37
3.2.1.7. Módulo de agregação de dados de saída (<i>Gateway</i>)	38
3.2.1.8. Router de transmissão remota de dados	38
3.2.2. ASPETOS GERAIS E ORGANIZAÇÃO	39
3.3. ARMAZENAMENTO E PROCESSAMENTO DE DADOS.....	41
3.3.1. INFLUXDB.....	42
3.3.2. GRAFANA.....	43

3.4. ELABORAÇÃO DO MODELO BIM	44
3.4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAS.....	44
3.4.2. MODELO DE TESTE.....	45
3.4.3. MODELO DEFINITIVO.....	49
4 DESENVOLVIMENTO DE UM DIGITAL TWIN.....	53
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	53
4.2. PROCEDIMENTO PARA A CRIAÇÃO DE UMA APLICAÇÃO.....	53
4.2.1. REQUISITOS E TAREFAS PRELIMINARES	53
4.2.2. CRIAÇÃO DE UM VISUALIZADOR DE MODELOS 3D.....	55
4.2.3. CONEXÃO COM A BASE DE DADOS	55
4.2.4. APRESENTAÇÃO DOS DADOS E INTERAÇÃO COM O MODELO.....	56
4.2.5. INTERAÇÃO COM O MODELO.....	56
4.2.6. ATUALIZAÇÃO DOS DADOS EM TEMPO REAL	58
4.2.7. ARQUITETURA E FUNCIONALIDADES DA APLICAÇÃO	58
4.2.8. ELABORAÇÃO DE TESTES	61
4.3. DISPONIBILIZAÇÃO DA APLICAÇÃO	64
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	65
5.1. CONCLUSÕES	65
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68
ANEXOS.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Fluxograma do trabalho realizado	3
Figura 2.1 - Patologias em Edifícios históricos, 1) Fissuras 2) Degradação 3) Crescimento de Fungos 4) Incendio 5) Infiltração de água 6) Deformação. Fonte:[2].....	7
Figura 2.2 – Classificação dos métodos SHM. Fonte: [4]	10
Figura 2.3- Sistema de monitorização. Fonte:[8]	13
Figura 2.4 – Níveis de classificação dos Sistemas Monitorização. Fonte: [9]	14
Figura 2.5 – Plataforma BIM Fonte:[12]	15
Figura 2.6 - Dimensões do BIM aceites. Fonte: [13]	16
Figura 2.7 - Plano de Execução do Projeto BIM. Fonte:[15].....	17
Figura 2.8 – Diferentes Usos BIM. Fonte: [15]	18
Figura 2.9 – Exemplo do formato IFC.	20
Figura 2.10 – Modelo 3D da Catedral de Notre-Dame, desenvolvido pela Autodesk. Fonte: [27]	22
Figura 2.11 – Conceito de <i>Digital Twin</i> Fonte: [29]	23
Figura 2.12 – Diferentes tipos de DT. Fonte: [29].....	24
Figura 2.13 – Classificação dos Níveis de DT. Fonte: [33]	25
Figura 3.1 – Fotografias aérea (à esquerda, Fonte: Google Earth) e terrestre (à direita, Fonte:[52]) da estrutura da Estação de São Bento.....	32
Figura 3.2 – Vista da Gare da estação à esquerda. Vista do vestíbulo à direita. Fonte:[54].....	32
Figura 3.3 - Mapa representativo do traçado da nova linha rosa. Fonte[56]	32
Figura 3.4 - Mapa representativo da distância entre a Estação e a Zona intervenção. Fonte[55]	33
Figura 3.5- Fotografia representativa da zona de intervenção.....	33
Figura 3.6 – Sensor de Nível.....	35
Figura 3.7 – Fissurómetro.....	35
Figura 3.8 – Clinómetro	36
Figura 3.9 - Transmissor e sonda de temperatura Pt100.....	36
Figura 3.10 - Nó acelerómetro.....	37
Figura 3.11 - Módulo de aquisição e registo de dados	37
Figura 3.12 - Módulo de agregação de dados de saída (<i>Gateway</i>)	38
Figura 3.13 - Router de transmissão remota de dados.....	38
Figura 3.14 - Zonas definidas para a arquitetura de monitorização.....	39
Figura 3.15 - Disposição dos níveis em altura de instalação dos sensores e respetiva localização	40
Figura 3.16 - Resumo das etapas percorridas pelos dados.....	41
Figura 3.17 - Interface da plataforma InfluxDB para filtrar os dados	42

Figura 3.18 - Painéis para visualização de dados configurados na aplicação Grafana	43
Figura 3.19 – Modelo BIM de testes	45
Figura 3.20 – Representação de um sensor no modelo de teste	46
Figura 3.21 – Exportação através do método do <i>Schedules</i>	47
Figura 3.22 – Modelo de teste importado no BIMvision.....	48
Figura 3.23 – Modelo BIM definitivo.....	49
Figura 3.24 - Modelo definitivo importado no BIMvision	49
Figura 3.25 – Lista de parâmetros atribuída ao sensor VB_3 e elemento simbólico representativo do tipo de sensor.....	50
Figura 4.1 – Resumo das etapas percorridas para a criação da plataforma web	54
Figura 4.2 – Lista de opções para a seleção do Time Range	56
Figura 4.3 – Fluxograma do processo realizado pelo código	57
Figura 4.4 – Lista de opções para o Refresh Rate	58
Figura 4.5 – Lista de funcionalidades da aplicação	58
Figura 4.6 - Settings	59
Figura 4.7 – Clipper	59
Figura 4.8 - IFC	60
Figura 4.9 – <i>Dashboards</i>	60
Figura 4.10 - Aplicação web com o modelo BIM.....	61
Figura 4.11 – Propriedades do sensor VB_2X importadas na aplicação	61
Figura 4.12 – Gráfico obtido na plataforma web desenvolvida	62
Figura 4.13 - Gráficos obtido no Grafana.....	62
Figura 4.14- Modelo com diferentes planos de corte.....	63
Figura 4.15 – Modelo com diferente iluminação e cor de fundo	63

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de sensores presentes no sistema de monitorização	34
Tabela 2 - Lista de parâmetros para cada tipo de família criada	52

GLOSSÁRIO E ABREVIATURAS

FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
SHM	Structural Health Monitoring (Monitorização da Integridade Estrutural)
IoT	<i>Internet of Things</i> (<i>Internet das Coisas</i>)
BIM	<i>Building Information Modeling</i> (Modelação de Informação da Construção)
2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
AECO	Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação
ISO	International Organization for Standardization (Organização Internacional de Normalização)
PDT	<i>Product Data Template</i> (Normalização de Dados do Produto)
NBS	Nacional BIM Specification
IFC	Industry Foundation Classes
HBIM	<i>Heritage Building Information Modeling</i>
DT	<i>Digital Twin</i> (Gémeo Digital)
PLM	<i>Product Lifecycle Management</i> (Gestão do Ciclo de Vida de um Produto)
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
DTP	<i>Digital Twin Prototype</i> (Protótipo de Gémeo Digital)
DTA	<i>Digital Twin Aggregate</i> (Agregado de Gémeo Digital)
DTI	<i>Digital Twin Instance</i> (Instância de Gémeo Digital)
VR	<i>Virtual Reality</i> (Realidade Virtual)
AR	<i>Augmented Reality</i> (Realidade Aumentada)
DB	<i>Data Base</i> (Base de Dados)
AI	<i>Artificial Intelligence</i> (Inteligência Artificial)
API	<i>Application Programming Interface</i> (Interface de Programação de Aplicações)
URL	<i>Uniform Resource Locator</i>
VPN	<i>Virtual Private Network</i> (Rede virtual privada)
VSC	Visual Studio Code
HMR	<i>Hot Module Replacement</i>

1 INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

Com o passar dos anos, a engenharia civil tem vindo a implementar novas tecnologias para incrementar a eficiência, fiabilidade e automatização de processos.

O foco da presente dissertação recai sobre um conjunto de novas funcionalidades, no contexto da monitorização de estruturas, que possibilitam a criação de um *Digital Twin* (DT) para a visualização de dados em tempo real inseridos num modelo de *Building Information Modeling* (BIM), representativo de um edifício histórico localizado na cidade do Porto, concretamente a Estação Ferroviária de São Bento.

Os dados são obtidos através de sensores previamente colocados em pontos estratégicos do edifício, conectados a uma base de dados onde são processados e armazenados. O modelo virtual, representativo do edifício da estação de São Bento, foi construído utilizando um programa de modelação BIM com recurso a fotografias, plantas e nuvens de pontos. Para que a integração dos dados no modelo seja feita de forma eficaz e eficiente, a programação desempenha um papel crucial.

No contexto da consolidação e demonstração do conhecimento adquirido ao longo do percurso académico, esta dissertação está centrada na forma de explorar e ilustrar os resultados da monitorização estrutural, através da criação de uma aplicação web para visualização de dados em tempo real integrados num modelo 3D, por outras palavras a criação de um gémeo digital.

Perante a necessidade de compreender diferentes áreas transversais da engenharia civil, como a obtenção e processamento de dados, modelação e programação, a presente dissertação foi desenvolvida em colaboração com o Built CoLAB, uma empresa que visa o desenvolvimento setor da construção.

Esta dissertação surge em paralelo com um trabalho de estudo do comportamento estrutural de quatro edifícios históricos na envolvente da construção da nova linha rosa do Metro do Porto, troço Casa da Música/São Bento. Solicitado pela Metro do Porto à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, o desenvolvimento deste trabalho conta com a colaboração de uma equipa de técnicos do Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LE-FEUP), sob a liderança do orientador principal desta dissertação, que é o responsável pela instalação, manutenção, gestão e exploração dos sistemas de monitorização.

A adjudicação ocorreu em janeiro de 2021 e inclui a monitorização de alguns locais da Estação de São Bento, em particular a fachada principal. Foi montado um sistema elétrico para a monitorização, que se encontra em funcionamento desde novembro de 2022, com vista ao registo de possíveis movimentos estruturais. Até final de 2022 o sistema esteve em validação, tendo-se iniciado o período efetivo de monitorização no início de 2023.

1.2. MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho é desenvolver uma aplicação web que permita a qualquer utilizador visualizar em tempo real, os parâmetros medidos através dos sensores instalados num edifício sob monitorização.

Vinculado com o objetivo principal, existem alguns objetivos secundários como o de criar um modelo 3D da estação de São Bento, de acordo com a norma ISO 19650, ISO 19739-1 e EN 17412-1, sendo que estas estão relacionadas com a quantidade de informação que os modelos devem conter assim como a forma que esta deve ser exportada. Outro objetivo secundário é garantir que a aplicação seja de fácil acesso, evitando esforços de compreensão e interpretação, independentemente do nível de conhecimento do utilizador sobre o funcionamento da estrutura. Além disso, os dispositivos modelados correspondentes aos sensores instalados terão de ser facilmente visualizados, sendo que os dados devem ser apresentados em tempo real ao utilizador, a visualização destes deve ser feita através de gráficos visto que facilitam a compreensão e a análise de informações complexas de forma visual e eficaz. Outra intenção é disponibilizar a aplicação num repositório online para assegurar que qualquer pessoa possa visualizar, contribuir e sugerir melhorias ao código, assegurando a evolução contínua do projeto.

Para complementar o desenvolvimento de uma ferramenta deste tipo, é importante identificar as vantagens para manutenção de edifícios em comparação com métodos mais tradicionais e explorar oportunidades de desenvolvimento adicionais para o futuro. Para tal, aborda-se e descreve-se o ponto atual de desenvolvimento e utilização dos *Digital Twins*.

Contudo o trabalho está condicionado pelo tempo disponível para a realização do projeto e pelas capacidades dos meios envolvidos. Apesar do alvo ser concreto, as formas como será materializado podem depender essencialmente de quais são as melhores soluções entre as várias estudadas e testadas. Desta forma, ao longo do procedimento, vão sendo realizados testes para avaliar o processo realizado e as soluções adotadas.

De uma forma sintetizada, os objetivos são os seguintes:

- Criar um modelo 3D do edifício a partir dos levantamentos.
- Desenvolver um ambiente web que reproduza fielmente o modelo 3D criado e que crie uma ligação entre a base de dados e o modelo.
- Garantir que os dados armazenados são fielmente representados no *Digital Twin*
- Disponibilizar a plataforma criada num repositório para desenvolvimentos adicionais.
- Avaliar a viabilidade de realizar o processo de criação de um *Digital Twin* para monitorização em comparação com métodos mais tradicionais;

1.3.METODOLOGIA

O processo de criação de um DT pode ser dividido em etapas distintas de acordo com aqueles que são os objetivos apresentados no subcapítulo anterior, 1.2. Cada etapa possui propósitos específicos que em conjunto contribuem para o objetivo de desenvolver de um *Digital Twin*.

Apresenta-se de seguida na Figura 1.1 um fluxograma de trabalhos com aquele que foi o procedimento geral de realização de tarefas ao longo dos meses de desenvolvimento desta dissertação.

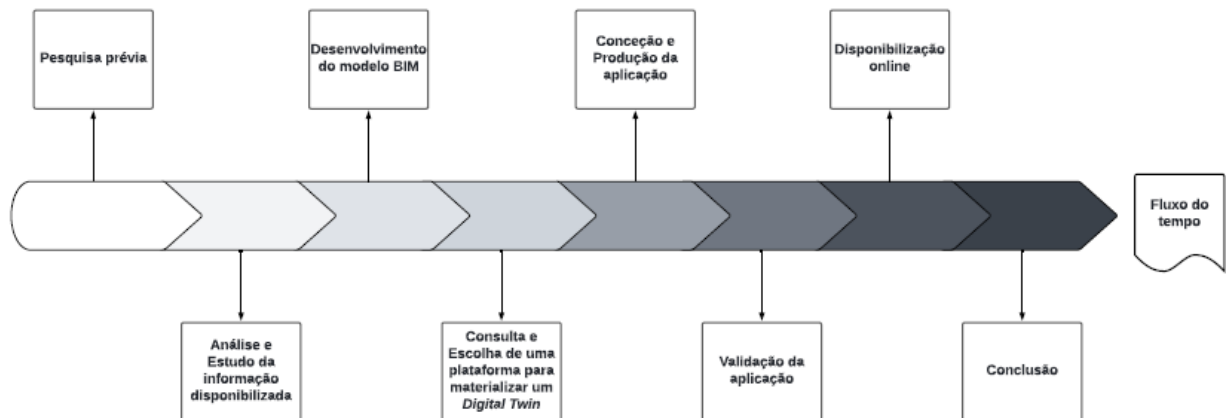


Figura 1.1 - Fluxograma do trabalho realizado

- **Pesquisa prévia:** dado que muitos dos conceitos são relativamente novos e não são abordados no percurso académico de um estudante de Mestrado em Engenharia Civil na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Tal pesquisa correu ao longo de todo o processo de desenvolvimento desta dissertação.
- **Análise e Estudo da informação disponibilizada:** dado que este projeto já se encontrava em curso muito antes da realização desta dissertação, muitas informações e processos já se encontravam realizados, incluindo a seleção do sistema de monitorização, tanto do tipo sensores como Base de Dados, modelos AutoCAD 3D, plantas e fotografias.
- **Desenvolvimento do modelo BIM:** em Revit da estação, de acordo o processo da Universidade da Pensilvânia relativamente à implementação do BIM em projetos seguindo as normas Internacionais e Europeias. Além disso, realização de testes de exportação em formato IFC (Industry Foundation Classes) para garantir implementação do modelo 3D na plataforma.
- **Consulta e Escolha de uma plataforma para desenvolver um *Digital Twin*:** realizou-se uma pesquisa sobre as ferramentas disponíveis no mercado perante alguns critérios, importação de Modelos em formato IFC, código aberto para implementação de novas funcionalidades e funcionalidades disponíveis para interação com o modelo.
- **Conceção e Produção da aplicação:** a aplicação desenvolvida deve produzir fielmente o modelo 3D criado e proporcionar uma interface intuitiva para os utilizadores, independentemente do conhecimento prévio sobre o funcionamento de tal.
- **Validação da aplicação:** foi realizada uma comparação sistemática entre os gráficos da aplicação desenvolvida e os *dashboards* do Grafana, ferramenta utilizada pela equipa de monitorização para visualizar os dados dos sensores. Além da validação dos dados, foi realizada

uma comparação entre o modelo 3D da estação no *software* Revit e a sua representação na aplicação.

- **Disponibilização online:** após tudo o processo dar-se por terminado, deverá ser criado um repositório online para promover a colaboração aberta e garantir a evolução continua do projeto através de contribuições e feedback da comunidade.
- **Conclusão,** realizar uma análise crítica dos resultados alcançados, identificar possíveis melhorias e sugerir futuras direções de pesquisa e desenvolvimento.

1.4. ORGANIZAÇÃO

No que diz respeito à organização do documento, esta dissertação começa com o presente capítulo de “Introdução”, que oferece uma visão global sobre o tema do desenvolvimento e a organização dos trabalhos. Adicionalmente, o capítulo apresenta ainda os objetivos e as contribuições que se pretende alcançar com a dissertação.

O capítulo seguinte é o “Estado da Arte”, onde é apresentada a literatura a destacar face aos temas abordados ao longo do documento. Este capítulo serve de introdução e contextualização dos tópicos gerais, mas essenciais à criação de um DT, apresentando uma abordagem abrangente que possibilita a transição natural para o capítulo seguinte, na qual é realizada uma análise mais precisa e focada no caso em questão.

De facto, o terceiro capítulo contextualiza o caso de estudo que serve como base necessária para, em conjunto com os temas discutidos no Estado da Arte, avançar com o processo de criação de um DT. Neste capítulo apresenta o edifício em análise e justifica o motivo de ser realizada uma monitorização, bem como o sistema utilizado para cumprir este propósito, desde a medição dos dados até ao processamento e armazenamento dos mesmos. De forma paralela, é descrito o processo para criação de um modelo BIM. Inicialmente, é explicado o processo de criação de um modelo virtual simplificado para fins de teste, seguido da elaboração de uma versão definitiva utilizando o *software* Autodesk Revit e a sua exportação para formato aberto IFC.

No quarto capítulo, inicia-se o processo de criação de um DT. Nesta fase é demonstrado o procedimento para desenvolvimento da plataforma web, assim como se realiza a interação com o modelo BIM com os dados medidos nos sensores. É abordada a forma como foi selecionada uma alternativa para a disponibilização e apresentação do DT e, por fim, apresenta-se os resultados obtidos nos testes de validação.

Finalmente, no quinto capítulo, são retiradas conclusões, são resumidos os resultados e contribuições do trabalho realizado e são identificados possíveis desenvolvimentos para futuro.

2 ESTADO DA ARTE

2.1. MONITORIZAÇÃO DE EDIFÍCIOS HISTÓRICOS

A conservação e preservação de edifícios históricos desempenha um papel importante no desenvolvimento económico de um país, pois representam memórias do passado, cultura de um local ou país. Estes marcos alimentam a economia gerando receitas substanciais através do turismo, conseguindo atrair turistas proporciona meios de subsistência a vários setores como por exemplo comércio, hotelaria e gastronomia.

Com o passar dos anos os edifícios históricos enfrentam um declínio gradual no seu desempenho estrutural devido a ações externas como chuvas, ventos fortes, incêndios, inundações ou até ataques de terrorismo e vandalismo, levando à formação de fissuras, deformações, degradação dos materiais, infiltração de água e crescimento de fungos e bolores (Figura 2.1).

Se não tratados corretamente, estes problemas podem agravar-se com o passar do tempo, causando danos à estética da estrutura reduzindo notoriedade perante os-turistas ou até mesmo reduzido a capacidade de carga da estrutura, podendo levá-la ao colapso. Dai a importância da manutenção e da reparação [1].

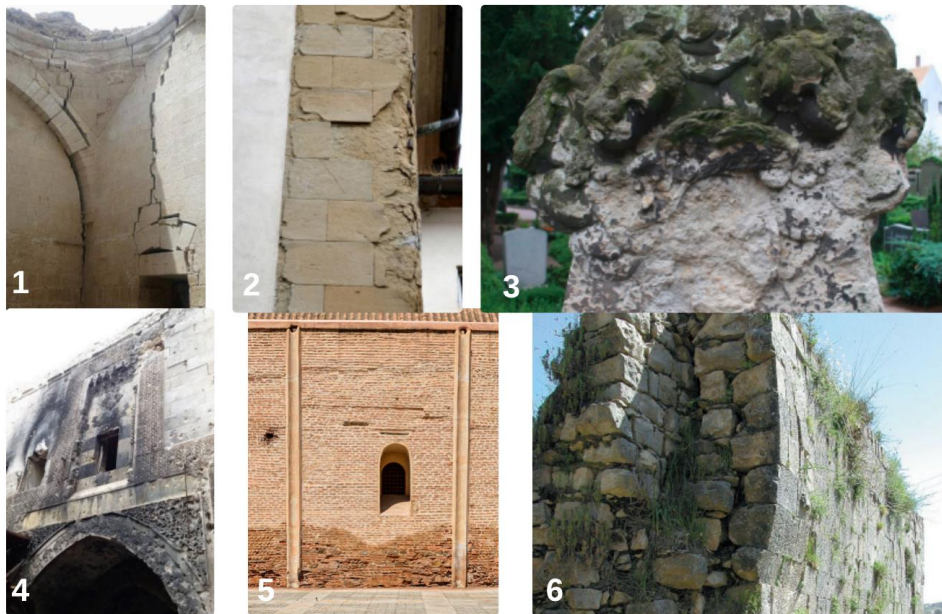


Figura 2.1 - Patologias em Edifícios históricos, 1) Fissuras 2) Degradação 3) Crescimento de Fungos 4) Incendio 5) Infiltração de água 6) Deformação. Fonte:[2]

2.1.1.INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO

Dependendo do grau de envolvimento, pode tornar-se difícil identificar de forma rápida e clara em que situação se encontram as estruturas do património histórico, quer a nível de segurança quer a nível de intervenção efetiva de reabilitação ou reforço estrutural. Devido ao conhecimento limitado dos métodos de construção utilizados e à quantidade de diferentes materiais usados, às complexidades geométricas e à falta de conhecimento dos acontecimentos do passado que geraram danos, à falta inspeção e de diagnóstico do património, é fundamental especificar claramente os aspetos que devem ser avaliados.

Especificação do tipo de aspetos a serem avaliados [3]:

- A delimitação geométrica da construção com o recurso à topografia, fotogrametria e/ou aproveitamento de plantas prévias, possibilita a obtenção da geometria completa do edifício, a fim de se realizar uma análise cuidada que de certa forma identifica eventuais irregularidades, como desvios verticais e horizontais da estrutura.
- Pesquisa histórica e identificação de funcionalidade atual e passada da construção. O acesso ao projeto inicial, métodos e fases de construção, bem como as características dos materiais empregados e as intervenções estruturais ocorridas durante ou após a fase de construção, são cruciais para determinar o comportamento estrutural atual e permitem direcionar de forma mais precisa as investigações mais detalhadas.
- Estabelecimento dos esquemas de funcionamento estrutural em vigor no momento, eventualmente abrangendo também os paradigmas adotados em períodos anteriores.
- Identificação dos elementos estruturais chave que apresentam um papel importante para o funcionamento da estrutura.
- Reconhecimento de todas as patologias, com foco especial nas relacionadas com a estrutura, seguido pela criação de registo fotográfico minucioso e devidamente mapeado nos desenhos de engenharia da construção.
- A especificação de eventuais testes a realizar para caracterização dos materiais e da estrutura, abrangendo também os elementos das fundações, requer a coleta de amostras para análise laboratorial ou a realização de ensaios não-destrutivos (ou até ligeiramente destrutivos) *in-situ*, com a finalidade fundamental de determinar as propriedades físicas e mecânicas do material, além de eventual identificação e ajuste das relações constitutivas(ou leis de comportamento) a serem empregadas nos modelos estruturais.
- Identificação e estabelecimento de modelos estruturais adequados, concebidos para avaliar o estado atual da estrutura, simular a resposta da estrutura a condições ainda não experimentadas ou antecipação da resposta estrutural face a efeitos derivados de intervenções de reabilitação e/ou reforço. Estes modelos, são construídos com base em formulações teóricas de comportamento estrutural em conjunto com a observação direta da estrutura e os dados obtidos através dos ensaios experimentais, caso tenham sido realizados.

De acordo com [3] a seqüências de procedimentos a adotar durante a intervenção a um edifício é a seguinte:

Numa fase inicial, fazer uma visita ao local do edifício e à sua envolvente, por meio fotográfico fazer um registo dos danos sendo, se possível, contactar população local de modo a recolher informações sobre a evolução dos danos, acontecimentos importantes que marcaram essa evolução e medidas interventivas anteriormente adotadas.

Posteriormente, realizar-se a compilação da informação recolhida em um Mapa de Danos. Além de registar os danos observados, este documento também apresenta detalhes sobre a composição e o estado atual, juntamente com uma análise de possíveis causas e medidas de prevenção e reparação a adotar.

Em primeira análise, através deste levantamento prévio, é viável identificar a urgência de uma intervenção imediata em situações de risco iminente de colapso. Sugere-se, neste caso, medidas de estabilização temporária da estrutura de forma a eliminar qualquer ameaça à segurança das pessoas. Adicionalmente, este levantamento permite detetar a necessidade de substituição ou de reabilitação, se possível, de materiais e elementos estruturais.

Em seguida, acompanhado por equipamentos de controlo, sensores, estuda-se meios de prevenção ou de reparação dos danos. A utilização deste equipamento permite perceber se os danos estão estabilizados ou se pelo contrário se apresentam em evolução no tempo. Se houver uma evolução dos danos ao longo do tempo, é essencial realizar uma análise detalhada sobre sua ocorrência e identificar medidas para interromper a sua progressão, visando a estabilização. Em situações extremas, ensaios in-situ ou em laboratório devem ser realizados para avaliar com precisão o estado real dos elementos. As soluções de reparação são cuidadosamente examinadas quer por via laboratorial quer por simulações numéricas em computadores antes de serem implementadas.

2.1.2.MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL

A monitorização do estado (ou da condição) estrutural de construções, em inglês *Structural Health Monitoring* (SHM), constitui uma ferramenta útil para garantir a integridade e a segurança das infraestruturas. Esta abordagem é crucial devido à progressiva deterioração do desempenho estrutural das construções de engenharia civil ao longo do tempo. Portanto, destaca-se a urgência da monitorização e avaliação contínuas das condições das infraestruturas, permitindo não apenas a deteção precoce de danos nas etapas iniciais da sua vida útil, mas também viabiliza o acompanhamento de fatores que possam desencadear danos futuros. Esse processo resulta na extensão da vida útil das estruturas e na antecipação da manutenção, o que conseqüentemente reduz os custos associados à eventual reconstrução.

2.1.2.1.Classificação dos métodos de SHM

De um modo geral, os métodos SHM são classificados pelos seus níveis de aplicação em locais e globais (Figura 2.2). Nos métodos locais utiliza-se técnicas não destrutivos para diagnosticar a estrutura; já nos métodos globais são utilizados sensores para identificar o comportamento dinâmico e estático de toda a estrutura [4].

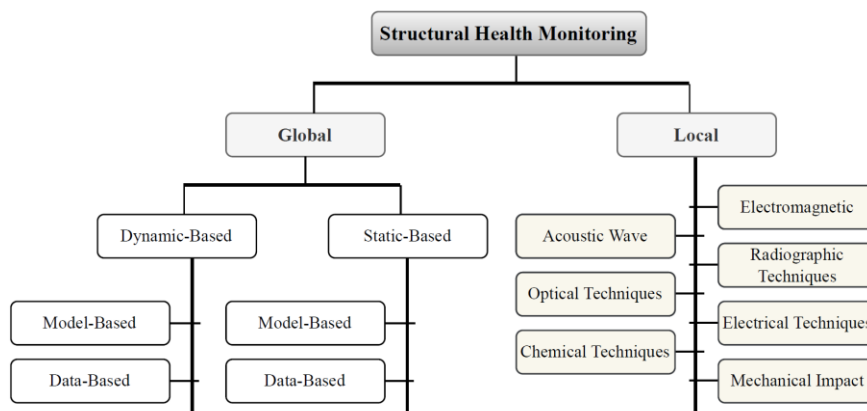


Figura 2.2 – Classificação dos métodos SHM. Fonte: [4]

2.1.2.2. Monitorização Local

Para ser feita esta avaliação estrutural local, tal como referido em cima, são realizados ensaios experimentais de modo a permitir quantificar as características físicas e mecânicas mais importantes para a avaliação do comportamento estrutural.

Em estruturas as técnicas de ensaio apresentam-se classificadas como destrutivas, semi-destrutivas ou ligeiramente destrutivas e não-destrutivas. Uma vez que o objeto em causa é de carácter do património histórico e cultural, as técnicas de ensaio não poderão ser do tipo destrutiva [3, 5].

Ensaio/Técnicas não-destrutivos, estes ensaios destacam-se pela não utilização de métodos invasivos ou destrutivos no elemento em análise, o que permite a obtenção de parâmetros qualitativos para descrever o comportamento dos elementos estruturais. Além disso, possibilitam a deteção de anomalias não visíveis. Os principais ensaios não-destrutivos são:

- Ensaio Sónicos
- Tomografia sónica
- Ensaio de radar
- Ensaio dinâmicos
- Termografia
- Estetoscopia

Ensaio/Técnicas ligeiramente destrutivos, estes ensaios resultam em pequenas perturbações nos elementos examinados, pequenos furos ou aberturas. No entanto, essas intervenções oferecem uma análise mais exata e minuciosa do conteúdo interno, em contraste com os testes não-destrutivos. Como por exemplo:

- Macacos planos (Flat-Jack)
- Dilatómetro
- Humidade superficial
- Inspeção com câmara boroscópica
- Arrancamento

Ensaio/Técnicas destrutivos, estes ensaios permitem observar o interior do elemento por completo, como já dito anteriormente devem ser evitados em edifícios históricos, pois tem uma ação bastante intrusiva com os elementos examinados. Destacam-se:

- Extração de carotes
- Arrancamento de varões previamente selados nas paredes

Apesar da eficácia demonstrada pelos métodos de monitorização estrutural Local na deteção e localização de danos, é importante reconhecer as limitações e as desvantagens. Uma das principais desvantagens destas técnicas é a dependências de um estudo prévio ao edificado para se obter uma estimativa aproximada da localização dos danos, requisito fundamental para a realização efetiva do processo de avaliação. Além disso, é importante destacar que, em diversos casos, o acesso à parte inferior do edifício, especialmente às fundações, é uma condição essencial para a realização de uma

avaliação estrutural completa. No entanto, essa acessibilidade nem sempre é garantida, o que pode comprometer a eficácia das técnicas de monitorização [3, 5].

2.1.2.3. Monitorização Global

Dentro da monitorização global existem duas abordagens principais, estáticas e dinâmicas. Os métodos dinâmicos baseiam-se nas características de vibração (Frequências e modos de vibração) da estrutura como um meio para deduzir o estado em que as estruturas se encontram. Enquanto os métodos estáticos baseiam-se na medição da alteração resposta estática da estrutura, como flexão, deformação, rigidez e capacidade de carga(resistência) [6].

Por sua vez, podem ser segmentadas em métodos baseados em modelos e métodos baseados em dados. As metodologias baseadas em dados fundamentam-se exclusivamente em informações obtidas a partir de sistemas de monitorização, sensores, combinadas com algoritmos analíticos para avaliar a condição estrutural e antecipar a evolução de cenários de danos ao longo do tempo ou o momento de uma possível falha. Por outro lado, os métodos baseados em modelos implicam a solução inversa do problema, que envolve em criar um modelo teórico da estrutura, que represente o estado “saudável” da mesma. Em seguida, fazer uma comparação entre os valores medidos pelos sensores e as previsões do modelo teórico.

Os desafios fundamentais enfrentados pelos métodos de deteção de danos globais residem no desenvolvimento de abordagens que sejam estáveis face a flutuações nas condições ambientais como vento, temperatura e humidade e condições operacionais, bem como a falta de sensibilidade adequada para detetar danos de pequena magnitude [4].

2.1.3. SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO

Primeiramente, é necessário estabelecer uma distinção entre Monitorização e Sistema de Monitorização. De forma clara e simples, Monitorização refere-se ao processo de análise dos dados monitorizados, enquanto os sistemas de monitorização são os dispositivos físicos usados para efetuar essa análise.

Inicialmente, durante a década 1970, os sistemas de SHM foram utilizados para monitorizar estruturas de grande porte e elementos de instalações industriais, de modo a garantir a durabilidade dessas estruturas ao longo do tempo. Apenas mais tarde é que esses sistemas SHM foram direcionados para a monitorização de estruturas civis de forma mais ampla.

A nova geração de sistemas de monitorização baseados na *Internet* das coisas (IoT) incorpora na sua estrutura sensores inteligentes. Esses dispositivos não apenas realizam a aquisição dos sinais medidos, mas também permite que sejam processados e transmitidos através da *Internet*. Apresentam um elevado potencial para aplicações de monitorização de edifícios graças aos baixo custo dos dispositivos e energia, ao tamanho reduzido, à elevada conectividade e à capacidade de computação autónoma sem interação humana[7].

2.1.4. IOT-INTERNET DAS COISAS

O conceito de *Internet* das coisas (IoT) introduz uma abordagem inovadora à *Internet*, tendo sido concebida pela primeira vez por Kelvin Ashton em 1999. Em sua essência, a IoT é caracterizada pela capacidade de conectar objetos comuns do dia a dia por meio de tecnologias de comunicação sem fio, *wireless*, estabelecendo um canal de comunicação entre esses objetos e a vasta rede da *Internet*, formando, assim, uma plataforma destinada a facilitar a realização de diversas atividades e operações.

Nesta perspetiva, um sistema de monitorização derivado da IoT é composto, primordialmente, por cinco conceitos essenciais, apresentados na Figura 2.3 [8]:



Figura 2.3- Sistema de monitorização. Fonte:[8]

A rede de sensores é responsável por fazer a captação dos dados, os quais são transmitidos por um sistema de transmissão até uma base de dados, onde são tratados de acordo com a programação estabelecida e, posteriormente, armazenados. Após esse procedimento, cabe à equipa técnica realizar uma análise cuidadosa antes de tomar decisões.

2.1.4.1. Aquisição - sistema de sensores

O sistema de sensores representa uma componente fundamental no sistema de monitorização, é composto por dois componentes, sensores e o sistema de aquisição de dados, o sensor é responsável pela coleta de dados relativos a uma variedade de parâmetros, tais como deslocamentos, rotações, deformações e acelerações, que frequentemente constituem os parâmetros mais requisitados. O microprocessador representa um componente eletrónico vital na execução de tarefas computacionais, as quais se resumem nas operações lógicas ou aritméticas envolvendo unidades elementares de informação, denominadas *bits*.

É essencial que a seleção desses sensores seja cuidadosamente realizada, levando em consideração uma série de critérios pré-determinados, garantindo, assim, a eficácia e confiabilidade da análise. De entre esses critérios, destacam-se o intervalo de medição, abrangendo os valores máximos e mínimos a serem registados, a precisão almejada, a estabilidade das medições realizadas, as condições ambientais pertinentes e a localização específica do sistema de monitorização.

2.1.4.2. Transmissão - Gateway

Através da utilização de uma *Gateway* ou módulo de agregação de dados de saída, os sensores e dispositivos podem estabelecer uma comunicação com uma base de dados para fins de processamento subsequentes. Antes de serem enviados, os dados são sujeitos a operações de processamento, filtragem e compressão, com objetivo de otimizar a capacidade de armazenamento e a redução da latência.

2.1.4.3. Computação na Nuvem - Base de dados e Análise

A Computação na Nuvem é uma abordagem na qual servidores remotos desempenham funções análogas às de um centro de dados, encarregando-se de tarefas como armazenamento, análise e processamento dados através de conexões via *Internet*.

2.1.4.4. Interpretação dos dados e Mensagem de alerta/Tomada decisão

Após a conclusão das etapas precedentes, torna-se viável formular uma visão abrangente e substancial dos resultados obtidos. O sistema pode ser configurado de forma a emitir um alerta quando um valor exceder o limite estabelecido, a fim de viabilizar a adoção de uma medida apropriada.

2.1.5. CLASSIFICAÇÃO DO NÍVEL DOS SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO

O nível de monitorização é importante para a escolha dos sensores a serem utilizados. Devido à estrutura estar sujeita a ações e à degradação dos materiais, o nível de monitorização deverá ser escolhido pelos técnicos ou utilizadores de acordo com as necessidades requeridas, os níveis encontram-se distribuídos da seguinte forma [9]:

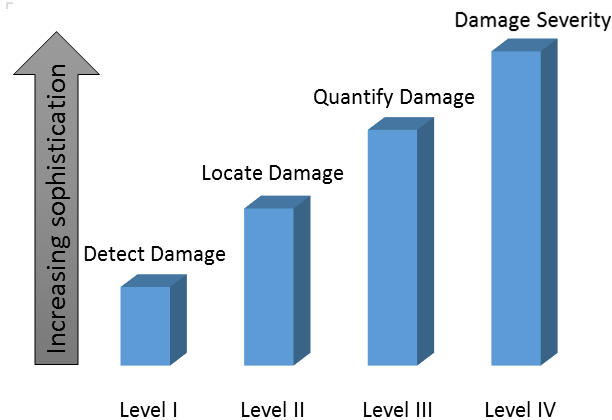


Figura 2.4 – Níveis de classificação dos Sistemas Monitorização. Fonte: [9]

No nível 1, a capacidade do sistema de monitorização está restrita à deteção de danos, enquanto no nível 2, além de detetar, o sistema também é capaz de localizar os danos. Avançando para o nível 3, o sistema adquire a capacidade de quantificar os danos. Por último, no nível 4, o sistema é capaz de realizar uma avaliação completa da segurança da estrutura e determinar a necessidade de operações de manutenção.

A instalação de sistemas de monitorização é frequentemente considerada muito dispendiosa, devido a diversos fatores, principalmente pela complexidade e os custos envolvidos na instalação dos sensores e na aquisição de dados. Além disso, a precisão na localização dos danos pode ser comprometida devido ao número total de sensores instalados.

2.2. BUILDING INFORMATION MODELING

2.2.1. CONCEITO

O Building Information Modeling, ou BIM, tem causado uma revolução no setor arquitetura, engenharia, construção e operação (AECO), fornecendo uma representação digital de edifícios e infraestruturas. Esta tecnologia possibilita a criação e gestão de informações durante as fases de planeamento, projeto, construção e funcionamento, seja em projetos de construção ou produtos industriais [10].

As informações são divididas em dois grupos principais: geométricas, que incluem as dimensões e a posição dos componentes da construção, como por exemplo pisos, pilares e vigas, e as não geométricas que fornecem detalhes adicionais sobre os componentes instalados, como por exemplo fabricante, custos, planeamento de aplicação, entre outros.

O BIM não é apenas um modelo completo que contém todas as informações do projeto, este incentiva a colaboração entre departamentos e partes interessadas, permitindo que todos os profissionais envolvidos possam trabalhar no mesmo projeto em tempo real, partilhando a informação entre eles (Figura 2.5). A implementação do BIM oferece uma visão global do projeto, ajudando as partes interessadas a tomar decisões, reduzir riscos e aumentar a eficiência, trazendo benefícios económicos significativos. As equipas de projeto podem reduzir custos de conceção e produção, enquanto os empreiteiros melhoram a coordenação do fornecimento e a estimativa dos custos. Os Investidores, por sua vez, conseguem calcular com precisão os prazos de construção e as operações de manutenção, beneficiando-se de uma gestão e supervisão mais baratas, projetos otimizados e tempo de construção reduzido. Além disso, facilita a identificação de conflitos entre as várias disciplinas, melhorando a harmonização do projeto [11].

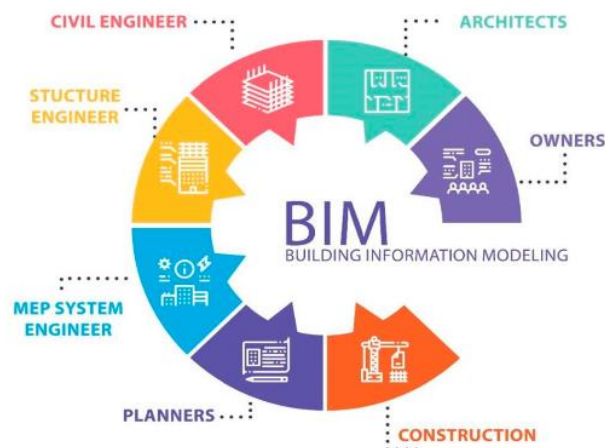


Figura 2.5 – Plataforma BIM Fonte:[12]

Assim como um edifício real, composto por diversas camadas, componentes e dimensões, o modelo BIM também incorpora múltiplas camadas de informação. A estas camadas lhe é dado o nome de dimensões BIM, que abrangem desde os componentes físicos visíveis, com paredes e pavimentos, até informações como calendário, custo e operações. Embora esta divisão por dimensões tenda a ser substituída pelo conceito de Usos BIM, a apresentar no subcapítulo seguinte, continua a ser muito comum recorrer-se a esta classificação em documentos técnicos e científicos. Atualmente segundo a documentação da Autodesk [13] existe um consenso mundial sobre as primeiras 3 dimensões (Figura 2.6).

- 3D- Permite criar e visualizar a conceção do projeto, incluindo não apenas a geometria, mas também as propriedades físicas. Além disso, desempenha um papel fundamental na deteção de conflitos.
- 4D- Adiciona à dimensão anterior a dimensão do tempo, permitindo aos utilizadores observar a sequência da construção e planear o projeto de maneira mais eficiente. Facilita problemas de gestão do calendário de construção.
- 5D- integra informações de estimativa e custo diretamente no modelo, fornecendo uma visão clara das despesas relacionadas. É uma ferramenta essencial para automatizar o cálculo de custos com base em materiais, mão de obra e outros recursos.

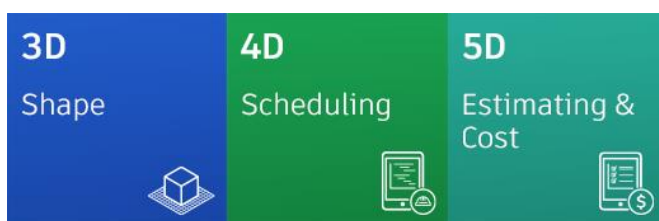


Figura 2.6 - Dimensões do BIM aceites. Fonte: [13]

- Dada a ausência de consenso internacional para além da quinta dimensão, surgem alguns casos amplamente discutidos que propõem a implementação de mais 5 dimensões [14], essas, por sua vez, são:
- 6D- Foca na sustentabilidade, criando uma oportunidade para otimizar o desempenho ambiental do projeto, incluindo dados relativos quanto ao consumo de energia, impacto ambientais e vida útil prevista.
- 7D- Fornece dados abrangentes sobre o estado dos ativos, garantias, especificações técnicas e manuais de funcionamento, que permitem gerir e programar tarefas de manutenção ao longo do ciclo de vida do edifício.
- 8D- Aborda considerações de saúde, segurança e bem-estar dos funcionários durante a operação, como sinalização, andaimes e maquinaria entre outras preocupações de segurança, potencializando a melhor segurança nos locais de trabalho.
- 9D- Envolve a gestão da utilização das matérias-primas de forma a reduzir ao mínimo possível o desperdício, mediante uma vigilância constante desses recursos.
- 10D- Introdução de processos de construção industrializada num ambiente BIM admitindo métodos de construção fora do local.

2.2.1.1. Usos BIM

Para incorporar eficazmente o BIM no processo de execução de um projeto, é crucial que a equipa desenvolva um Plano de Execução do Projeto BIM detalhado. Este plano deve proporcionar uma visão geral e detalhada das etapas necessárias para a execução do BIM ao longo do projeto, definindo claramente o objetivo da implementação, fluxo de processos, as trocas de informação e a infraestrutura requerida para suportar esta implementação. Para tal, a Universidade da Pensilvânia desenvolveu um guia de 5 etapas de acordo com a Figura 2.7 para se produzir um Plano de Execução [15].

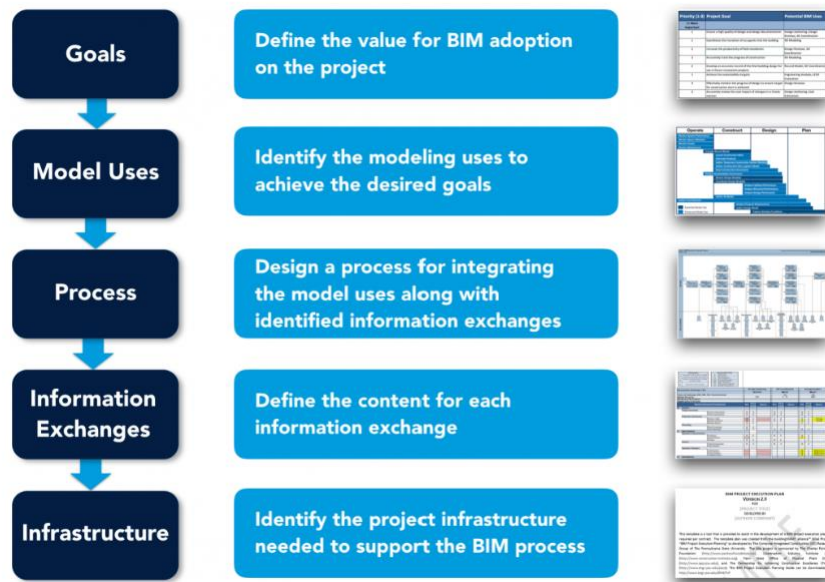


Figura 2.7 - Plano de Execução do Projeto BIM. Fonte:[15]

Segundo os autores [15], um dos passos mais importantes é definir de forma clara o valor potencial do BIM tanto para o projeto quanto para os membros da equipa, estabelecendo objetivos gerais para a implementação do BIM. Esses objetivos devem ser fundamentados no desempenho do projeto, relativamente à redução do tempo de execução, diminuição de custos, aumento de produtividade e qualidade.

Depois de estabelecer os objetivos, tanto do projeto como da empresa, é possível identificar os usos do BIM. A Universidade da Pensilvânia desenvolveu um sistema de classificação sistemática para os vários usos do Building Information Modeling em projetos de construção, que está organizado em 4 categorias, estas representam as diferentes fases do ciclo de vida de um projeto: Planeamento, Projeto, Construção e Operação/Manutenção. Em cada fase, existe uma lista de usos específicos do BIM, totalizando 21 usos BIM (ver Figura 2.8). A equipa deve identificar e priorizar os usos do BIM mais adequadas e benéficas para o projeto, o guia inclui um método de seleção para facilitar o processo.

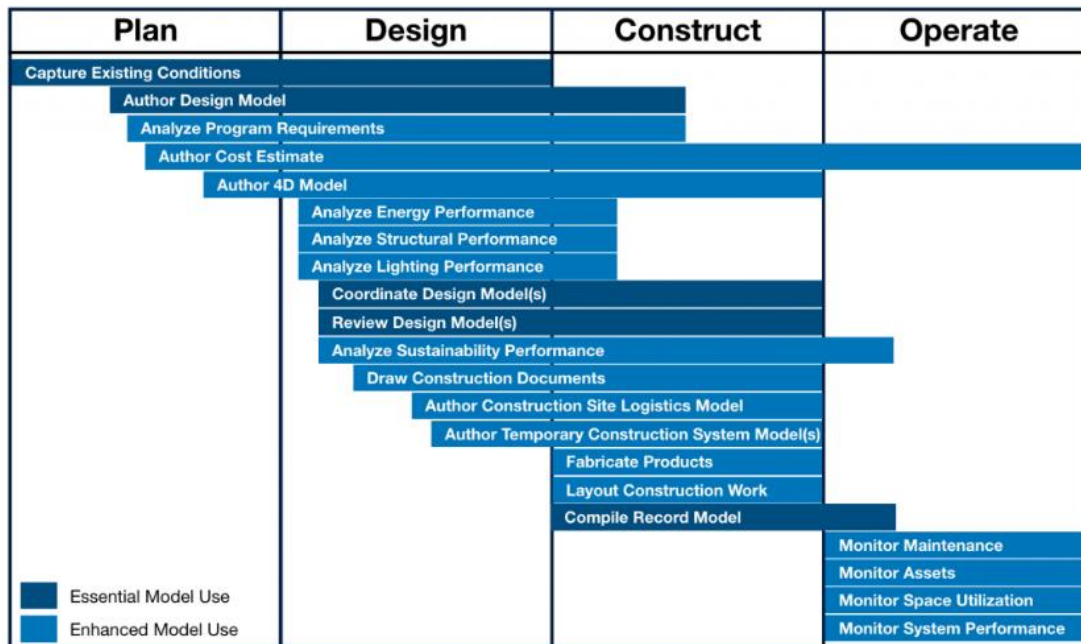


Figura 2.8 – Diferentes Usos BIM. Fonte: [15]

A adoção BIM neste projeto será descrita com detalhe no capítulo 3.4, intitulado “desenvolvimento do modelo BIM”. Contudo, dado que se trata da monitorização de um edifício histórico, este processo remete à fase da Operação com destaque na utilização BIM, monitorização do desempenho da estrutura.

Após identificar os usos do Modelo, é essencial compreender a execução de cada uma e do projeto como um todo. Para tal, mapas de processos são criados nesta fase ajudando a equipa a entender o processo BIM global, aspetos importantes da implementação, como estrutura contratual, os requisitos de entrega dos modelos, a infraestrutura e os critérios de seleção. Atualmente esses mapas devem ser desenvolvidos segundo a Norma ISO 19650.

2.2.1.2.ISO 19650

A Organização Internacional de Normalização (ISO) compôs a Norma ISO 19650 para normalizar a aplicação do BIM no sector AECO. Este documento destina-se a todas as partes envolvidas estabelecendo conceitos e princípios para apoiar a gestão e a produção de informação durante o ciclo de vida do ativo. Estes conceitos são aplicáveis a bens construídos e a projetos de construção de todas as dimensões, no entanto devem ser aplicados de forma adequada com as necessidades e particularidades das atividades. Os requisitos de informação devem ser claros, sendo essencial que os pormenores sejam acordados a tempo de serem cumpridos de forma eficiente e eficaz. Segundo a própria norma [16], estes processos tendem a produzir resultados comerciais benéficos para todas as partes envolvidas, reduzindo custos e riscos, graças a gestão da informação contida nos modelos. Composta por 5 partes, sendo elas:

- ISO 19650 – 1: Descreve os Conceitos e Princípios
- ISO 19650 – 2: Detalha a Fase de Desenvolvimento dos Ativos
- ISO 19650 – 3: Foca na Fase de Funcionamento dos Ativos
- ISO 19650 – 4: Dita os Requisitos para a Gestão da informação
- ISO 19650 – 5: Estabelece os Requisitos de Gestão dos Ativos

2.2.1.3. EN 17412-1, Level of Information Need

Com base na abundância de informações que um modelo BIM pode conter, uma norma europeia surge com o intuito de criar uma estrutura para consolidar a troca e a distribuição de informações ao longo do ciclo de vida do ativo quando se utiliza BIM. Esta necessidade surgiu pelo facto de existirem vários termos, conceitos e utilizações contraditórios, tanto a nível internacional como a nível europeu que dificultam o objetivo de ter um comum para descrever o nível de informação necessário para o mercado europeu comum.

Conforme estipulado pela norma [17], o nível de informação necessário que deve ser incluído está relacionado com o propósito específico do objeto em questão, conforme o seguinte exemplo de aplicação extraído da norma:

“Para efetuar uma análise de acessibilidade são necessários requisitos como a largura livre de abertura da porta, a localização e a posição do puxador. Outras propriedades como o nome do fabricante e custo de aquisição, não são relevantes para cumprir o objetivo. “

2.2.1.4. *Product Data Templates*

As informações do modelo devem seguir uma normalização fundamental para a implementação eficaz dos processos BIM, promovendo a colaboração entre os profissionais da indústria AECO. Um dos aspetos fundamentais a ter em conta na normalização é a definição clara e consistente da informação alfanumérica e da respetiva nomenclatura. Este processo é conhecido como Product Data Templates. Os PDTs são uma estrutura normalizada de dados que descrevem as características essenciais de produtos de construção, tornando mais fácil a gestão e a troca de informações entre os diferentes envolvidos no projeto [18, 19].

Se o produto desejado não estiver presente nos PDTs ou se a característica procurada não for encontrada, é possível utilizar o National Building Specification (NBS) BIM Object Standard [20]. Sendo um padrão de qualidade para objetos BIM define os requisitos necessários para a criação de objetos BIM de alta qualidade, assegurando consistência, colaboração e interoperabilidade nos processos de construção.

2.2.1.5.ISO 16739-1, *Industry Foundation Classes* (IFC)

A norma ISO 16739-1 [21] define um formato padrão conhecido como IFC, ou Industry Foundation Classes, para troca de dados entre diferentes plataformas BIM. Desenvolvido pela BuildingSMART para o setor da construção civil, o IFC é uma descrição digital padronizada de um projeto de construção. Mais especificamente, consiste num esquema organizado de dados que descreve os objetos contidos no modelo digital. Esta descrição conta com propriedades geométricas do objeto como largura, altura, cor e localização, assim como propriedades não geométricas como identificação, custos, processos de instalação, resistência, e outros parâmetros (Figura 2.9).

Este formato promove a troca de informações entre diferentes *softwares* e sistemas por todas as partes envolvidas num projeto, com objetivo de minimizar a perda de informação e permitir que cada elemento possa trabalhar na plataforma com que esteja mais familiarizado [22].

```
FILE_NAME('Project Number', '2024-05-12T15:40:32+00:00', ('', ''), 'ODA SDAI 22.12', 'Autodesk Revit 23.1.30.97 (ENG) - IFC 23.3.1.0', '');
FILE_SCHEMA('IFC4');
ENDSEC;

DATA;
#1=IFCORGANIZATION($, 'Autodesk Revit 2023 (ENG)', $, $, $);
#2=IFCAPPLICATION(#1, '2023', 'Autodesk Revit 2023 (ENG)', 'Revit');
#3=IFCCARTESIANPOINT((0., 0., 0.));
#4=IFCCARTESIANPOINT((0., 0., 0.));
#5=IFCDIRECTION((1., 0., 0.));
#6=IFCDIRECTION((-1., 0., 0.));
#7=IFCDIRECTION((0., 1., 0.));
#8=IFCDIRECTION((0., -1., 0.));
#9=IFCDIRECTION((0., 0., 1.));
#10=IFCDIRECTION((0., 0., -1.));
#11=IFCDIRECTION((1., 0., 0.));
#12=IFCDIRECTION((-1., 0., 0.));
#13=IFCDIRECTION((0., 1., 0.));
#14=IFCDIRECTION((0., -1., 0.));
#15=IFCPERSON($, 'up201907988', $, $, $, $, $);
#16=IFCORGANIZATION($, ' ', $, $);
#17=IFCPERSONANDORGANIZATION(#15, #16, $);
#18=IFCOMNERHISTORY(#17, #2, $, .NOCHANGE., $, $, $, 1714490795);
#19=IFCSIUNIT(*, .LENGTHUNIT., $, .METRE.);
#20=IFCSIUNIT(*, .AREAUNIT., $, .SQUARE_METRE.);
#21=IFCSIUNIT(*, .VOLUMEUNIT., $, .CUBIC_METRE.);
#22=IFCSIUNIT(*, .PLANEANGLEUNIT., $, .RADIAN.);
#23=IFCDIMENSIONALEXONENTS(0, 0, 0, 0, 0, 0);
#24=IFCMEASUREWITHUNIT(IFCPLANEANGLEMEASURE(0.017453292519943278), #22);
#25=IFCONVERSIONBASEDUNIT(#23, .PLANEANGLEUNIT., 'DEGREE', #24);
#26=IFCSIUNIT(*, .MASSUNIT., .KILO., .GRAM.);
#27=IFCDERIVEDUNITELEMENT(#26, 1);
#28=IFCDERIVEDUNITELEMENT(#19, -3);
#29=IFCDERIVEDUNIT((#27, #28), .MASSDENSITYUNIT., $);
#30=IFCDERIVEDUNIT((#27, #28), .IONCONCENTRATIONUNIT., $);
#31=IFCDERIVEDUNITELEMENT(#19, 4);
#32=IFCDERIVEDUNIT((#31), .MOMENTOFINERTIAUNIT., $);
#33=IFCSIUNIT(*, .TIMEUNIT., $, .SECOND.);
#34=IFCSIUNIT(*, .FREQUENCYUNIT., $, .HERTZ.);
#35=IFCSIUNIT(*, .THERMODYNAMICTEMPERATUREUNIT., $, .KELVIN.);
#36=IFCSIUNIT(*, .THERMODYNAMICTEMPERATUREUNIT., $, .DEGREE_CELSIUS.);
```

Figura 2.9 – Exemplo do formato IFC.

Um arquivo IFC pode ser aberto de diversas formas, visto que se trata de uma lista de texto. A Figura 2.9 mostra um arquivo IFC aberto no Notepad. Como qualquer lista existe um número associado a cada linha, no caso do IFC, a linha é iniciada por um “#” seguido de um número, a mesma é terminada por um “;”. Cada linha contém um elemento cujo nome é IFCx, onde o “x” indica a descrição desse elemento, dentro do elemento existe uma serie de parâmetros. Toma-se como exemplo a linha #20 da Figura 2.9, o “x” neste caso representa “IUNIT” e esta linha indica a unidade de área utilizada no *software* de modelação.

2.2.2.O BIM NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Na atualidade, o setor da construção enfrenta uma revolução, devido à forte competitividade em termos produtivos e de mercado de trabalho. A busca incessante pela redução de custos e prazos, juntamente com a exigência por maior qualidade e rigor por parte dos promotores, impulsiona mudanças significativas na forma como os projetos são concebidos, administrados e executados. Para a integração de tecnologias para explorar maneiras de inovar e otimizar os processos, como BIM, é crucial que as empresas se adaptem para permanecerem competitivas neste ambiente de constante evolução.

O BIM promove uma colaboração mais eficaz entre todos os intervenientes, reduzindo erros e incompatibilidades, melhorando a precisão do planeamento e otimizando prazos e orçamentos [23, 24].

2.2.2.1.HBIM- Heritage Building Information Modeling

O HBIM é uma extensão do BIM e tem como objetivo produzir um modelo de um edifício histórico, para tal é feito um levantamento do estado atual do edifício, através de fotografias, relatórios de manutenção e técnicas de captura da realidade.

Após a recolha dos dados, procede-se à criação do modelo BIM num *software* de modelação. Neste processo, não só se incorpora a geometria do edifício, mas também se integram os dados obtidos no levantamento, como fotografias históricas, relatórios de manutenção, registos de renovação, informações sobre materiais e estado de degradação.

Este procedimento completo permite não apenas a preservação eficaz de edifícios históricos, mas também facilita a gestão sustentável e a tomada de decisões informadas sobre intervenções de conservação e restauração [25].

2.2.2.2.Tecnologias para realização de levantamentos

Os edifícios históricos são caracterizados por possuírem morfologias complexas e heterogéneas, que chocam com os procedimentos padrão de um *software* de modelação 3D.

Novas tecnologias e procedimentos surgem todos os dias para tornar cada vez mais rápido e automático o processo de levantamento (geométrico) destas construções. Exemplos notáveis de tal são laser scanning (mapeamento por laser), drones ou câmara para fotogrametria terrestre. Assim, alcança-se o que é conhecido como nuvens de pontos - um conjunto de pontos referenciados entre si no espaço, que carregam consigo informações geométricas e colorimétricas. Estas inovações superam os métodos tradicionais em termos de precisão e qualidade na criação de modelos 3D, bem como na gestão e partilha de informação. Além de auxiliarem na identificação e planeamento de intervenções para reabilitação e manutenção, garantindo, assim, a preservação do valioso património histórico [26].

2.2.2.3.Caso exemplificativo

A Autodesk contribuiu com tecnologias avançadas para planeamento da reconstrução da Catedral de Notre-Dame. Esta tecnologia avançada consistiu em criar um modelo tridimensional BIM (Figura 2.10) que representasse o monumento antes do acontecimento e após o acontecimento, permitindo aos especialistas visualizarem as mudanças que ocorreram devido ao incêndio. Esta abordagem inovadora consiste em utilizar varrimento a laser para digitalizar a estrutura após o evento e, através de fotografias e *software* específico, criar um modelo do estado anterior ao desastre [27].



Figura 2.10 – Modelo 3D da Catedral de Notre-Dame, desenvolvido pela Autodesk. Fonte: [27]

Segundo Nicolas Mangon, vice-presidente de arquitetura, engenharia e estratégia da Autodesk, “Levou cerca de um ano para transformar todos esses dados em objetos inteligentes, que nos dão informações extremamente úteis”, ele acrescenta que através da sobreposição dos dados foi possível visualizar não só as aberturas do telhado, mas também os deslocamentos que ocorreram com a estrutura [28].

2.3. DIGITAL TWIN

2.3.1. CONCEITO

O termo *Digital Twin* sofreu diversas alterações ao longo do tempo, desde a sua conceção inicial como *Product Lifecycle Management* (PLM) até a sua definição atual, DT, tendo sido introduzido ao mundo pelo Dr. Michael W. Grieves durante uma apresentação na Universidade de Michigan em 2002 sobre a gestão do ciclo de vida de um produto. De forma simples, o Dr. Grieves descreveu-o como uma combinação de três partes (Figura 2.11): “Mundo real”, “Mundo virtual” e uma conexão para troca de dados entre o real e o virtual. Ligado ao “Mundo virtual”, havia uma quarta componente, uma vez que o “Mundo virtual” oferece um enorme número de instâncias utilizáveis [29].

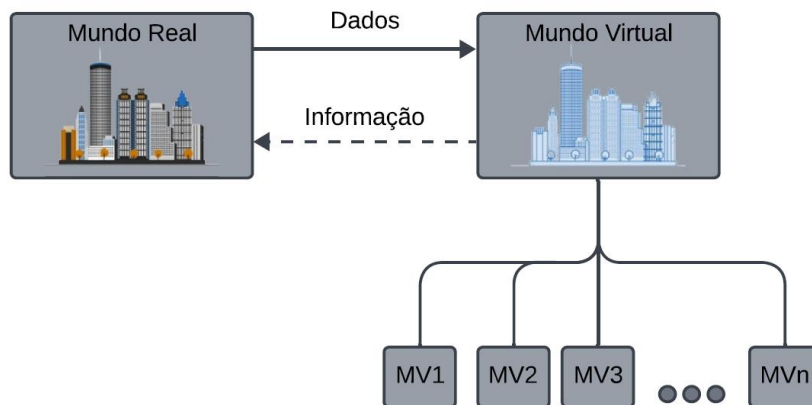


Figura 2.11 – Conceito de *Digital Twin* Fonte: [29]

Em 2010, John Vickers, tecnólogo da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), atribuiu-lhe o termo *Digital Twin*. No ano seguinte, o engenheiro aeroespacial Tuegel aplica o conceito de *Digital Twin* para aprimorar a criação de modelos e ambientes digitais de grande fidelidade para simulação e previsão de tempo de vida de aeronaves.

Em 2012 a NASA publica um artigo, estabelecendo formalmente a definição de *Digital Twin* como uma simulação multifísica, multiescalar, probabilística e de alta-fidelidade. Esta simulação utiliza dados históricos, dados obtidos através de sensores e modelos físicos para espelhar a vida do correspondente produto no mundo real.[30]

A definição mais utilizada refere-se uma representação virtual de um produto físico, sistema ou processo, que está em constante atualização com base nos dados recebidos do seu equivalente físico. A ideia é criar uma cópia digital que reflete o estado atual do objeto físico, permitindo monitorização, simulação e análise em tempo real [31].

2.3.2. CLASSIFICAÇÃO DOS *DIGITAL TWINS*

2.3.2.1. Tipologia

Dentro do contexto dos *Digital Twins*, existem três categorias principais, cada uma correspondendo a uma fase específica do ciclo de vida do produto, criação, construção e operação. A Figura 2.12 ilustra esses três tipos de *Digital Twins*. [29]

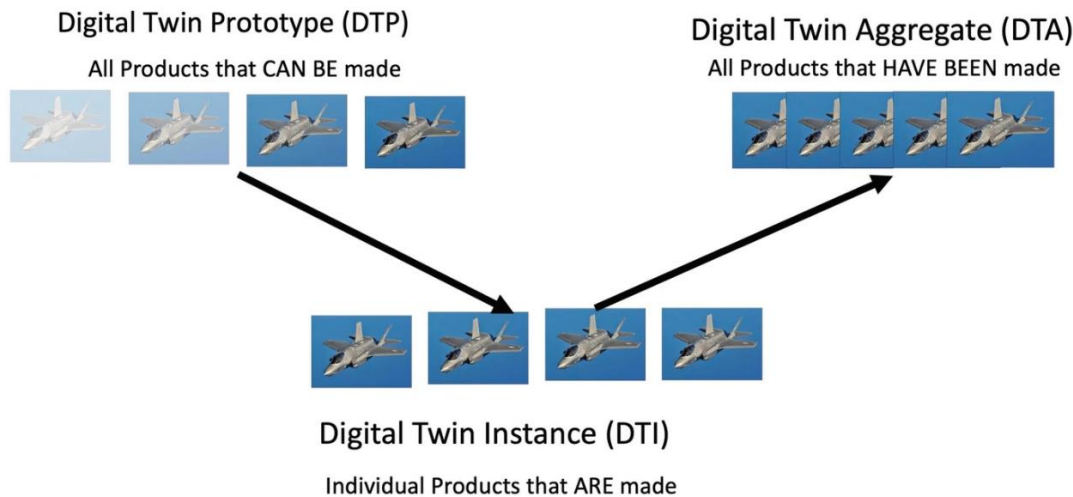


Figura 2.12 – Diferentes tipos de DT. Fonte: [29]

O **Protótipo de Digital Twin (DTP)** representa o estágio de criação do gémeo digital, anterior à produção física do produto. Esta abordagem visa maximizar o desenvolvimento virtual, permitindo testes, ajustes e aperfeiçoamentos antes da fabricação física. Conforme ilustrado na figura o DTP é o produto e as suas múltiplas variantes, o produto vai tomando forma, evoluindo desde a sua conceção inicial até à criação de um primeiro protótipo. Como afirma Dr. Michael W. Grieves em seu livro:

“Se vamos cometer erros, o domínio virtual é o lugar para os cometer, porque o custo desses erros virtualmente aproxima-se de zero [29].”

A tecnologia de Realidade Virtual (VR) demonstra ter um papel fundamental, fornecendo uma plataforma onde ideias podem ser visualizadas e aprimoradas, minimizando assim erros e custos associados.

A **Instância de Digital Twin (DTI)** emerge do processo de produção física do produto. Cada DTI representa uma unidade específica do produto, acompanhada por medidas precisas e informações detalhadas, desde número de série até características dimensionais, ou seja, transitamos das especificações idealizadas para as medidas concretas dos produtos individuais.

Graças à tecnologia de Realidade Aumentada (AR) podemos sobrepor as DTI sobre os produtos físicos, desta forma deixa-se para trás a ideia de gémeo físico e o gémeo digital serem coisas separadas, permitindo os técnicos não apenas visualizam o produto diante de si, mas também observem o desempenho do produto.

O **Agregado de Digital Twin (DTA)** compreende todos os produtos fabricados, agregando dados para análise e previsão de problemas. A inclusão de sensores permite a identificação precoce de potenciais falhas, possibilitando passar da manutenção periódica para a manutenção baseada nas condições.

Os DTAs capturam tanto a evolução temporal do comportamento, permitindo a correlação entre estados anteriores e resultados subsequentes, bem como a aprendizagem contínua para melhorias futuras.

2.3.2.2. Níveis de Integração

Levando em conta a aptidão para a troca de dados, e devido à falta de consenso no conceito de *Digital Twin*, o Dr. Kritzinger categorizou os DT em três subcategorias distintas [30, 32]:

- **Digital Model** – Os dados entre o objeto real e o digital são trocados manualmente, desta forma qualquer alteração no estado do objeto real não será refletida diretamente no digital, e vice-versa.
- **Digital Shadow** – Os dados do objeto real são automaticamente atualizados no seu correspondente digital, enquanto as atualizações no sentido contrário continuam a ser feitas manualmente. Como resultado, alterações no objeto real são visíveis na sua cópia digital, mas não ocorre o oposto.
- **Digital Twin** – Existe um fluxo bidirecional automático de dados entre o objeto real e digital. Desta forma qualquer alteração realizada em um dos objetos, real ou físico, irá conduzir diretamente a alterações no outro.

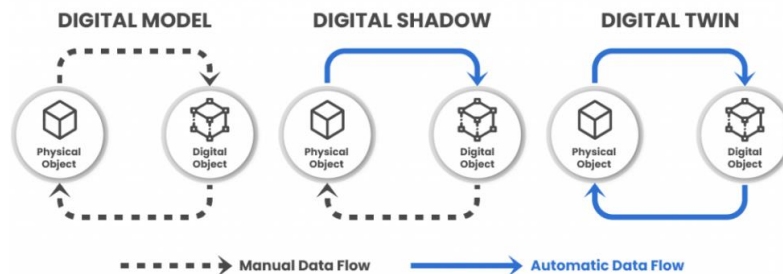


Figura 2.13 – Classificação dos Níveis de DT. Fonte: [33]

2.3.3. TECNOLOGIAS QUE APOIAM O *DIGITAL TWIN*

Aliado ao conceito de *Digital Twin*, que visa criar uma réplica digital de um objeto físico, processo ou sistema, pode-se incorporar no mundo virtual tecnologias avançadas para simular, analisar e prever o comportamento do seu equivalente no mundo real. Esta abordagem oferece uma visão abrangente e dinâmica que pode ser aplicada em diversas indústrias, como manufatura, saúde, energia e infraestrutura urbana, proporcionando inúmeros benefícios, incluindo otimização de processos, redução de custos, manutenção preditiva e melhorias na tomada de decisão. Abaixo, são detalhadas algumas das principais tecnologias envolvidas no conceito de *Digital Twin*:

Big Data refere-se a um vasto conjunto de dados com alta variedade, gerados em velocidades elevadas, provenientes de diversas fontes, como sensores, dispositivos, redes sociais, transações comerciais e muito mais. Para ficar mais claro, o Youtube é um exemplo de Big Data, este disponibiliza uma enorme gama de vídeos numa base de dados acessível aos utilizadores [34].

Estes dados são armazenados em servidores e bases de dados, e o acesso a esses dados é feito graças à **Internet das Coisas**, como descrito no subcapítulo 2.1.4 funciona como uma rede que conecta todos os produtos, equipamentos e dispositivos [35].

Aliados com ferramentas de processamento de dados, **Inteligência Artificial** e **Machine Learning**, os dados são aplicados ao modelo virtual, aonde são corridas diversas simulações em busca de um resultado otimizado. Estas tecnologias permitem analisar grandes quantidades de volume dos dados mais

rapidamente que o humano, encontrando padrões e descobrindo relações entre os dados. Por exemplo, as redes sociais, utilizam algoritmos de Machine Learning para recomendar vídeos aos utilizadores com base nos seus históricos de visualização e preferências [34, 36].

Desta forma, o uso combinado destas funcionalidades tem revolucionado diversas áreas, desde a indústria até a saúde. A capacidade de processar e analisar grandes volumes de dados em tempo real abre novas oportunidades para inovação e eficiência, proporcionando vantagens competitivas significativas para as empresas que adotam essas tecnologias.

2.3.4. ÁREAS DE APLICAÇÃO E VANTAGENS

No mundo moderno, a tecnologia avança em ritmo acelerado e está a transformar não apenas a maneira como vivemos, mas também como projetamos, operamos e mantemos sistemas complexos. O conceito de *Digital Twin*, emerge como uma ferramenta poderosa que proporciona uma representação virtual precisa de um sistema físico ou processo em tempo real. Essa réplica digital não só replica a geometria de um objeto ou infraestrutura, mas também sua dinâmica, comportamento e interações com o ambiente circundante.

2.3.4.1. Na indústria

A implementação do *Digital Twin* tem sido um ponto crucial para revolucionar a maneira como as indústrias operam dado à sua ampla gama de usos. A Unilever, uma das líderes globais de bens para consumo, exemplifica como a adoção inteligente dessas tecnologias pode impulsionar a eficiência e a qualidade em suas operações de manufatura. Ao implementar sensores em suas fábricas, a Unilever criou uma rede de monitorização, enviando dados em tempo real de todos os processos de produção para uma nuvem empresarial, onde é recriado um gêmeo digital. Através de dispositivos portáteis os funcionários têm agora a capacidade de identificar problemas, resolver soluções e partilhar dados de forma ágil com os colegas. Esta implementação aumentou a produtividade, minimizou o desperdício, otimizou a utilização de materiais e assegurou a conformidade e a qualidade [37].

2.3.4.2. No setor da energia

Além da fabricação, o *Digital Twin* tendo vindo a inovar o setor de energia, a Priva desenvolveu o ecoBuilding que utiliza a tecnologia de *Digital Twins* e Inteligência artificial para obter um clima interior ideal, levando em conta diversas variáveis, como as previsões meteorológicas, a utilização do edifício, a produção e o armazenamento de energia e os preços flexíveis da energia. O objetivo deste *software* não só otimizar o consumo de energia e os gastos associados, mas também reduzir as emissões de CO₂. Os resultados até agora são promissores, obtendo uma poupança de 40% no consumo de energia [38].

2.3.4.3. Na Saúde

No campo da saúde, o *Digital Twin* está sendo aplicado para criar um modelo virtual do corpo humano, os médicos podem simular diferentes cenários e terapias, ajudando a tomar decisões mais informadas e eficazes [39]. A FEops lançou uma plataforma inovadora chamada Heartguide. Esta plataforma faz uso de tecnologia de ponta para criar cópias virtuais do coração ou das suas subestruturas, a partir de exames cardíacos. O seu objetivo é disponibilizar conhecimentos únicos para aprimorar a avaliação e expandir os cuidados personalizados para os doentes com doenças cardíacas estruturais [40].

2.3.4.4.No transporte

Além desses setores, o *Digital Twin* também encontra aplicações em áreas como transporte ao fornecer uma representação digital precisa de sistemas físicos e processos, o *Digital Twin* capacita organizações a tomar decisões mais informadas, reduzir custos operacionais e melhorar a eficiência global. A Bridgestone, afirma que a sua produção aumentou quase em 50% através da realização de testes virtuais no *Digital Twin*. A empresa utiliza a tecnologia para prever como as diferentes condições e estilos de condução afetam os seus pneus, isto ajuda a prever a vida útil dos compostos e a compreender o desgaste que estes sofrerem.

A Renault, faz uso do *Digital Twin* para desenvolver os seus produtos, o processo começa com a criação de um modelo digital do veículo. Posteriormente são efetuados testes exaustivos antes de produzir o veículo real, garantindo a máxima segurança e a conformidade com as normas em vigor. Esta abordagem permite à montadora criar automóveis de alta qualidade que satisfazem os mais elevados padrões de excelência [41].

2.3.4.5.Na Engenharia Civil e Construção

Existe uma certa confusão entre os termos *Building Information Modeling* e *Digital Twin*, dado que o DT ainda é bastante recente no ramo da construção, mas de facto existe uma certa diferença entre ambos, o BIM é uma representação digital de uma estrutura e de suas características (geometria, quantidades, informação geográfica, propriedades físicas) sendo esta informação partilhada com os outros membros de equipa.

Enquanto a informação do BIM é estática a do DT, usando sensores, é atualizada em tempo real permitindo os designers, os diretores e o seus clientes monitorizarem o projeto constantemente, identificarem problemas e ajustarem estratégias para construírem com qualidade, dentro do tempo e com margem de orçamento. Além disso, o DT pode ajudar rastrear outros recursos (materiais, mão de obra, equipamentos), monitorizar a segurança, o planeamento de recursos e logística.

De forma simples, o *Digital Twin* não é apenas uma ferramenta tecnológica, é uma ponte entre o mundo físico e digital, que oferece perceções valiosas possibilitando inovações que antes eram inimagináveis. À medida que essa tecnologia continua a evoluir, suas aplicações são limitadas apenas pela nossa imaginação, fazendo dele uma peça para a evolução da sociedade e melhoria das condições de vida [42].

2.4. DO BIM AO *DIGITAL TWIN*

Embora o potencial seja imenso e já existam alguns casos práticos, a exploração da integração de modelos BIM com tecnologias da IoT ainda se encontra numa fase inicial. São alguns os artigos que apresentam provas de conceito sobre o tema, e têm surgindo algumas implementações práticas, principalmente com objetivos de monitorização de processos construtivos, de gestão de desempenho energético e de planeamento de saúde e segurança [43].

Ainda que por vezes surja alguma confusão entre os dois termos, pelo facto de ambos representarem modelos virtuais de um objeto, há diferenças importantes entre BIM e *Digital Twin*. O BIM é responsável pela construção inteligente, permitindo a criação de modelos digitais detalhados que auxiliam no planeamento, design, construção e gestão de edifícios e infraestruturas. Por outro lado, o DT funciona como a ferramenta que trata da gestão da construção, ele acompanha o estado da construção ao longo do tempo, graças à utilização de informações retiradas do objeto real. O DT é dinâmico, ou seja, atualiza os dados recolhidos, sem necessidade de intervenção do utilizador para apresentar informações diferentes, ao contrário do modelo BIM que é mais estático e depende de atualizações manuais [26].

Normalmente, uma base de dados é necessária para integrar as tecnologias da *Internet das Coisas* em um *Digital Twin*. É crucial que um *Digital Twin* forneça não apenas uma exibição em tempo real dos dados, mas também um histórico de informações. As bases de dados oferecem a capacidade de armazenar e processar esses dados, permitindo sua manipulação conforme desejado pelo utilizador.

2.4.1. BASE DE DADOS

Uma Base de Dados consiste em conjuntos de informações ou de dados que são armazenados e organizados de forma estruturada. Desta forma, os dados podem então ser facilmente acedidos, geridos, modificados, atualizados, controlados e organizados. Existem diferentes tipologias de DB, sendo as mais comuns as seguintes [44, 45]:

- Bases de dados relacionais – Os dados são organizados em tabelas relacionais e são estabelecidas relações entre os dados por meio de chaves. Este tipo de base de dados é a mais comum no mercado.
- Bases de dados não relacionais – Não usam o esquema tabular como na maioria dos sistemas, ao invés disso, utilizam um modelo de armazenamento otimizado para os requisitos específicos do tipo de dados que estão sendo armazenados.
- Bases de dados orientadas a objetos – Esta base de dados aceita qualquer tipo de dados, estes são organizados em blocos ao qual lhes é associado um identificador. Diferente do modelo relacional, estes dados podem não seguir uma lógica preestabelecida.
- Bases de dados de séries temporais (Figura 2.13) - Uma série temporal consiste em um conjunto de dados bem definidos e resultantes de medições ao longo do tempo, a cada medição realizada é um atribuído um carimbo de data e hora, este é designado de “timestamp” e marca o momento em que ocorreu a medição através de cadeia de caracteres que representam a data e/ou hora.

2.4.2. INTEGRAÇÃO IOT

O processo de integração entre os Modelos BIM e os dispositivos IoT para criar um *Digital Twin* habitualmente inicia-se com a aquisição de dados que depende do tipo de sensor utilizado, seguindo-se depois o armazenamento dos respetivos dados numa base de dados que pode diferir. Alguns exemplos de base de dados são Microsoft Excel, MongoDB, Microsoft Azure SQL Database, InfluxDB. Estas bases de dados podem permitir diretamente uma visualização dos dados de forma mais intuitiva e gráfica, ou podem permitir criar pontes de comunicação com aplicações onde estes se tornam disponíveis de forma mais apelativa. Para que estas pontes de comunicação sejam utilizadas com sucesso é necessário que o modelo BIM contenha propriedades paramétricas para identificar dentro da base de dados o respetivo sensor.

Os seguintes pontos são relativos à descrição de aplicações projetadas para a integração de dados e desenvolvimento de *Digital Twins*.

2.4.2.1. Autodesk Platform Services

Desenvolvida pela Autodesk, a APS é composta por *Application Programming Interfaces* (APIs) e serviços *cloud* que permitem a criação de aplicações personalizáveis e soluções inovadoras, permitindo a automação de processos, a conexão de equipas e fluxos de trabalho, e a visualização de dados [46].

2.4.2.2. Bentley iTwin Platform

Projetada pela Bentley Systems, esta plataforma é dedicada à criação e gestão de *Digital Twins*, fundamentando-se em APIs e bibliotecas de código aberto especialmente concebidas para aplicações de *Digital Twins*. Permite criar, visualizar e analisar réplicas digitais de ativos de infraestruturas. [47].

2.4.2.3. Microsoft Azure Digital Twin

Em semelhança com a anterior a Microsoft Azure *Digital Twin* é uma plataforma dedicada à modelação e criação de *Digital Twins*, capaz de fazer ligações como dispositivos IoT através de um serviço *cloud*, permitindo não só consulta de dados em tempo real como também a visualização do histórico passado. Além disso, oferece a possibilidade de integrar esses dados em serviços de análise para rastrear melhor o passado e prever o futuro [48].

2.4.2.4. Xeokit 3D

Trata-se de um *software* de acesso livre, desenvolvido pela Xeolabs, para visualização de modelos tridimensionais numa plataforma web. Programado em linguagem Javascript, o Xeokit é altamente editável, permitindo aos utilizadores personalizarem o *software* conforme as suas necessidades. Existem guias e tutoriais que orientam os utilizadores sobre como desenvolver a aplicação web. A comunidade de desenvolvedores é ativa, constantemente cria Plugins e Ferramentas que podem ser acrescentadas ao código inicial [49].

2.4.2.5.Three.js

É uma biblioteca de Javascript de código aberto sob licença do MIT, que tem como objetivo simplificar drasticamente o processo de criação de cenas animadas em 3D na web, com apenas a utilização de algumas linhas de código.

A biblioteca facilita a manipulação de elementos 3D, incluindo geometria, materiais, luz e animações, sendo uma ferramenta poderosa e acessível tanto para desenvolvedores iniciantes quanto para experientes. Possui uma página web oficial que fornece exemplos criados pela comunidade do potencial da biblioteca, desde jogos até artes digitais interativas. Assim como toda a documentação para implementar a biblioteca em projetos [50].

2.4.2.6.Open BIM Components

O OBC é uma biblioteca de código aberto desenvolvida com base na Three.js e outras bibliotecas complementares, destinada a criar uma plataforma web para a visualização de modelos BIM. Durante o desenvolvimento desta dissertação, a OBC passou por várias atualizações e, atualmente, é programada em TypeScript. A biblioteca destaca-se por possuir uma documentação com diversos exemplos de aplicação, que simplificam o processo de utilização para os utilizadores. Com esses recursos, a OBC facilita a integração de modelos BIM em plataformas web, promovendo maior acessibilidade e eficiência na visualização e manipulação de dados de construção [51].

2.5.SÍNTESE

De forma resumida, neste capítulo, foi explorada de forma abrangente as tecnologias e metodologias relacionadas com a monitorização de edifícios históricos, Building Information Modeling e *Digital Twins*.

Inicialmente, abordou-se a monitorização de edifícios históricos, com foque especial na inspeção e diagnóstico, tipo de monitorização estrutural e o papel da IoT na aquisição e análise de dados. Em seguida, explorou-se o BIM, destacando-se métodos de implementação e normas ISO 19650 para implementar.

Discutiu-se também o conceito de DT, as diferentes classificações, tecnologias que o suportam e áreas de aplicação. Finalmente examinou-se a transição do BIM para o *Digital Twin*, enfatizando a importância da base de dados e métodos para produzir o DT.

No próximo capítulo, irá ser introduzido o caso de estudo e o procedimento de criação de um modelo BIM.

3

CASO DE ESTUDO

3.1. ENQUADRAMENTO E OBJETO DE ESTUDO

A ideia de produção de um *Digital Twin* implica um acesso contínuo a conjuntos de dados em tempo real que se integrem de forma harmoniosa com um modelo virtual do real ou imaginário.

Com este propósito, e no âmbito deste trabalho, tira-se partido de estudo em curso sobre o comportamento estrutural de quatro monumentos históricos na envolvente da construção da nova linha rosa do Metro do Porto – Troço Casa da Música/ Estação de São Bento, apoiado na sua observação contínua com recurso aos sistemas de monitorização neles instalados e em funcionamento sob responsabilidade e liderança do Professor António Arêde. Visa-se assim explorar a monitorização estrutural desses monumentos históricos a partir de *Digital Twins*.

O foco deste estudo recai sobre a emblemática Estação de São Bento (Figura 3.1), localizada no centro histórico da cidade do Porto, precisamente na Praça Almeida Garrett, próxima à Praça da Liberdade. Desde sua inauguração em 1916, esta estação ferroviária tem sido um marco histórico e arquitetónico de grande importância na região, trazendo memórias da arquitetura parisiense da época.

3.1.1. ESTAÇÃO DE SÃO BENTO

Construída em 1900 sobre as fundações do antigo convento de São Bento de Avé Maria, a Estação de São Bento apresenta uma disposição em forma de “U”. Feita principalmente por granito, esta apresenta um grande rigor geométrico e quase simétrico, compreende um corpo central que abriga o vestíbulo/átrio, cercado por dois corpos similares de maior altura. Estes últimos são subdivididos em torreões e alas separadas.

No vestíbulo (Figura 3.2), o elemento mais chamativo do local, as paredes estão ornamentadas de 20.000 azulejos pintados por Jorge Colaço, que ilustram episódios da História de Portugal [52]. O teto do vestíbulo, adornado por um revestimento de estuque ricamente elaborado, é suportado por uma estrutura própria sobrejacente localizada no desvão da cobertura, constituída por barrotes e vigas de madeira que se apoiam em vigas metálicas treliçadas principais. Por sua vez, a cobertura desenvolve-se em quatro águas revestida com telha marselha e apoia-se em asnas metálicas que, à semelhança das vigas metálicas do teto, descarregam nas paredes resistentes do contorno do vestíbulo realizadas em alvenaria de granito.

Os torreões, apresentam coberturas também em quatro águas, apoiadas em asnas de madeira e revestidas por placas de fibrocimento. As coberturas das Alas, possuem geometria de três águas revestidas em telha marselha. A estrutura da cobertura da gare (Figura 3.2) é metálica, apoia-se em pilares robustos de ferro fundido, que se estendem ao longo das plataformas, seguindo em paralelo até alcançar o muro de contenção onde se iniciam os túneis. [53]



Figura 3.1 – Fotografias aérea (à esquerda, Fonte: Google Earth) e terrestre (à direita, Fonte:[52]) da estrutura da Estação de São Bento.

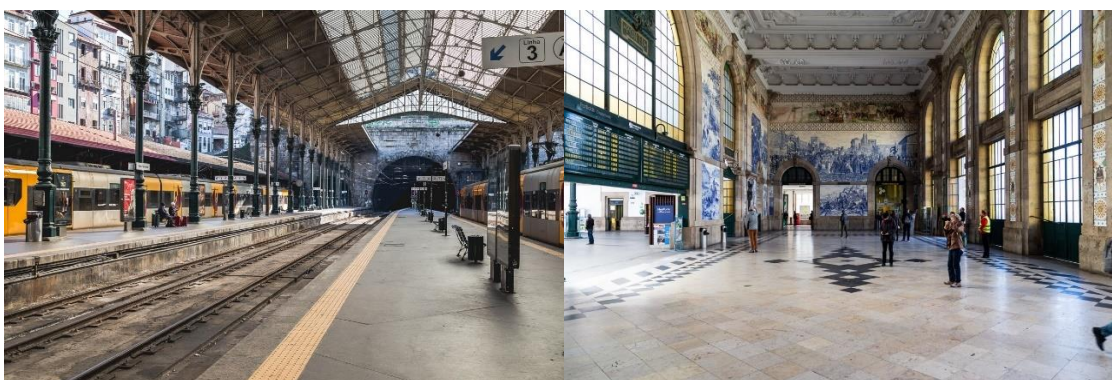


Figura 3.2 – Vista da Gare da estação à esquerda. Vista do vestíbulo à direita. Fonte:[54]

Com o objetivo de estimular a procura do sistema de metro e contribuir para a redução das emissões de gases poluentes, bem como promover o desenvolvimento económico do local, está em andamento na cidade do Porto a construção da linha Rosa, também classificada como linha G [55]. Esta nova linha ligará a Casa da Música, à Estação de São, conectando a linha Laranja e a linha Amarela. Com uma extensão de 3 quilómetros, dos quais 2.45 operacionais, e 4 estações subterrâneas, será um importante meio de transporte que servirá os polos de ensino, saúde, cultura e artes, a Metro do Porto prevê abrir a linha à operação em julho de 2025, promovendo assim um futuro mais sustentável e eficiente para a cidade do Porto.[55, 56]



Figura 3.3 - Mapa representativo do traçado da nova linha rosa. Fonte:[56]

Durante o período de construção da nova linha rosa do Metro do Porto, é expetável a ocorrência de alguma influência dos trabalhos sobre as estruturas adjacentes, em virtude dos efeitos provocados pelas operações dos processos construtivos, embora os impactos possam ser minimizados com um planeamento cuidadoso. A utilização de instrumentação e monitorização das estruturas próximas possibilita a coleta de dados para permitir a progressão dos trabalhos conforme o planeado.

Face à magnitude desta empreitada, é necessário fazer uma análise abrangente ao longo de todo o seu percurso, delineando a natureza das construções existentes e as consequências que podem ser provocadas. Destaca-se, de modo especial, a zona histórica da cidade, cuja importância é incontestável e cuja preservação é crítica, tornando-se, portanto, importante a monitorização do património histórico nela contido. Neste grupo de relevância, encontra-se Estação de São Bento.



Figura 3.4 - Mapa representativo da distância entre a Estação e a Zona intervenção. Fonte[55]

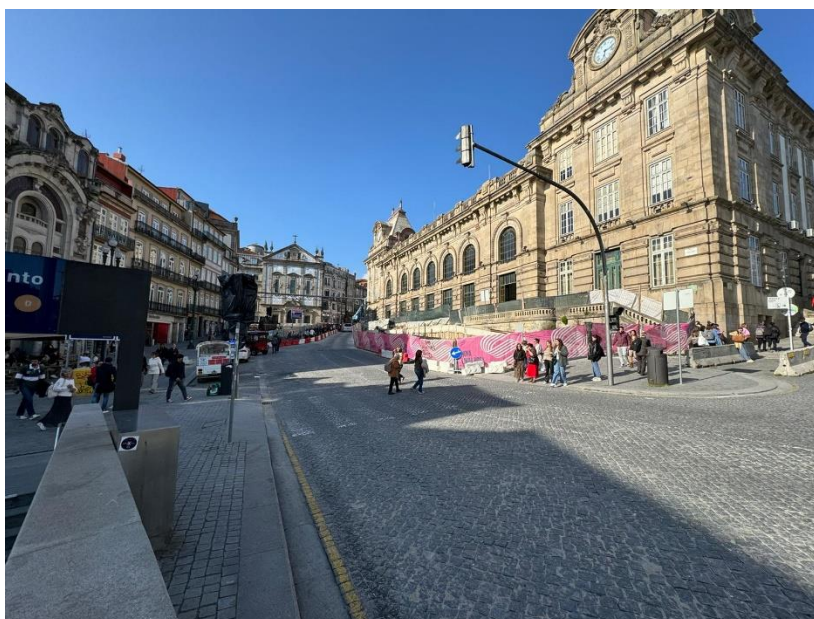


Figura 3.5- Fotografia representativa da zona de intervenção.

3.2.METODOLOGIA DE MONITORIZAÇÃO

3.2.1.INSTRUMENTAÇÃO

No interior da Estação de São Bento foi instalado um sistema monitorização de base elétrica, aplicando-se sensores e demais equipamentos de diversos fornecedores. Na fase inicial deste processo, os dados foram sendo recolhidos e armazenados numa base de dados própria do fornecedor do sistema de aquisição, com o propósito de viabilizar a recolha da informação de forma mais imediata. Posteriormente esta estratégia foi alterada conforme adiante se refere.

O sistema de monitorização inclui 51 sensores, distribuídos por vários locais da estação, tendo-se utilizado cinco tipos de sensores cuja informação básica se encontra resumida na Tabela 1.

Tabela 1 - Tipos de sensores presentes no sistema de monitorização

Tipo de sensor	Quantidade	Medição	Unidade	Especificações
Sensores de nível	7	Variações de pressão hidrostática. Permitem compreender se existe movimento vertical do local onde é instalado.	mm H2O	Fornecedor: KELLER
Sensores de Deslocamento (Fissurómetros)	16	Movimentos de abertura/fecho de juntas e/ou fissuras.	mm	Fornecedor: Soil Instruments / Variohm
Clinómetros	10	Rotações em torno de dois eixos ortogonais horizontais.	°	Fornecedor: Soil Instruments
Termómetros	15	Variações de temperatura.	°C	Fornecedor: Status Instruments
Acelerómetros	3	Acelerações e velocidades por integração.	g	Fornecedor: MicroStrain-Lord

3.2.1.1. Sensores de nível

São equipados com célula cerâmica destinada à medição de baixas de pressões e transmitem os dados de forma analógica. Interligados por um sistema hidráulico (neste caso, foi utilizado água), esses sensores monitorizam a variação de pressão na coluna de água em diferentes pontos, permitindo assim a determinação do desnível em relação a um ponto de referência, que é monitorizado por um sensor de nível fixo. O dispositivo inclui também um sensor de temperatura integrado e um microprocessador que realiza de forma autónoma a compensação dos efeitos térmicos, os quais poderiam influenciar diretamente a medição da pressão na célula de cerâmica. O modelo é apresentado na Figura 3.7



Figura 3.6 – Sensor de Nível

3.2.1.2. Sensores de deslocamento

O sensor de deslocamento ou fissurómetro é um transdutor de deslocamentos. Este é fixado à estrutura que se pretende monitorizar e quando existe uma mudança na distância entre os pontos de fixação, ocorre movimento de uma haste metálica dentro do sensor. Sendo um sensor potenciométrico, o deslocamento dessa haste introduz variação na resistência do potenciômetro, que é traduzida por uma mudança de tensão na saída do sensor. Dessa forma, ao interpretar o valor de tensão captada pelo sensor é possível determinar a variação da distância entre os pontos de fixação, que poderá corresponder ao movimento de abertura/fecho de uma fissura ou junta. Na Figura 3.7 apresenta-se o modelo adotado.



Figura 3.7 – Fissurómetro

3.2.1.3. Clinómetros

O clinómetro é um transdutor de rotações que se baseia numa tecnologia da MEMS, permitindo monitorizar as rotações em torno dos eixos horizontais do corpo ao qual se encontra fixado. Este possui um microprocessador que efetua uma compensação automática das rotações devido efeito da temperatura. O modelo é apresentado na Figura 3.8

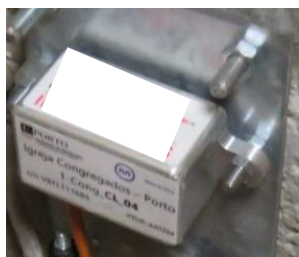


Figura 3.8 – Clinómetro

3.2.1.4. Sensores de temperatura

O sensor de temperatura, neste caso é uma termorresistência que permite conhecer a temperatura do meio ambiente, através de uma relação entre a resistência elétrica do material e da temperatura a que se encontra. Neste caso o material é a platina com resistência de 100 Ω aos 0 $^{\circ}\text{C}$, pelo que se trata de uma termorresistência designada de Pt100. O transmissor de temperatura é responsável por realizar a conversão da temperatura num sinal de corrente elétrica associada à variação de resistência do material da sonda. Os modelos usados são os apresentados na Figura 3.9

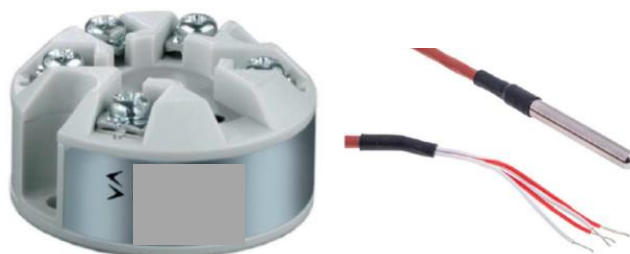


Figura 3.9 - Transmissor e sonda de temperatura Pt100

3.2.1.5. Acelerómetro

Foi adotado um sensor triaxial para medição de acelerações que está integrado numa placa de aquisição, registo, condicionamento e transmissão de dados através de conexão sem fios (*wireless*). Deste modo, elimina-se a necessidade de um módulo separado de aquisição e registo de dados, simplificando a transmissão para o sistema agregador. Por esta razão este equipamento constitui um nó da rede de monitorização sem fios (*wireless sensor network*), designado de nó de acelerómetro, que regista, processa, armazena e transmite sinais em três canais correspondentes às acelerações segundo as direções ortogonais x, y e z.

Para assegurar uma monitorização contínua e sem interrupções, optou-se por utilizar um sensor que requer alimentação elétrica externa, ao invés de depender exclusivamente de uma bateria interna, embora esta possibilite análises prolongadas graças ao baixo consumo de energia. O modelo adotado é o que se apresenta na Figura 3.10

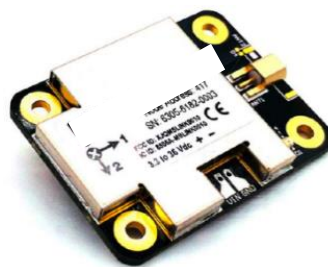


Figura 3.10 - Nó acelerómetro

3.2.1.6. Módulo de aquisição e registo de dados

Os módulos de aquisição, ligados por cabo aos sensores, referidos nas seções 3.2.1.1 a 3.2.1.4, recebem destes os dados sob a forma de tensão elétrica, que são transmitidos, via *wireless*, a uma *Gateway*.

O modelo utilizado dispõe de oito canais de entrada e possui eletrónica interna responsável pela aquisição, filtragem, registo condicionamento e transmissão de dados incluindo um conversor analógico digital. O módulo é configurado remotamente e suporta várias configurações de amostragem dos dados. O modelo usado é o apresentado na Figura 3.11



Figura 3.11 - Módulo de aquisição e registo de dados

3.2.1.7. Módulo de agregação de dados de saída (*Gateway*)

Todos os dados recolhidos nos nós de aceleração e nos módulos de aquisição, convergem para um dado módulo central de agregação e transmissão, designado de *Gateway*. Na instalação na Estação de S. Sento foi apenas adotada uma única *Gateway*.

Equipado com um processador interno e sistema operativo Linux, este dispositivo permite configurar os nós da rede, coordenar e recolher dados armazenados nos diversos módulos de aquisição. Além da recolha, transmite os dados para um computador local, ligado diretamente, ou para um computador remoto, através da *Internet*. Este sistema sincroniza os sensores, fornecendo uma referência temporal contínua para todo o sistema. O modelo é apresentado na Figura 3.12



Figura 3.12 - Módulo de agregação de dados de saída (*Gateway*)

3.2.1.8. Router de transmissão remota de dados

Adotando um router de dados, estabelece-se uma rede ethernet local à qual se liga, por cabo, o módulo de saída de dados descrito no ponto 3.2.1.7, permitindo assim a comunicação com o exterior através de uma rede móvel fornecida por um cartão SIM inserido no Router que proporciona acesso à *Internet*. A este sistema associa-se um *software* que permite estabelecer uma rede privada virtual (VPN), garantindo a comunicação segura via *Internet* e o acesso direto à *Gateway* a partir de um computador remoto externo. Desta forma, toda a configuração e gestão da rede de monitorização pode ser realizada à distância. O modelo do router é ilustrado Figura 3.13



Figura 3.13 - Router de transmissão remota de dados

3.2.2. ASPETOS GERAIS E ORGANIZAÇÃO

A equipa da FEUP, responsável pela implementação do sistema, agrupou os sensores em zonas (definidas longitudinalmente em planta) e depois em níveis. Neste caso, existem três zonas, como evidenciado na Figura 3.15:

- Zona 0 que corresponde à zona da plataforma Norte da estação junto à boca do túnel ferroviário Norte
- Zona 1 que coincide com a parte final da ala Norte
- Zona 2 que compreende as áreas dos torreões Norte e Sul e a área do vestíbulo/átrio

Quando aos Níveis, existem quatro níveis:

- Nível 0, à cota térrea
- Nível 1, à cota do Piso 1 dos torreões
- Nível 2, à cota do topo das paredes do átrio no desvão da sua cobertura
- Nível 3, à cota do Piso 3 no Desvão da cobertura dos torreões

As Zonas 0 e 1 possuem somente um nível 0, mas a Zona 2 tem os quatro níveis mencionados anteriormente. Embora tenham sido instalados pelo interior do edifício, todos os sensores foram representados na parte externa, conforme ilustrado na Figura 3.14, para melhor compreensão da localização.

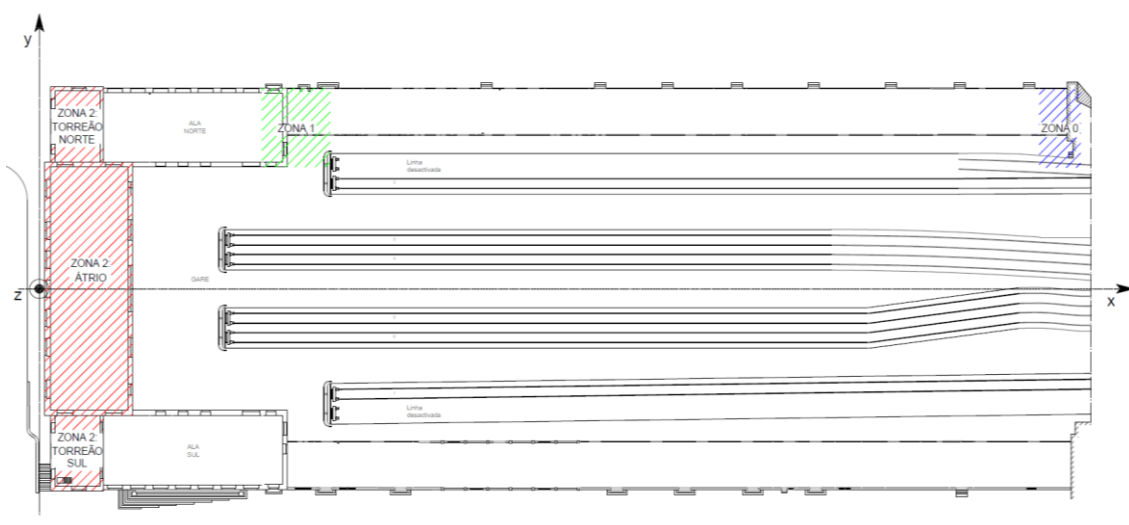


Figura 3.14 - Zonas definidas para a arquitetura de monitorização

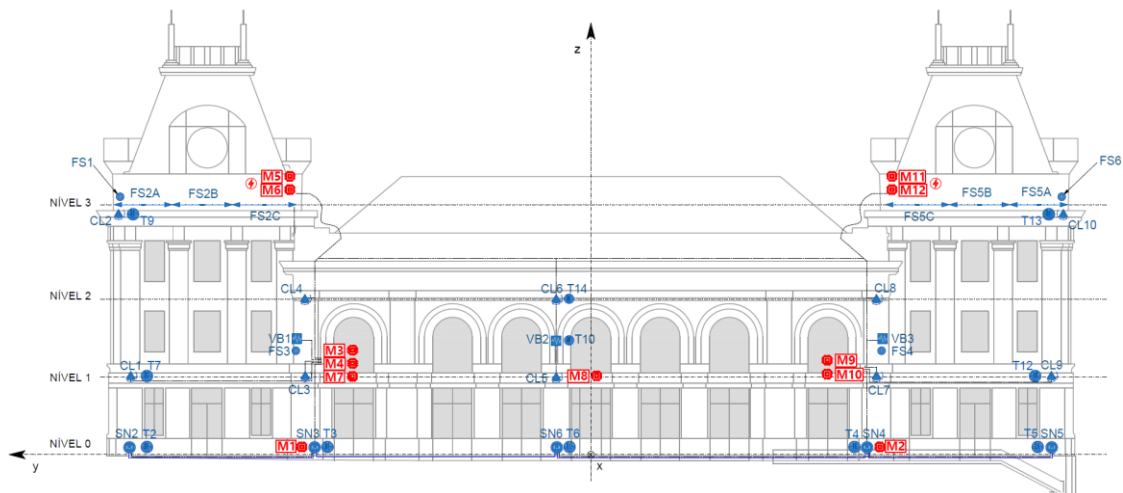


Figura 3.15 - Disposição dos níveis em altura de instalação dos sensores e respetiva localização

A equipa da FEUP adotou uma nomenclatura para identificar os sensores que inclui o tipo de sensor (“Tipo”) e o número do sensor (#). Os tipos de sensores são designados de SN (sensor de nível), FS (Fissurómetro), CL (CLinómetro), T (Termómetro) e VB (sensor de ViBração), seguidos do respetivo número # (ou designação “Ref”, para o sensor de nível referência). Cada módulo de aquisição “Mi”, a que se conectam por fio os sensores analógicos SN, FS, CL e T, possui 8 canais (Ch1, ..., Ch8). Um nó de acelerómetro, que mede a aceleração em três direções ortogonais distintas possui 3 canais diferentes (Ch1, Ch2 e Ch3), um para cada uma das medições, respetivamente, nas direções locais 1, 2 e 3. Devido à distribuição dos sensores e dos módulos de aquisição, existem módulos com canais vazios. O Anexo.1 resume as informações sobre como foram feitas as conexões.

Para interpretar os valores provenientes do sistema de monitorização, é necessário compreender algumas decisões tomadas durante a instalação:

- Nos fissurómetros, a abertura de fissuras, indicando afastamento entre pontos de medição, foi adotada com o sentido positivo.
- Os clinómetros, sendo bidirecionais e colocados todos na parede da fachada da estação, indicam rotações para fora do plano da parede (correspondente a uma rotação em torno do eixo Y que existe no plano da fachada) e no próprio plano (correspondente a uma rotação em torno do eixo X, que é perpendicular ao plano da fachada).
- O sensor de vibração é triaxial, com os eixos locais 1, 2 e 3, em que: os eixos 3 e 1 são, respetivamente, perpendicular e paralelo ao plano da parede a que o sensor está fixado, e o eixo 2 é vertical, sendo a correspondência com os eixos horizontais globais X e Y, dependente da orientação da parede em causa.

3.3. ARMAZENAMENTO E PROCESSAMENTO DE DADOS

Os dados são obtidos através dos sensores, que estão ligados por cabo a módulos de aquisição para ser realizada a conversão de analógico para digital, ou seja, de níveis de tensão para *bits*. Posteriormente, através da rede local estabelecida, esses dados são encaminhados para a *Gateway*, onde sofrem uma transformação linear do sinal medido no sensor em *bit* para a unidade física de medida correspondente, através de dois coeficientes obtidos de uma calibração previamente realizadas em laboratório e no local. De seguida, os dados são enviados via *Internet* através de uma VPN, com base em protocolos TCP/IP, para um servidor da FEUP, onde são inseridos numa Base de Dados construída em InfluxDB.

Para se assegurar que os dados pudessem ser visualizados durante o desenvolvimento do *Digital Twin* e, posteriormente, integrados no DT a fim de verificar e validar a informação disponibilizada, foi usada a aplicação Grafana para visualizar e acompanhar os dados do sistema de monitorização, sendo esta uma estratégia utilizada em projetos de monitorização [57] de estruturas; de simples montagem e prático, o Grafana permite criar *dashboards* com vários painéis de visualização de dados de forma gráfica, personalizável e fácil de entender.

A Figura 3.16 resume todo o processo de aquisição, armazenamento, processamento e visualização.

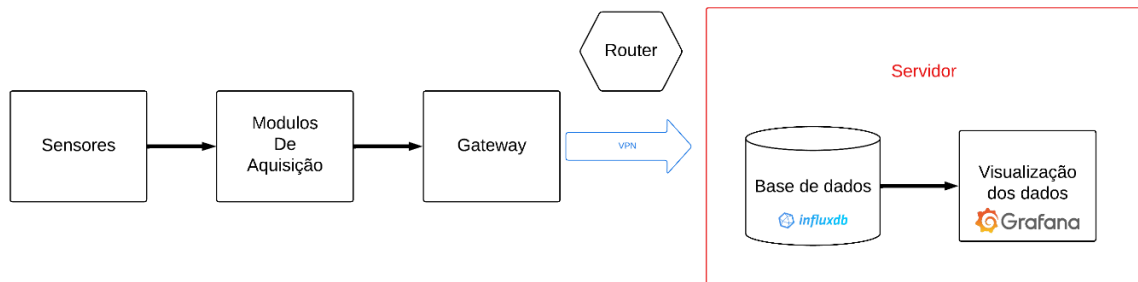


Figura 3.16 - Resumo das etapas percorridas pelos dados

3.3.1. INFLUXDB

A InfluxDB foi escolhida para ser a base de dados devido a permitir armazenar os dados num servidor sem qualquer tipo de custo, sem limite temporal e com capacidade de memória associada à capacidade do servidor.

Trata-se de uma base de dados de séries temporais, programada em linguagem GO, desenvolvida pela empresa InfluxData, e otimizada para armazenar, consultar e visualizar uma grande quantidade de dados que evoluem ao longo do tempo.

Os dados que chegam ao InfluxDB são inicialmente designados como “dados brutos” (raw data) por não passarem por nenhum tipo de pós-processamento. Para realizar o processamento dos dados são executados em tempo real *scripts* de tratamento com especificações para os diferentes tipo de sensores. Assim, para todos os dados recolhidos dos sensores, com exceção dos Sensores de Temperatura, devem ser definidos valores de referência (*offset*), uma vez que os valores brutos não apresentam significado direto para análise, pois não evidenciam a variação dos dados em relação a um estado com ausência de perturbação. O que se pretende da análise é monitorizar as variações dos parâmetros em relação a um cenário idealmente sem qualquer tipo de perturbação, sendo então possível com a subtração do *offset*, analisar o impacto direto das obras na estrutura.

No caso específico dos Fissurómetros é adicionalmente descontado o efeito da temperatura, visto que esta causa dilatação e contração da haste metálica. Aos Sensores de Nível é-lhes descontado o valor do Sensor de Nível de referência. Já os Clinómetros sofrem adicionalmente um processo de conversão de unidades, passando de grau (°) para milímetro por metro (mm/m = mrad).

Na base de dados foram criadas etiquetas para serem filtrados os dados; aos dados brutos a etiqueta remete ao Sensor ID e aos dados obtidos após o processamento é lhes adicionado o sufixo “_processado”.

Um exemplo de aplicação para serem obtidos os dados do sensor VB_2Y é apresentado na Figura 3.17.

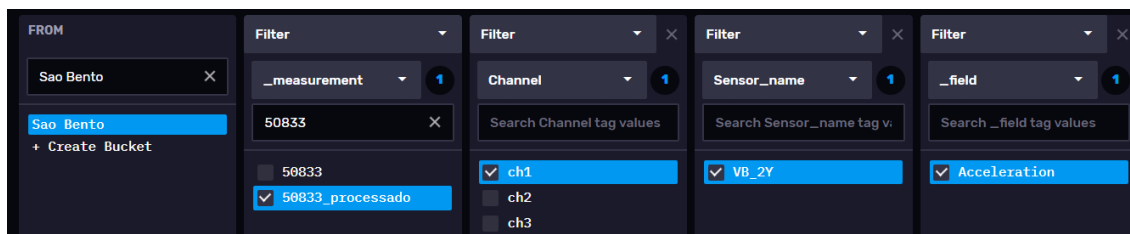


Figura 3.17 - Interface da plataforma InfluxDB para filtrar os dados

3.3.2.GRAFANA

Para a visualização dos dados, adotou-se a aplicação Grafana, uma ferramenta altamente configurável para monitorização e análise de dados em tempo real. A conexão com a base de dados InfluxDB foi configurada diretamente através do separador “fontes de dados”, adicionando uma nova fonte de dados, inserindo o URL da base de dados e os dados de acesso à conta (token, organização), garantindo uma conexão segura e direta.

Foram desenvolvidos *dashboards* para cada tipo de sensores, permitindo uma visualização clara e detalhada dos dados coletados. Cada *dashboard* foi projetado em função dos pedidos da equipa de monitorização de forma a apresentar os dados de maneira intuitiva, através de gráficos que podem ser filtrados por intervalos de tempo. A visualização em tempo real é habilitada, garantindo que os dados dos sensores sejam atualizados continuamente.

A Figura 3.18 ilustra a aplicação da plataforma Grafana, apresentando um *dashboard* composto por dois painéis dedicados aos fissurómetros e sensores de temperatura integrados no sistema de monitorização.

No primeiro painel, observa-se, mesmo sem uma análise estrutural detalhada, que as variações das aberturas não são críticas, pois não apresentam desvios significativos em relação à unidade de medida estabelecida. No entanto, para se obter uma melhor análise dos gráficos, os dados foram agregados para suavizar tendências ou flutuações de curto prazo, retirando-se valores médios ao longo de um intervalo de tempo representativo da tendência observável. O segundo painel destaca a influência que ocorre na própria estrutura decorrente das variações de temperatura nas leituras obtidas pelos fissurómetros.

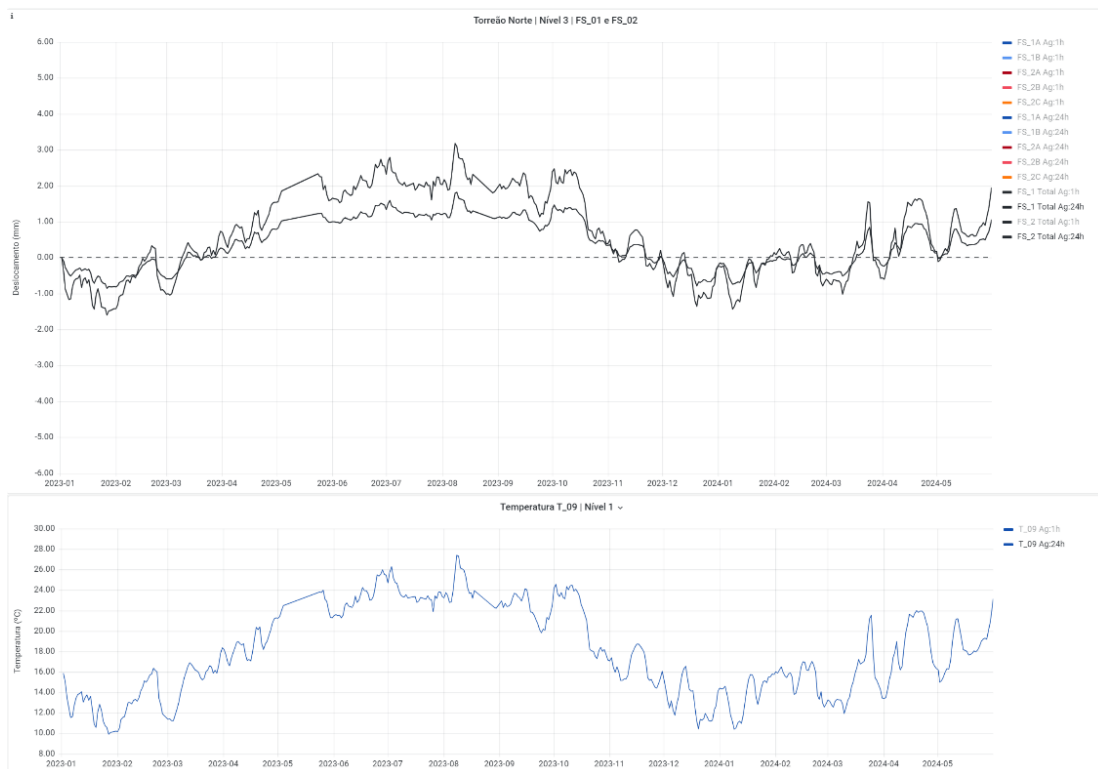


Figura 3.18 - Painéis para visualização de dados configurados na aplicação Grafana

3.4. ELABORAÇÃO DO MODELO BIM

3.4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAS

Perante o desejo de materializar um modelo virtual da Estação de São Bento, emerge a necessidade de selecionar cuidadosamente um *software* de modelação tridimensional que esteja em consonância com os requisitos específicos ao presente projeto. Entre os tais requisitos, encontra-se a criação de uma aplicação web destinada à visualização do modelo 3D, permitindo a consulta prática dos dados medidos pelos sensores por meio de gráficos. Para atender a essa necessidade torna-se indispensável a adoção de um *software* com a capacidade de exportar modelos em formato IFC. Essa funcionalidade viabiliza a troca de informação entre diferentes *softwares* e plataformas, promovendo assim uma integração eficaz dos dados.

Manifestam-se diversas opções renomeadas que visam a exportação do modelo em formato IFC, como Autodesk Revit, BlenderBIM, ArchiCAD e SketchUp. Embora este último não suporte nativamente a exportação em formato IFC, existem *plugins* disponíveis para adicionar essa funcionalidade [58]. Dada a sua maior popularidade no mercado nacional e internacional, a escolha recaiu sobre o Autodesk Revit como plataforma de modelação.

Após a seleção do *software*, é fundamental definir um plano de execução do projeto, priorizando a eficiência computacional e a funcionalidade da plataforma web. Com base no subcapítulo **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, o primeiro passo para desenvolver este plano é a definição de objetivos da implementação do BIM para executar esta tarefa, em conformidade com os objetivos do projeto, definidos no subcapítulo 1.2. Esta implementação deve conter um modelo 3D do edifício da estação e este modelo deve conter propriedades para fazer a integração dos dados medidos nos sensores com os objetos representativos dos mesmos dentro do modelo, ou seja, o foco principal do modelo será dado aos sensores incorporados.

Dado que se trata de uma monitorização de edifícios, a utilização BIM é relativa à fase de operação, mais concretamente na monitorização do desempenho do sistema do edifício. Isso envolve a aplicação de modelos analíticos e dados provenientes dos sensores de uma instalação para avaliar o seu desempenho funcional, esta definição remete ao segundo passo.

O terceiro passo consiste em identificar aspetos importantes do modelo BIM, neste caso identificar a estrutura que deve ser modelada e as propriedades que os objetos devem conter. Partindo das indicações das partes interessadas em consonância com a Norma ISO 19650, ISO 16739-1 e com a EN 17412-1, o modelo centra-se principalmente em fornecer uma representação geométrica básica da estrutura, preservando a integridade arquitetónica da estação, evitando a inclusão de elementos decorativos que possam sobrecarregar a plataforma. As propriedades contidas nos objetos modelados devem ser mínimas e adicionadas só em casos de necessidade, ou seja, os únicos objetos que devem ter propriedades adicionadas para além das geométricas são os sensores que devem possuir propriedades não geométricas para criar a ligação com a base de dados e filtrar os dados de acordo com o objeto selecionado.

Estas propriedades devem seguir os PDTs, mas ao analisar os PDTs nacionais [18] não foi possível identificar propriedades padrão para os sensores que pudessem ser implementadas neste projeto. Para tal, criam-se propriedades de acordo com o NBS BIM Object Standarts, que é o guia que os PDTs seguem para criar propriedades.

3.4.2. MODELO DE TESTE

Considerando a incerteza em relação à plataforma destinada ao desenvolvimento da aplicação web, mas reconhecendo a urgência de obter um modelo para fins de incorporação e avaliação preliminar, prepararam-se alternativas para validar o modelo e os parâmetros nele definidos, após finalizado e exportado no formato IFC. Para tal, foi utilizado o *software* BIMvision, *software* gratuito de visualização de modelos IFC.

Dada a grande dimensão da estação de São Bento, optou-se por iniciar a representação apenas do átrio central da estação com um sensor tipo, como forma de teste. Mesmo com as limitações da versão de padrão do Autodesk Revit, procurou-se executar um modelo esteticamente apelativo. Para tal, adicionou-se uma textura para revestir o interior com os característicos azulejos do edifício, adicionaram-se ornamentos ao redor das portas e portões e o telhado foi removido para facilitar a visualização do sensor. Desta forma obteve-se uma representação (Figura 3.19) dotada de uma certa semelhança com o átrio da estação com os elementos definidos de forma precisa, dimensões exatas e posições relativas corretas.

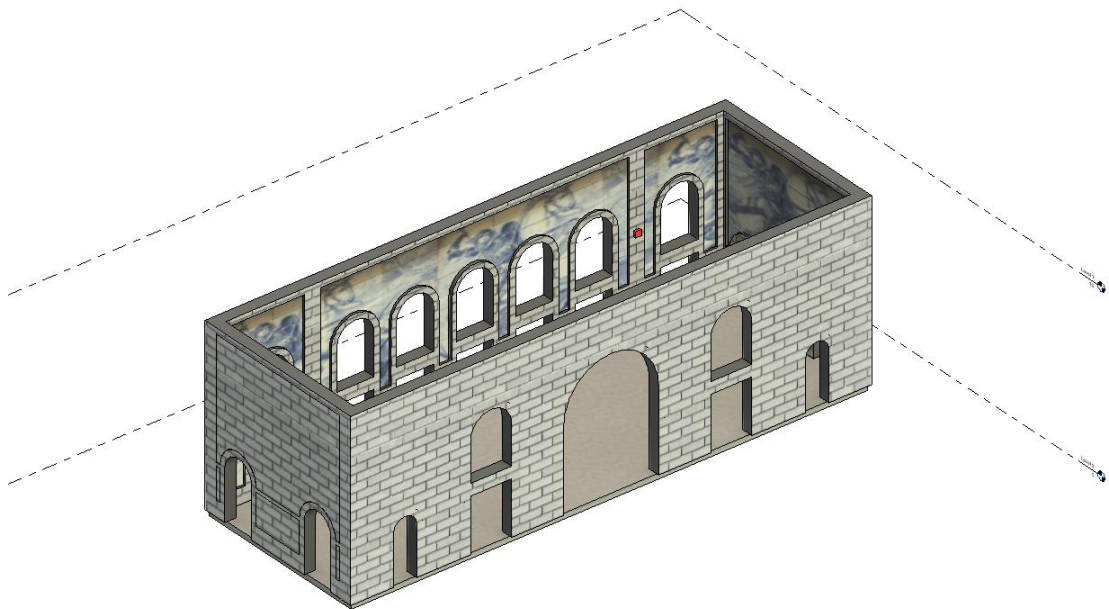


Figura 3.19 – Modelo BIM de testes

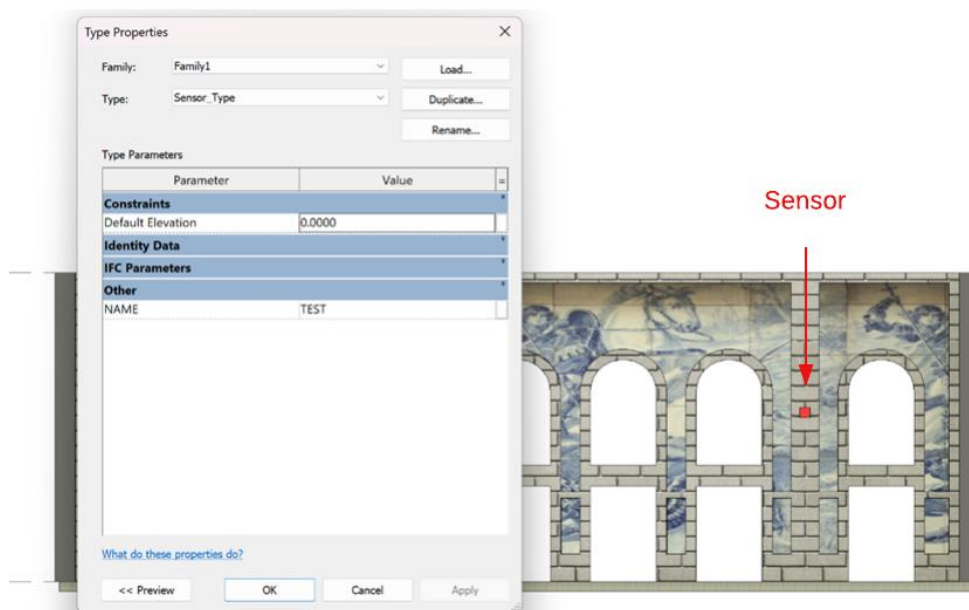


Figura 3.20 – Representação de um sensor no modelo de teste

Após construído o modelo no *software* de modelação, foi posicionado numa localização aleatória um objeto representativo de um sensor, sem grande grau de detalhe, a partir dos processos dispostos no subcapítulo 2.2.1.4. A este sensor foi atribuída uma propriedade denominada de NAME que continha um “valor” de teste (Figura 3.20). Salienta-se que nesta altura a propriedade criada ainda não estava em conformidade com NBS BIM Object Standards, que posteriormente viria a servir como chave identificadora dentro da plataforma web, permitindo a ligação à base de dados. Em seguida procedeu-se à exportação no formato IFC, para posteriormente validar o modelo teste.

De acordo com o suporte técnico da Autodesk, um método simples para exportar ficheiros para o formato IFC no Revit é através do método dos *Schedules* que envolve [59].

- Criar um *Schedule* com o nome de Psets (também pode ser designado por IFC ou Common).
- Acrescentar as propriedades que se pretende exportar ao *Schedule*.
- Configurar a exportação das propriedades para utilizar o *Schedule* como fonte, Figura 3.21 – Exportação através do método do *Schedules*.
- Finalizar a exportação.

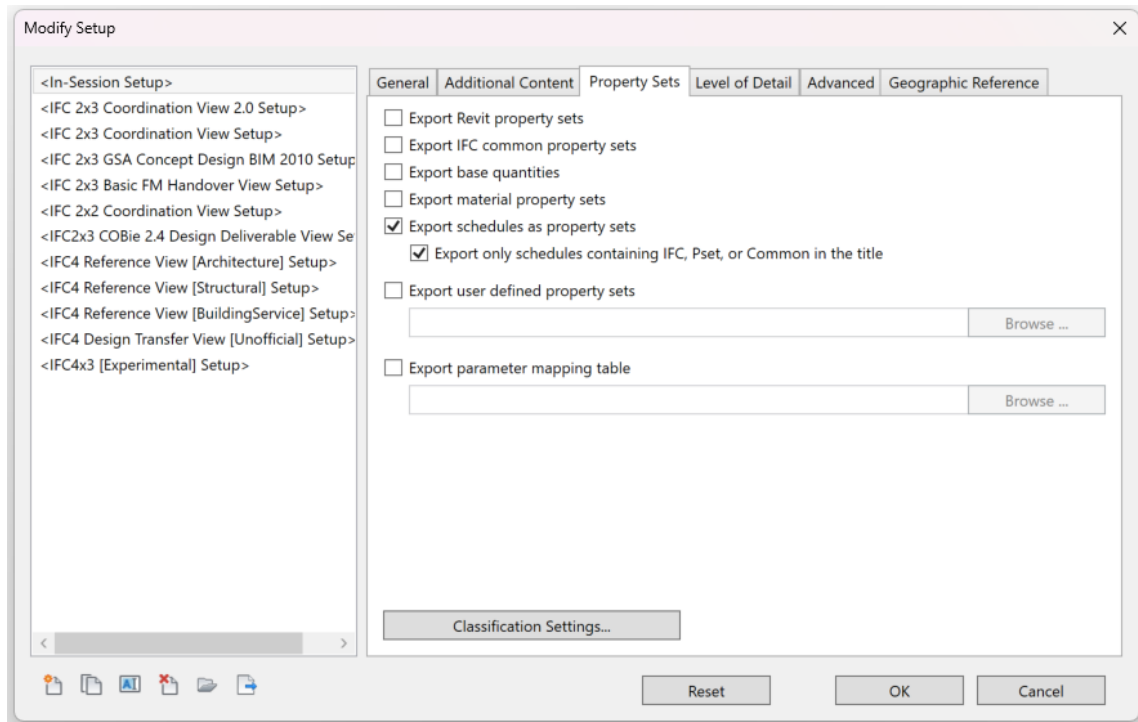


Figura 3.21 – Exportação através do método do *Schedules*

Após a conclusão e exportação realizadas, utilizou-se o BIMvision para validar o modelo de teste criado. Em primeira instância, o *software* não foi capaz de apresentar as texturas previamente adicionadas, o que comprometeu a fidelidade visual esperada. Adicionalmente, a geometria sofrera algumas distorções significativas. Apesar dessas falhas, a propriedade do sensor criada como forma de teste, foi corretamente exportada, indicando que as informações atribuídas aos elementos foram retidas corretamente (Figura 3.22).

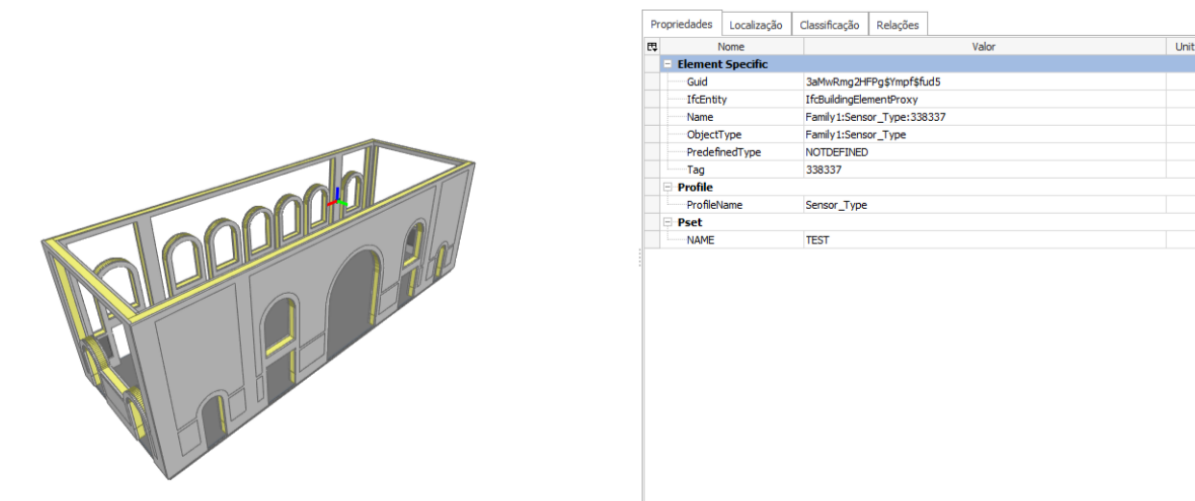


Figura 3.22 – Modelo de teste importado no BIMvision

Face a esta constatação, novas decisões precisaram de ser tomadas em relação ao nível de detalhe que iria ser adotado. Uma abordagem possível para resolver a falta de detalhes seria a criação de famílias de objetos, enriquecendo assim o modelo com elementos como portas, portões, ornamentos, entre outros. No entanto, considerando o tempo significativo que seria exigido para adicionar tais detalhes, optou-se por uma abordagem mais prática, mas ainda assim satisfatória perante os requisitos especificados inicialmente: reduzir o nível de detalhe. Noutras palavras, criar um modelo simplificado, contendo apenas a volumetria do edifício e os sensores instalados, uma vez que o objetivo é desenvolver uma aplicação web para visualização de modelos *Digital Twins*.

3.4.3. MODELO DEFINITIVO

Aproveitando-se do conhecimento adquirido anteriormente e utilizando plantas em 2D e um modelo 3D em AutoCAD, já anteriormente criadas no âmbito do projeto, foi possível desenvolver o modelo 3D com mais precisão e detalhe. Neste processo, foram incorporados os dois torreões e as alas, juntamente com os telhados e as lajes de piso, garantido assim uma representação integral e completa do objeto de estudo. Levando em conta a adição dos elementos mencionados, foi cuidadosamente planeada uma forma de representar os sensores, que, por estarem localizados no interior, seriam de difícil visualização. Esta abordagem será desenvolvida no Capítulo 4, que trata da construção da plataforma web.

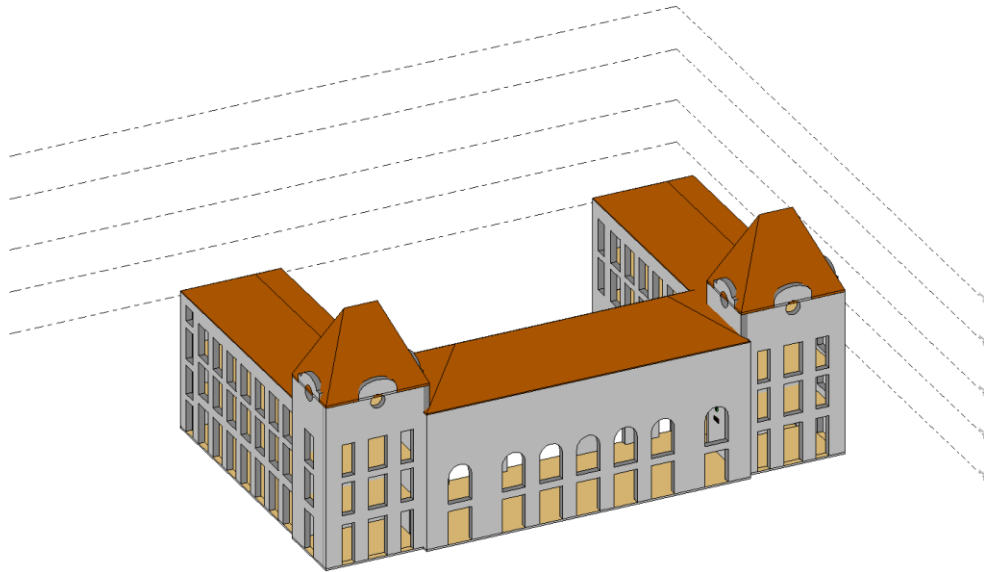


Figura 3.23 – Modelo BIM definitivo

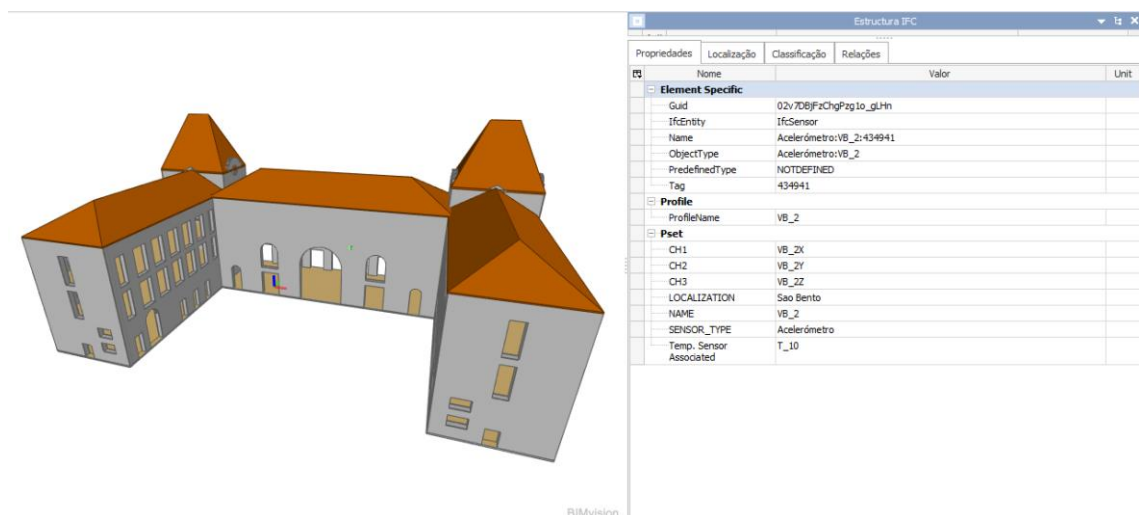


Figura 3.24 - Modelo definitivo importado no BIMvision

Em relação aos sensores, foi essencial determinar as propriedades que eles teriam, uma vez que estas estariam condicionadas pelo tipo de procedimento que seria executado posteriormente. Dado que estão interligados com os processos que seriam executados para a apresentação dos gráficos, é necessário um equilíbrio que permita encontrar a melhor solução global a partir da otimização de cada componente individual.

Com base no trabalho anterior desenvolvido e apresentado em [60] concluiu-se que os sensores deveriam ser introduzidos sob a forma de cinco classes. No Revit, estas classes assumem a forma de famílias, cada uma com propriedades específicas. Para esta correspondência será utilizado um identificador único para cada campo, ou seja, uma chave que identificará o nome do sensor, a localização e tipo de sensor. Dado que as variações de temperatura podem ter relação com os dados medidos em diversos sensores, para estes adicionou-se uma chave extra que corresponde ao sensor de temperatura que lhes está mais próximo.

O processo para a criação e introdução dos sensores estabeleceu-se da seguinte forma:

1. criação das cinco famílias em modelos genéricos de Revit, de acordo com o tipo de sensor, acompanhada pela modelação de um elemento representativo simbólico.
2. criação de uma lista de parâmetros partilhados e atribuição dos parâmetros aos sensores.
3. importação e anexação dos elementos no modelo, nos pontos de localização reais no objeto.

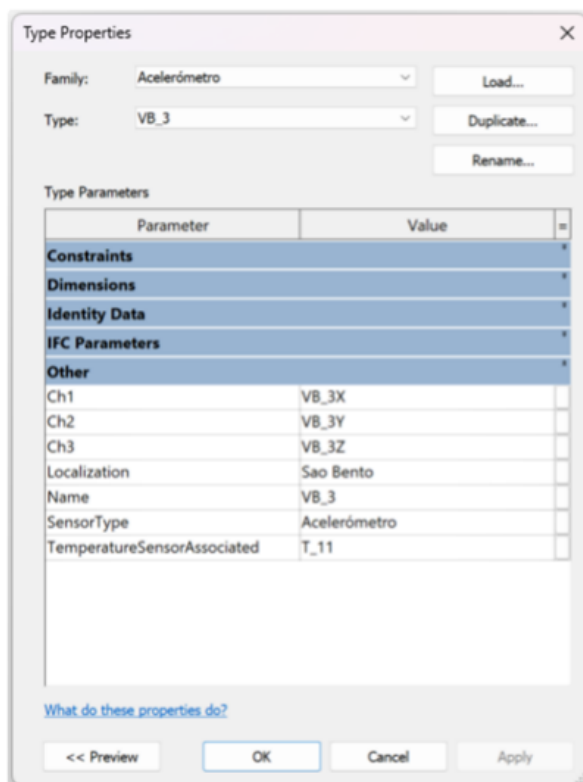


Figura 3.25 – Lista de parâmetros atribuída ao sensor VB_3 e elemento simbólico representativo do tipo de sensor






Na Figura 3.25 é visível como um objeto engloba uma família de acordo com o tipo de sensor e uma designação específica que o identifica dentro da família. Tomando como exemplo a família acelerómetro e o sensor VB_3, pode-se observar essa relação de forma clara.

Dentro do sensor, encontra-se várias propriedades organizadas em grupos. O grupo em questão é o “other” ao qual foram atribuídas as propriedades criadas, que variam de sensor para sensor. A Tabela 2 fornece detalhes sobre esta informação.

É importante referir que estas propriedades podem ser classificadas em duas categorias: parâmetro tipo ou parâmetro instância. Noutras palavras, ao colocar dois objetos da mesma família com a mesma designação, se as propriedades forem de instância, uma alteração numa delas não afetará as do outro objeto. Por outro lado, se forem de tipo, uma alteração afetará ambas. No entanto, como no modelo construído foi atribuída uma designação específica para cada sensor existente na construção, no modelo utilizou-se a classificação padrão (tipo) do parâmetro.

Em alternativa, poderia ser criada uma opção em código JavaScript, utilizando um ficheiro JSON, que contivesse toda a informação presente nos sensores e, simplesmente, associá-la aos sensores instalados num modelo. Embora esta solução permitisse cumprir de forma igualmente satisfatória os requisitos inerentes ao desenvolvimento da plataforma web, tornaria mais difícil a consulta dos parâmetros diretamente no Revit ou noutra aplicação BIM, bem como a sua representação sob a forma de *Schedules*. Assim, decidiu-se manter a opção de criar parâmetros individuais para cada propriedade prevista.

Tabela 2 - Lista de parâmetros para cada tipo de família criada

Família	Propriedade	Imagem
Termómetro	<ul style="list-style-type: none"> • Chanel1 • Localization • Name • SensorType 	
Fissurómetro	<ul style="list-style-type: none"> • Chanel1 • Localization • Name • SensorType • TemperatureSensorAssociated 	
Sensor de nível	<ul style="list-style-type: none"> • Chanel1 • Localization • Name • SensorType • TemperatureSensorAssociated 	
Clinómetro	<ul style="list-style-type: none"> • Chanel1 • Chanel2 • Localization • Name • SensorType • TemperatureSensorAssociated 	
Acelerómetro	<ul style="list-style-type: none"> • Chanel1 • Chanel2 • Chanel3 • Localization • Name • SensorType • TemperatureSensorAssociated 	

É de salientar que estas propriedades já estão em conformidade com a NBS BIM Object Standards.

4

DESENVOLVIMENTO DE UM DIGITAL TWIN

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para desenvolver uma aplicação web que possa exibir um *Digital Twin* interativo, é essencial desenvolver uma plataforma que ofereça uma representação visual detalhada e interativa do modelo 3D, juntamente com a integração dos dados gerados pelos sensores instalados no modelo em tempo real, neste caso específico, o modelo da Estação de São Bento desenvolvido no Autodesk Revit e exportado no formato aberto *standard IFC*.

A capacidade de importar modelos em formato IFC foi a primeira condição estabelecida, por se tratar de um formato aberto, assegura a interoperabilidade com diversas ferramentas e *softwares* de modelação.

A segunda foi criar uma plataforma que não envolva custos associados, sem necessidade de licenças ou de assinaturas, permitindo que instituições, investigadores e desenvolvedores possam utilizar e contribuir com a plataforma sem se preocuparem com barreira financeira. Aliado a esta premissa, a disponibilização de todo o código desenvolvido num repositório publico online, permitindo que outros desenvolvedores possam ter acesso, rever e contribuir para o código. Face a isso, a aplicação desenvolvida teria de ser abstrata, ou seja, uma aplicação que aceite adaptações e que possa ser personalizada para diferentes cenários e requisitos assegurando que a plataforma possa evoluir e seja utilizada em diversos contextos, desde projetos académicos até aplicações industriais, mantendo a capacidade de adaptação a futuras necessidades e tecnológicas.

Ao definir e perseguir estes objetivos específicos, o desenvolvimento do DT foi direcionado a criar uma plataforma acessível, colaborativa e flexível, não atendendo só às necessidades imediatas dos utilizadores, mas também estando preparada para evoluir e se adaptar a novos desafios e oportunidades.

4.2. PROCEDIMENTO PARA A CRIAÇÃO DE UMA APLICAÇÃO

4.2.1. REQUISITOS E TAREFAS PRELIMINARES

Para materializar tal aplicação foi imperativo estabelecer um ambiente de trabalho onde as tarefas seriam realizadas. Utilizou-se Visual Studio Code (VSC), um editor de código-fonte desenvolvido pela Microsoft. Este programa, largamente utilizado por programadores, permite escrever e depurar código em várias linguagens de programação. Através do terminal ou linha de comandos instalou-se o Node.js. Esta ferramenta simplifica a instalação, atualização e gestão de bibliotecas e dependências em projetos JavaScript. Além disso, aproveitou-se a oportunidade para instalar o React e o Vite, duas bibliotecas utilizadas para criar aplicações web.

O React é uma biblioteca JavaScript para a construção de *user interfaces* (UI), permitindo a criação de componentes reutilizáveis que facilitam a construção de aplicações web dinâmicas e interativas. O Vite, por sua vez, é uma ferramenta de construção que cria um servidor local para desenvolvimento, *localhost*, e configura o projeto para *Hot Module Replacement* (HMR), permitindo ver as mudanças em tempo real enquanto o código sofre alterações. Quando instalado cria um ficheiro “vite.config.js” que torna simples realizar o processo de definir uma porta de acesso. O servidor será ligado pelo terminal através do comando “npm run dev” de acordo com a porta desejada.

A partir deste momento estão disponíveis todas as ferramentas para iniciar a criação da aplicação web. O resumo das várias etapas apresenta-se de seguida, na Figura 4.1.

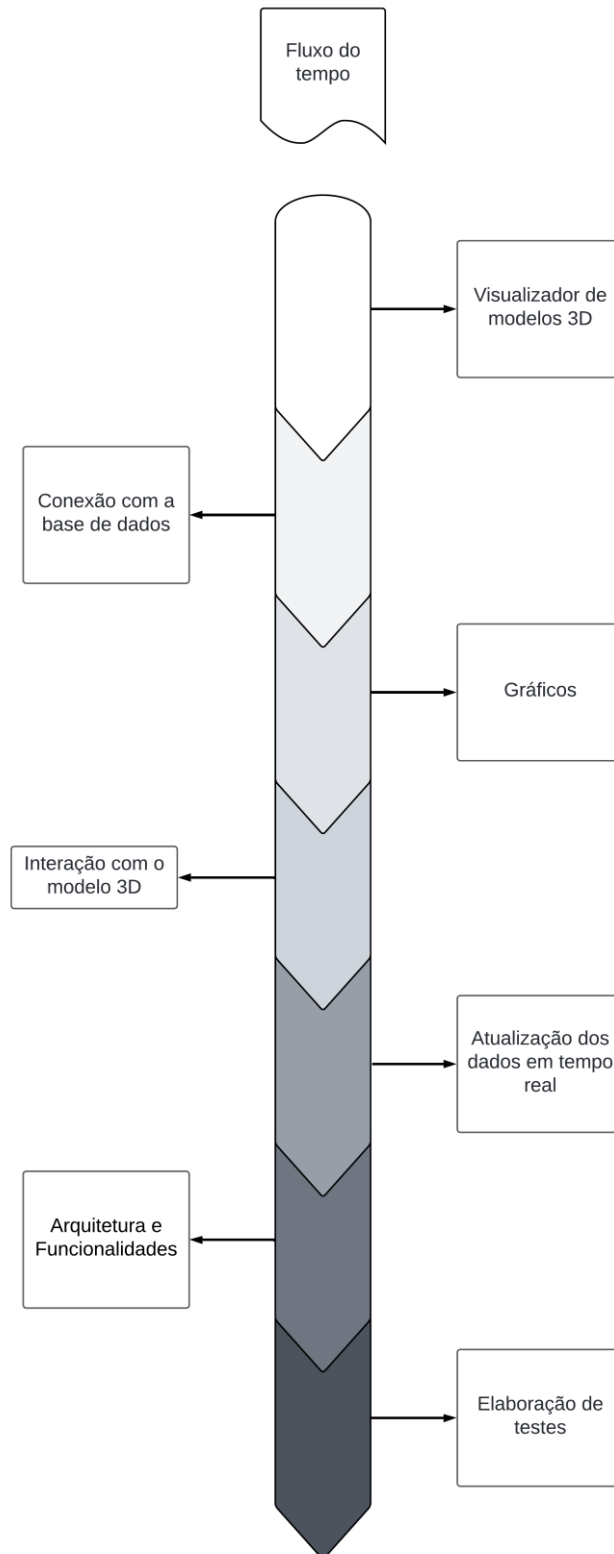


Figura 4.1 – Resumo das etapas percorridas para a criação da plataforma web

4.2.2. CRIAÇÃO DE UM VISUALIZADOR DE MODELOS 3D

O processo de criação de um visualizador de modelos 3D começou pela procura de aplicações existentes no mercado, como Autodesk Platform Services, Microsoft Azure *Digital Twins* e Bentley iTwin Platform. No entanto, estas não atendiam completamente com os critérios estabelecidos, que incluíam ser código aberto, suportar implementação de modelos IFC e ser gratuita. Para serem cumpridos tais critérios, foi necessário procurar bibliotecas de código.

Inicialmente encontrou-se uma biblioteca chamada de Xeokit, mas teve de ser descartada dado que obrigava a conversão do modelo em IFC para um novo formato XKT e que não se queria forçar o utilizador a passar por este processo de conversão. Optou-se então por utilizar a biblioteca Web-IFC-viewer [61], desenvolvida pela That Open Company, que disponibiliza um código aberto bastante extenso, complexo e com poucos guias de apoio, que criou dificuldades relativas à interação dos dados com o modelo.

Com o decorrer dos trabalhos, a That Open Company disponibilizou uma biblioteca de mais simples utilização, a Open BIM Components, com um conjunto de ferramentas denominadas *components*, que facilitam o processo de criação de uma aplicação BIM, com foco na construção de interfaces de utilizador em páginas web. Esta biblioteca apresenta um guia para criadores que se revela fundamental para os processos desenvolvidos e descritos nesta fase da dissertação.

Para uma compreensão mais detalhada da abordagem e da forma como é utilizada na aplicação, recomenda-se a leitura mais completa da documentação em [62].

A Open BIM Componentes apresenta-se como uma escolha ideal para o desenvolvimento de *Digital Twins* por uma série de razões. Por se tratar de uma biblioteca de código aberto, proporciona a flexibilidade necessária para modificar e adaptar o código conforme os requisitos de cada projeto, personalizando tanto a aparência como o comportamento dos modelos 3D. Apresenta um guia detalhado e uma ampla gama de recursos, juntamente com exemplos de funcionamento, o que permite aos desenvolvedores explorarem rapidamente as funcionalidades disponíveis e integrá-las nos projetos com facilidade. Sustentado por uma comunidade ativa de desenvolvedores e utilizadores, oferece um ambiente propício para partilha de conhecimento e experiências. Esta rede de apoio facilita a resolução de problemas, a identificação de soluções e a colaboração no aprimoramento contínuo da biblioteca.

4.2.3. CONEXÃO COM A BASE DE DADOS

Segundo os fóruns da própria base de dados, InfluxDB, uma vez instaladas as dependências necessárias, ou seja, as bibliotecas e a definição das variáveis ambiente, que incluem um Token, um URL e uma Organização, a conexão pode ser criada [63].

Estas configurações foram incluídas num ficheiro ".env", que serve de arquivo de configuração destinado a guardar de forma segura e organizada as variáveis de ambiente. Desta forma, o código pode carregar automaticamente estas variáveis durante a execução, o que simplifica a gestão das credenciais e dos parâmetros de configuração.

4.2.4. APRESENTAÇÃO DOS DADOS E INTERAÇÃO COM O MODELO

Visualizar os dados torna-se fundamental após obtido o acesso aos mesmos, sendo necessário que esta apresentação seja simples e de fácil compreensão. Recorrer à utilização de gráficos é altamente recomendado em diversas áreas de estudo, como Negócios, Ciência e pesquisa ou Marketing. Tal abordagem não só facilita a compreensão e análise de informações complexas, como também promove uma comunicação eficaz e suporta a tomada de decisões baseadas em dados. Para tal, foi instalada uma biblioteca específica para desenhar gráficos, nomeadamente a Plotly.js [64].

Um fator decisivo para a escolha do plotly.js ao invés das outras bibliotecas de geração dos gráficos foi a sua documentação detalhada e exemplos abrangentes, que facilitam a aprendizagem e a utilização da biblioteca. Além disso, os gráficos criados são interativos por padrão, oferecendo funcionalidades como *zoom*, *pan*, *hover* e *autoscale*.

4.2.5. INTERAÇÃO COM O MODELO

Os dados são obtidos através de consultas ao InfluxDB, realizadas por meio de *queries* definidas em função de propriedades internas dos sensores, conforme detalhado em 3.3.1, e da seleção de um intervalo de tempo (Figura 4.2). Esta escolha deverá ser feita pelo utilizador, através de uma interface intuitiva, clicando no sensor desejado diretamente no modelo 3D e inserindo o período temporal de interesse. Desta forma os dados serão filtrados.

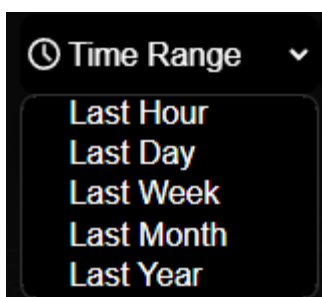


Figura 4.2 – Lista de opções para a seleção do Time Range

A Figura 4.3 descreve as etapas realizadas pelo código para obter os gráficos, partindo do ponto em que já se encontra selecionado o sensor e definido o intervalo de tempo.

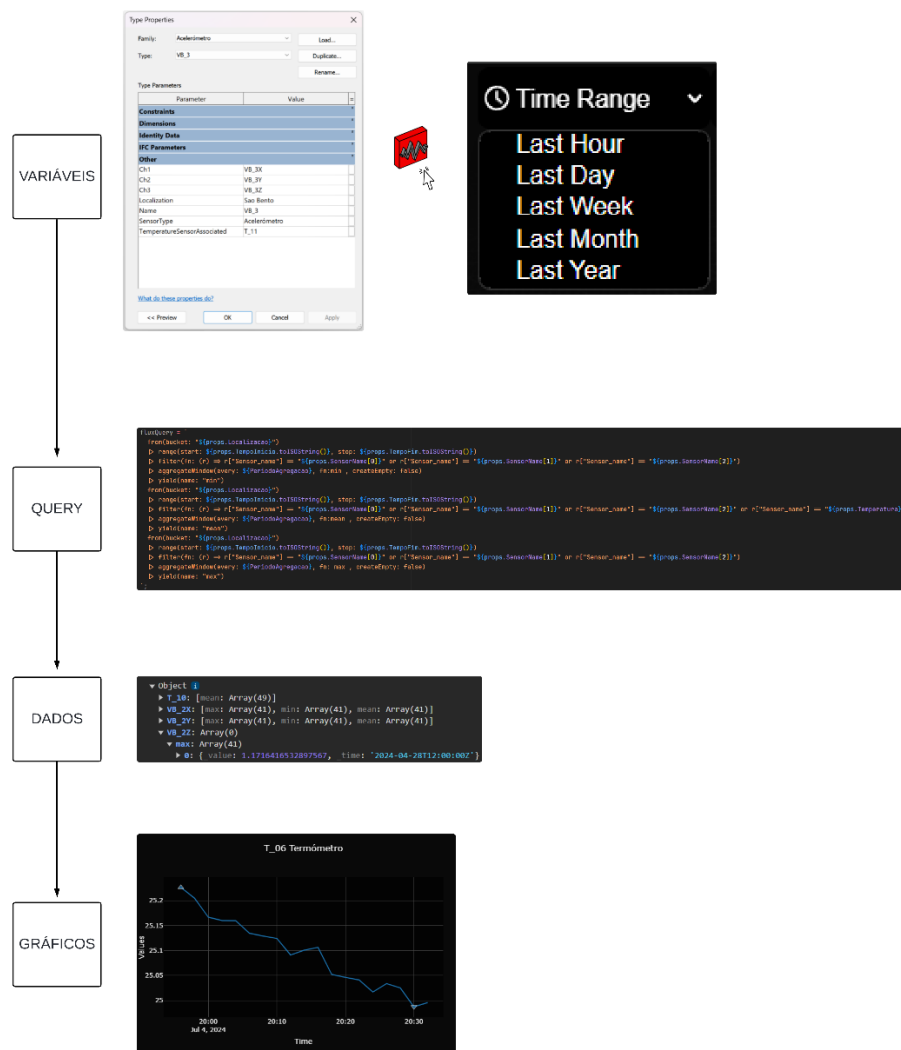


Figura 4.3 – Fluxograma do processo realizado pelo código

4.2.6. ATUALIZAÇÃO DOS DADOS EM TEMPO REAL

A plataforma deverá atualizar os dados dos sensores em tempo real, garantindo que as informações exibidas sejam sempre atuais e precisas. Para tal ser produzido, criou-se um cronómetro na aplicação. Quando o utilizador define o fim do intervalo de tempo como *now* (agora), o cronómetro inicia a contagem e, ao fim do tempo de atualização selecionado, novas consultas à base de dados são realizadas. O utilizador pode selecionar o tempo de atualização perante a lista de opções fornecida, a qual foi criada com base em testes realizados. Durante esses testes, observou-se que taxas de atualização muito baixas causavam problemas na obtenção dos dados. Em alguns momentos, os dados não apareciam, dado que o volume de dados era tão grande que quando eles chegavam, novas consultas já estavam a ser executadas.

Como resultado desses testes, o tempo mínimo de atualização foi estabelecido em 1 minuto, para garantir que a plataforma possa lidar eficientemente com o volume de dados e manter a precisão das informações em tempo quase-real. A Figura 4.4 ilustra a lista de opções selecionadas.

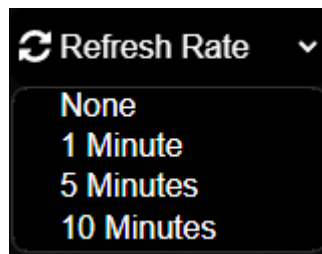


Figura 4.4 – Lista de opções para o Refresh Rate

4.2.7. ARQUITETURA E FUNCIONALIDADES DA APLICAÇÃO

Após obtidos os *scripts* de código foi necessário pensar e executar uma forma para a organização e funcionamento da aplicação web, tendo em mente a perspetiva do utilizador e as sugestões dadas pelos orientadores. Partiu-se da ideia de ter o visualizador na janela principal acompanhado por um menu de funcionalidades. Quando ativadas, estas funcionalidades, aparecerem em janelas secundarias, exceto quando dizem respeito à alteração direta da visualização do modelo.

Desta forma, criou-se o seguinte menu (Figura 4.5) com quatro funcionalidades base:

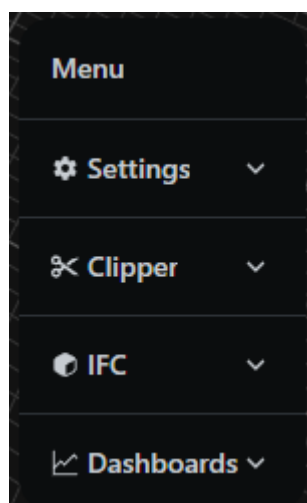


Figura 4.5 – Lista de funcionalidades da aplicação

- *Settings* (Figura 4.6) – Esta funcionalidade permite ao utilizador modificar a cor de fundo da aplicação e ajustar a luminosidade do modelo.

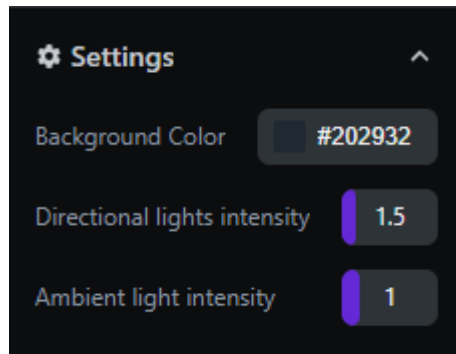


Figura 4.6 - Settings

- *Clipper* (Figura 4.7) - Esta funcionalidade permite ao utilizador criar planos de corte no modelo através de um duplo clique sobre o mesmo. O utilizador pode optar por ativar ou desativar a criação de planos de corte, bem como escolher torná-los visíveis ou invisíveis. Adicionalmente, é possível definir propriedades dos planos, como cor, tamanho e opacidade. Os planos de corte podem ser eliminados individualmente, selecionando-os e pressionando a tecla "Delete" ou "Backspace", ou em conjunto, utilizando o botão "Delete all", que remove todos os planos de uma vez só.

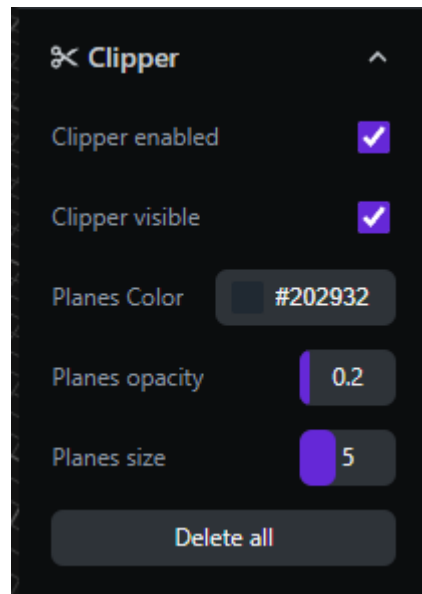


Figura 4.7 – Clipper

- IFC (Figura 4.8) – A presente funcionalidade permite ao utilizador importar modelos IFC a partir do seu próprio computador. Além disso, oferece a possibilidade de visualizar o mapa dos modelos importados, bem como de ocultar ou eliminar qualquer modelo conforme necessário. Oferece também a possibilidade de visualizar as propriedades contidas nos modelos.

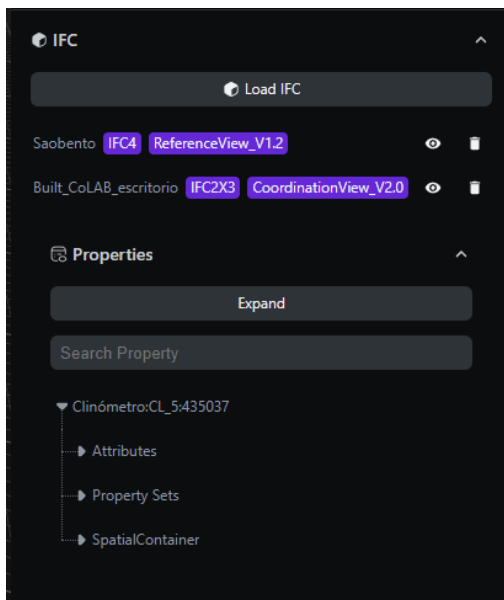


Figura 4.8 - IFC

- *Dashboards* (Figura 4.9) – Esta funcionalidade permite ao utilizador ativar ou desativar o painel de visualização de gráficos. Através deste painel, o utilizador pode selecionar o intervalo de tempo (Time Range), que corresponde à janela de dados que pretende visualizar em conformidade com os registos armazenados na base de dados, e a frequência de atualização (Refresh Rate), que se traduz na periodicidade de atualização de dados em ciclos com a duração selecionada. Após selecionar estas opções, é possível enviar um pedido à base de dados para apresentar os gráficos através do botão “Submit” (Figura 4.9).

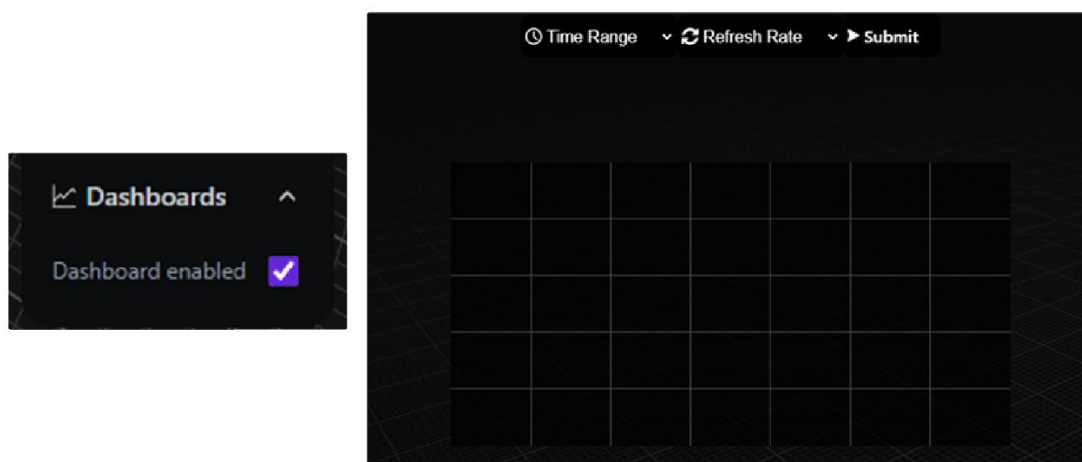


Figura 4.9 – Dashboards

4.2.8. ELABORAÇÃO DE TESTES

A fase de teste teve como objetivo verificar o funcionamento da aplicação web desenvolvida. O primeiro objetivo foi confirmar se a aplicação era capaz de implementar e exibir corretamente o modelo 3D, construído no capítulo anterior. Isto envolveu avaliar se o modelo era carregado com precisão, se a renderização estava correta e se a interatividade com os modelos estava a funcionar conforme o esperado. A Figura 4.10 ilustra o resultado obtido. O modelo foi importado de maneira precisa e as propriedades dos elementos foram devidamente interpretadas conforme se constata na Figura 4.11 em comparação com a imagem capturada no *software* BIMvision, Figura 3.24.

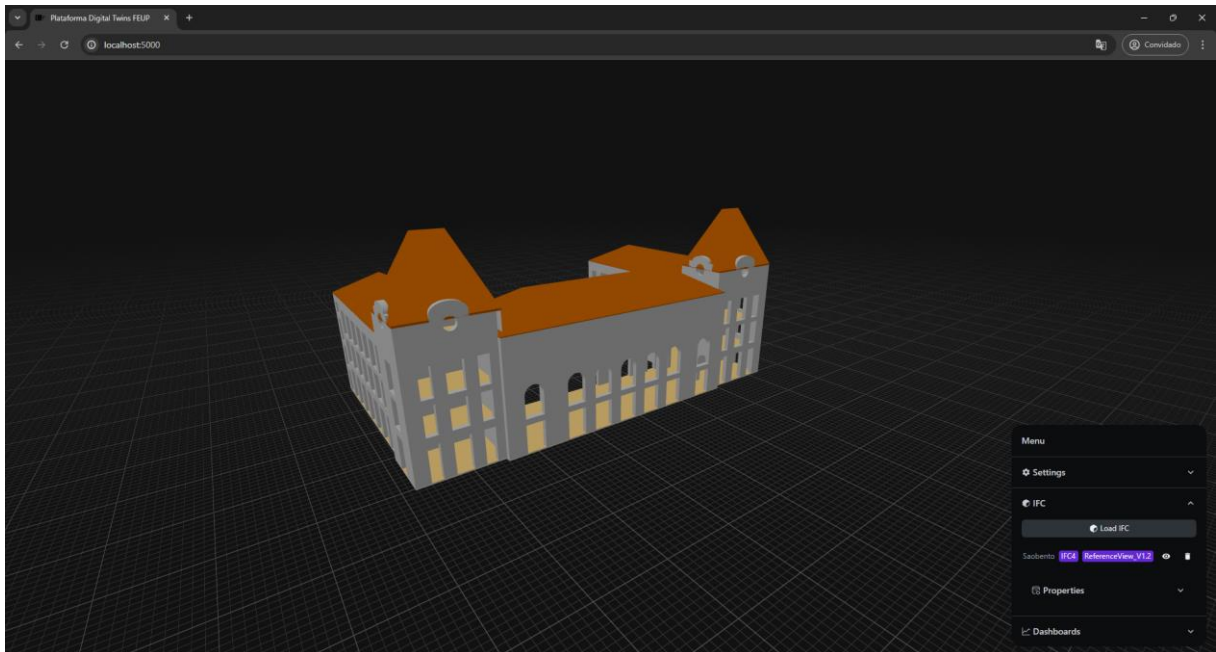


Figura 4.10 - Aplicação web com o modelo BIM

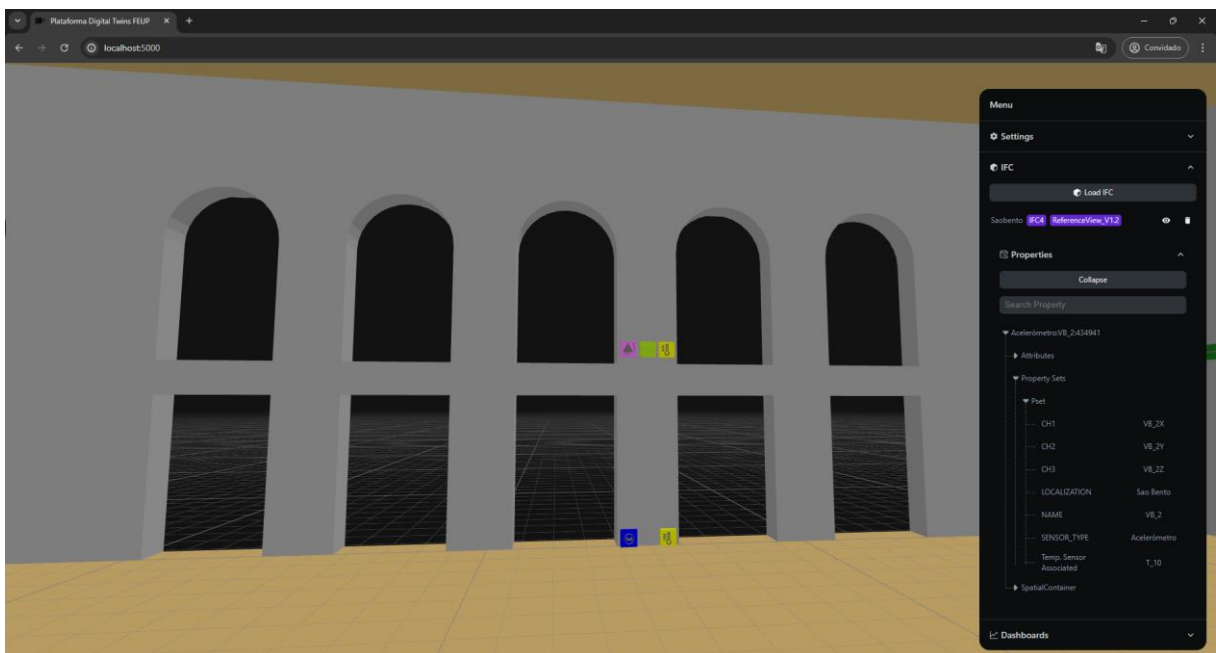


Figura 4.11 – Propriedades do sensor VB_2X importadas na aplicação

Além disso, a fase de teste concentrou-se na verificação da capacidade de a aplicação para produzir gráficos interativos. Isto inclui desde a análise da precisão dos dados exibidos até às funcionalidades de zoom e transferência de imagens em formato PNG, bem como a capacidade de interação com os sensores e a atualização dos mesmos em tempo real, incluindo a marcação dos máximos e mínimos nos gráficos, através das setas para cima e baixo, respetivamente. As duas imagens seguintes apresentam a relação entre o resultado obtido (Figura 4.12) e a representação no Grafana (Figura 4.13).

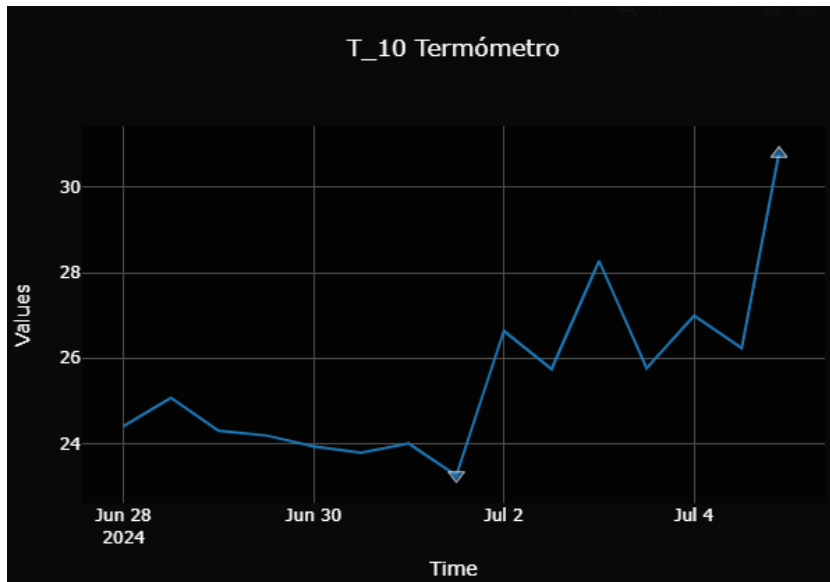


Figura 4.12 – Gráfico obtido na plataforma web desenvolvida

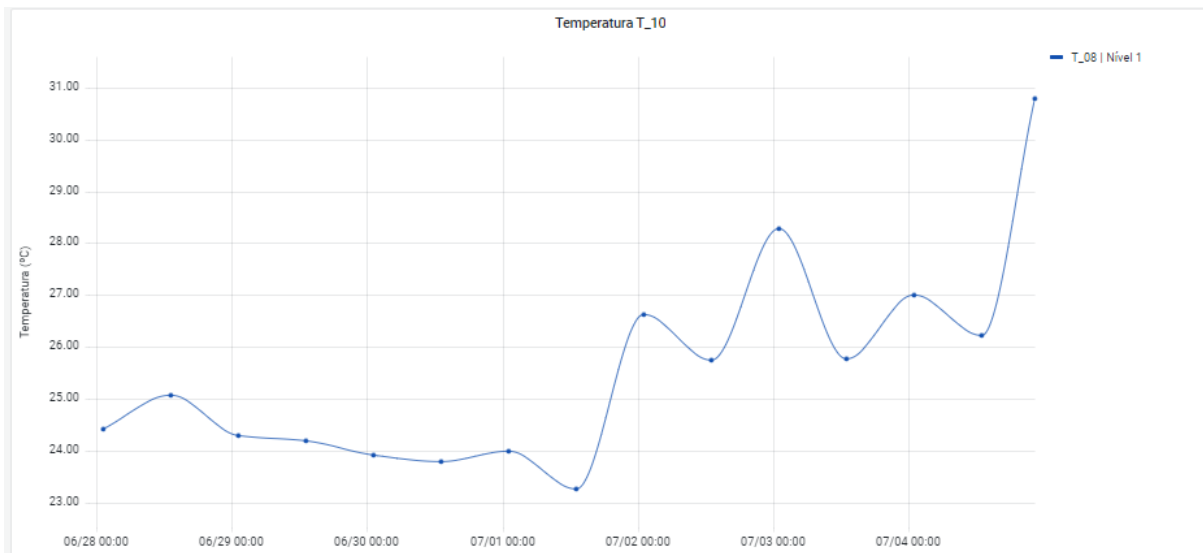


Figura 4.13 - Gráficos obtido no Grafana

Para além desses aspetos, a fase de teste também abordou a funcionalidade do *Clipper* e *Settings*.

A Figura 4.14 representa a forma como o *Clipper* foi implementado e sua capacidade de ajustar visualmente o modelo conforme necessário. Esta funcionalidade é fundamental para possibilitar a visualização de elementos de difícil acesso, adaptando o plano de corte conforme as necessidades do utilizador.

Por sua vez, a Figura 4.15 demonstra as opções de configuração (*Settings*), as quais oferecem a capacidade de ajustar não apenas a cor de fundo do modelo, mas também a sua luminosidade. Estes ajustes dão liberdade ao utilizador para personalizar a visualização com diferentes condições de iluminação e ambiente.

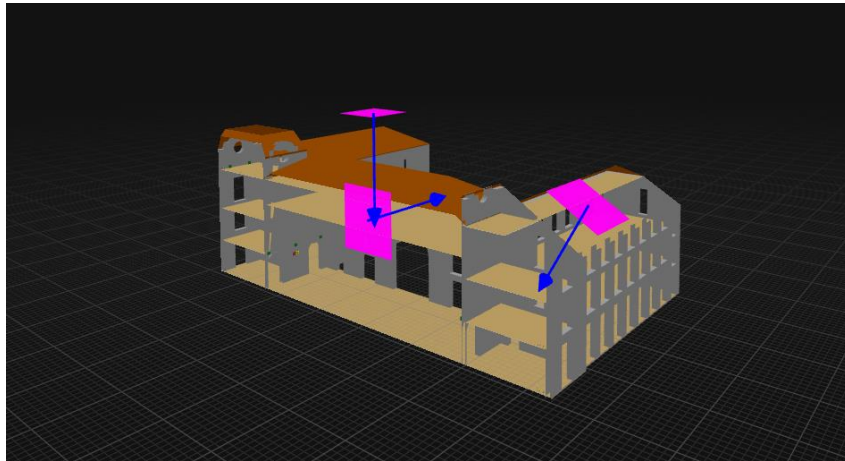


Figura 4.14- Modelo com diferentes planos de corte

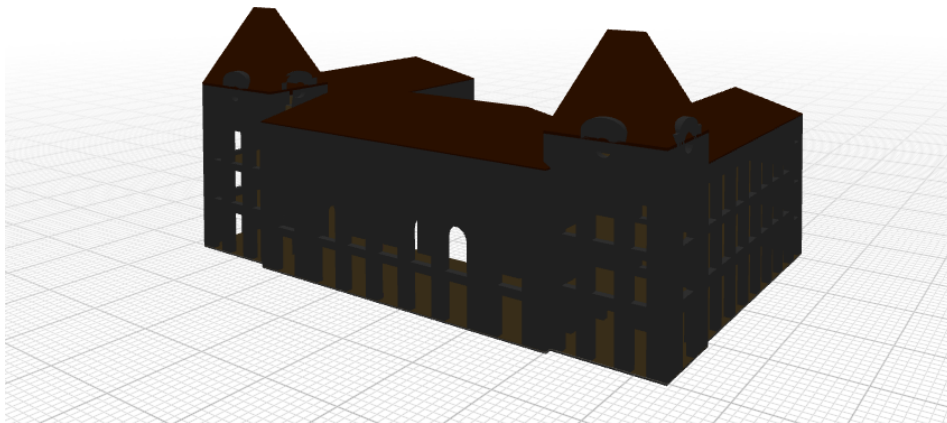


Figura 4.15 – Modelo com diferente iluminação e cor de fundo

Dessa forma, a aplicação foi submetida a uma avaliação abrangente para garantir não apenas a precisão e a fidelidade na representação do modelo 3D, mas também para verificar todas as funcionalidades interativas e de análise de dados implementadas. Este processo não apenas validou a implementação técnica conforme planeado, mas também assegurou que a aplicação estava pronta para ser utilizada de maneira eficaz e confiável pelos utilizadores finais.

4.3. DISPONIBILIZAÇÃO DA APLICAÇÃO

Uma vez a aplicação criada e após a conclusão de todo o processo de controlo, deverá ser transferido para um servidor remoto alojado na FEUP. Desta forma, será garantido o acesso a qualquer utilizador (docente, investigador, estudante) interessado e devidamente credenciado.

Alem disso, foi criado um repositório no GitHub, uma plataforma de hospedagem de código-fonte e desenvolvimento de *software* colaborativo, para conceder o acesso a qualquer utilizador interessado. O repositório no GitHub permitirá assim que colaboradores possam visualizar, contribuir e sugerir melhorias ao código, assegurando a evolução contínua do projeto. Documentação detalhada e instruções de utilização também foram incluídas no repositório, facilitando a compreensão e o uso da aplicação por todos os interessados. Também está disponível o modelo 3D da estação e as famílias do Revit, caso sejam necessárias para implementação em outro modelo. Este método de distribuição e colaboração garante que o desenvolvimento do *software* permaneça transparente, acessível e usufruído pela comunidade académica e de desenvolvedores em geral.

O repositório pode ser acedido em:

https://github.com/Emanuel2001/Digital_Twin_FEUP_BUILT_CoLAB.git

5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. CONCLUSÕES

Ao longo deste trabalho procurou-se desenvolver uma aplicação web que permite a visualização de modelos 3D e a leitura dos dados dos sensores representados no modelo, criando-se assim um *Digital Twin* para a monitorização de estruturas.

Os resultados obtidos revelaram o potencial dos *Digital Twins* na forma como é feita monitorização estruturas. A aplicação desenvolvida demonstrou ser capaz de proporcionar uma visualização intuitiva em tempo real dos dados provenientes dos sensores, destacando-se dos métodos tradicionais de monitorização devido à visualização em 3D da disposição dos sensores. A visualização em 3D dos sensores proporcionou uma compreensão mais clara e detalhada das condições estruturais em tempo real, facilitando a tomada de decisões informadas. Isso pode auxiliar a manutenção preditiva e a gestão de infraestrutura, especialmente em estruturas complexas.

Apesar de tudo, para projetos de menor dimensão, a adoção de abordagens mais simples, como painéis gráficos para visualização dos dados, pode ser mais viável e prática para a monitorização estrutural, tendo em conta a redução da complexidade técnica e dos recursos necessários envolvidos.

Em termos gerais, o desenvolvimento desta aplicação revelou conter vários desafios significativos, dado que estabelece uma ponte entre duas disciplinas da engenharia: informática e civil. Para ser desenvolvido um *Digital Twin* para monitorização estrutural é imperativo associar sempre um objeto de estudo equipado por sensores de monitorização. No entanto, um engenheiro informático recém-formado poderá não possuir as competências necessárias para orquestrar e implementar um sistema de monitorização, assim como interpretar os dados adquiridos. Por outro lado, a complexidade técnica envolvida para o desenvolvimento de tal tecnologia apresenta uma barreira para um estudante de engenharia civil, dado que, durante o percurso académico existe falta de a oportunidade para adquirir conhecimentos em programação, desenvolvimento web e/ou tecnologias específicas de *Digital Twin*, esta limitação inicial pode ter afetado o desenvolvimento do progresso do projeto. Este trabalho enfatiza a necessidade de colaboração entre engenheiros civis e informáticos, a interdisciplinaridade é crucial para o desenvolvimento eficaz de *Digital Twins*.

Neste contexto, é pertinente discutir a classificação desta aplicação como um *Digital Twin*. Alguns autores argumentam que, devido ao fluxo de informação ser unidirecional, ou seja, sem a capacidade de atuar diretamente no ativo físico a partir do modelo digital a aplicação desenvolvida se enquadra melhor na definição de um *Digital Shadow*. No entanto, para fins desta tese, optou-se por utilizar o termo mais abrangente *Digital Twin*. Esta escolha justifica-se pelo objetivo de representar a estrutura física e monitorizar seus dados em tempo real, alinhando-se com a visão geral de *Digital Twins* como representações digitais detalhadas e dinâmicas de objetos físicos.

Concluiu-se que é necessário um estudo detalhado para idealizar o caminho de implementação desta tecnologia. Este trabalho não só contribui com novos pontos de vista práticos, mas também estabelece uma base para que outros investigadores e profissionais possam explorar e contribuir para o desenvolvimento contínuo dos *Digital Twins* neste campo específico.

Para que essas contribuições se transformem em implementações práticas e efetivas, recomenda-se a criação de protocolos padrão para a instalação e integração de sensores, bem como o desenvolvimento de plataformas web robustas que possam suportar a visualização em 3D e a análise de dados em tempo

real. A adoção de tecnologias de código aberto e a colaboração com especialistas em ciência de dados podem facilitar a implementação e reduzir custos.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Embora os objetivos tenham sido alcançados, existe sempre margem para ir mais além. O desenvolvimento de uma aplicação web deste género nunca pode ser considerado verdadeiramente concluído, devido às limitações de tempo houve diversas funcionalidades planeadas que não puderam ser implementadas na aplicação. Esta restrição de tempo impediu a incorporação de melhorias e recursos adicionais que poderiam ter proporcionado ao utilizador uma experiência superior, tais como:

- Conexões com diferentes bases de dados – implementar uma funcionalidade onde os utilizadores possam configurar os detalhes da conexão com a base de dados escolhida.
- Criação e Adição de Famílias de sensores – permitir que os utilizadores criem e adicionem famílias de sensores diretamente na plataforma, é importante garantir que os parâmetros necessários para realizar as consultas à base de dados estejam bem definidos e incorporados.
- *Heat Maps* – implementar o sistema de mapas de calor para visualizar a distribuição dos dados em uma determinada área do modelo, desta forma os utilizadores poderão identificar facilmente áreas específicas do modelo que requerem atenção.
- Sistema de Contas – desenvolver um sistema de autenticação seguro para que os utilizadores possam criar contas personalizadas, para que possam fazer upload e armazenar os seus modelos 3D em serviços *cloud*.
- Sistema de Navegação – integrar os modelos BIM sobre mapas para se realizar uma visualização geoespacial, desta forma ajudando o utilizador a navegar entre os modelos e a entenderem a localização física dos mesmos.
- Métodos de análise de dados – utilizar Inteligência Artificial e *Machine Learning* para preverem comportamentos futuros com base nos dados dos sensores.
- Cálculo de deformadas – semelhante ao que encontra em ferramentas de calculo estrutural, onde se aplicam forças ao modelo e visualizam-se as deformações resultantes. Neste caso iria-se usar os dados medidos pelos sensores para produzir tais deformações no modelo 3D.

Já no que diz respeito ao modelo BIM criado e carregado na plataforma, pode ser melhorado até alcançar uma representação perfeita da geometria da Estação de São Bento. Poderia também ser adicionado elementos moveis ao modelo, como comboios e pessoas, de modo a conferir-lhes movimento e dinamismo na plataforma.

Com todos os pontos acima enumerados podem potenciar novos trabalhos de desenvolvimentos adicionais interessantes e úteis. No entanto, a aplicação destas tecnologias representa um desafio significativo a considerar.

Este trabalho estabelece uma base para futuros desenvolvimentos que podem explorar a integração de inteligência artificial para análise preditiva, o uso de realidade aumentada para visualização de dados e a criação de normas para a interoperabilidade de sistemas de *Digital Twins*. Pesquisas futuras também podem investigar a adaptação desta tecnologia para diferentes tipos de estruturas e ambientes.

Ao compreendermos melhor os desafios e as possibilidades apresentadas, podemos orientar eficazmente o futuro desta tecnologia promissora na engenharia e monitorização estrutural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Mishra, M., «Machine learning techniques for structural health monitoring of heritage buildings: A state-of-the-art review and case studies», 2021.
2. <https://syrian-heritage.org/about-us/built-heritage-documentation/catalogue-of-damage/>, (acedido: jun. 16 2024)
3. Arêde, A. and A. Costa, «Inspeção e Diagnóstico Estrutural de Construções Históricas», 2002.
4. Keshmiry, A., et al., «Effects of Environmental and Operational Conditions on Structural Health Monitoring and Non-Destructive Testing: A Systematic Review», 2023.
5. Roseiro, J.R.F., «Causas anomalias e soluções de reabilitação estrutural de edifícios antigos: estudo de caso»,
6. Shokravi, H., et al., «Health Monitoring of Civil Infrastructures by Subspace System Identification Method: An Overview», 2020.
7. Scuro, C., et al., «Internet of Things (IoT) for masonry structural health monitoring (SHM): Overview and examples of innovative systems», 2021.
8. Mishra, M., P.B. Lourenço, and G.V. Ramana, «Structural health monitoring of civil engineering structures by using the internet of things: A review», 2022.
9. Bassil, A., «Distributed Fiber Optics Sensing for Crack Monitoring of Concrete Structures», 2019.
10. <https://www.autodesk.com/solutions/aec/bim>, (acedido: jun. 16 2024)
11. Nguyen, T.A., T.A. Nguyen, and T.V. Tran, «Building Information Modeling (BIM) for Construction Project Schedule Management: A Review», 2024.
12. <https://www.amanzadegan.com/from-smart-building-management-to-interoperability-of-bim-ai-a-systematic-review-of-the-bim-in-construction/>, (acedido: jun. 16 2024)
13. <https://www.autodesk.com/blogs/construction/bim-dimensions/>, (acedido: jun. 16 2024)
14. Ershadi, M., et al., «Implementation of Building Information Modelling in infrastructure construction projects: a study of dimensions and strategies», 2021.
15. Bhawani, J.M.C.A.C.D.S.G.C.K.R.K.R.L.C.S.N.Z.a.S., «BIM Project Execution Planning Guide», 2021.
16. Standardization, I.O.f., «ISO 19650-1: Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) -- Information management using building information modelling -- Part 1: Concepts and principles.», 2018.
17. Standardization, C.E.C.f., «EN 17412-1:2020 Building information modelling - level of information need. Concepts and principles», 2020.
18. <https://pdts.pt/>, (acedido: jun. 16 2024)
19. Outra); Pedro Lucas Martins (Outra); António Aguiar Costa (Outra); João Poças Martins (FEUP); Miguel Azenha (Outra), M.E.S.O.J.G.O.R.R.R.O.P.M.F.R.R.O.J.d.S., «4º congresso português de `Building Information Modelling», 2022.

20. <https://source.thenbs.com/bimlibrary/nbs-bim-object-standard>, (acedido: jun. 16 2024)
21. Standardization, I.O.f., «ISO 16739-1:2018 - Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries - Part 1: Data schema», 2024.
22. <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/>, (acedido: jun. 16 2024)
23. Silva, L.d.F.e., «BIM na reabilitação de edifícios históricos: implementação em escritório de arquitetura: estudo de caso de edifício no Largo da Oliveira, Guimarães», 2021.
24. Picotês, A.J.R., «Aplicação de modelos de informação para a construção a empreendimentos de pequena dimensão», 2010.
25. Yang, X., et al., «Review of built heritage modelling: Integration of HBIM and other information techniques», 2020.
26. Deng, M., C. Menassa, and V. Kamat, «From BIM to digital twins: A systematic review of the evolution of intelligent building representations in the AEC-FM industry», 2021.
27. <https://blogs.autodesk.com/por-dentro-da-autodesk-brasil/2021/04/12/a-restauracao-da-catedral-de-notre-dame-em-paris-envolve-a-tecnologia-digital-modelagem-de-informacoes-de-edificios/>, (acedido: jun. 16 2024)
28. <https://fastcompanybrasil.com/co-design/como-a-modelagem-digital-esta-ajudando-a-recuperar-a-catedral-de-notre-dame/>, (acedido: jun. 16 2024)
29. Grieves, M.W., «Digital Twins: Past, Present, and Future», 2023.
30. Jiang, F., et al., «Digital twin and its implementations in the civil engineering sector», 2021.
31. Fernando, J.P.d.S., «Framework para Digital Twins de Processos», 2021.
32. Singh, M., et al., «Digital Twin: Origin to Future», 2021.
33. <https://vidyatec.com/blog/the-3-levels-of-the-digital-twin-technology-2/>, (acedido: jun. 16 2024)
34. Alexopoulos, K., N. Nikolakis, and G. Chryssolouris, «Digital twin-driven supervised machine learning for the development of artificial intelligence applications in manufacturing», 2020.
35. Minerva, R., G.M. Lee, and N. Crespi, «Digital Twin in the IoT Context: A Survey on Technical Features, Scenarios, and Architectural Models», 2020.
36. Fahim, M., et al., «Machine Learning-Based Digital Twin for Predictive Modeling in Wind Turbines», 2022.
37. <https://www.unilever.com/news/news-search/2023/unilever-sites-join-network-of-worlds-most-digitally-advanced-factories/>, (acedido: jun. 16 2024)
38. <https://www.priva.com/buildings/solutions/smart-building/ecobuilding>, (acedido: jun. 16 2024)
39. <https://semantix.ai/avancos-na-saude-e-na-qualidade-de-vida-com-gemeo-digital/>, (acedido: jun. 16 2024)
40. <https://www.feops.com/resources/feops-heartguide-latest-release>, (acedido: jun. 16 2024)

41. <https://www.renaultgroup.com/en/news-on-air/news/vehicle-digital-twin-when-physical-and-digital-models-unite/>, (acedido: jun. 16 2024)
42. Attaran, M. and B.G. Celik, «Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities», 2023.
43. Zhang, R., et al., «Digital twin and its applications: A survey», 2022.
44. <https://www.oracle.com/pt/database/what-is-database/>, (acedido: jun. 16 2024)
45. <https://blog.betrybe.com/tecnologia/bancos-de-dados/>, (acedido: jun. 16 2024)
46. <https://aps.autodesk.com/>, (acedido: jun. 16 2024)
47. <https://www.bentley.com/software/itwin-platform/>, (acedido: jun. 16 2024)
48. https://azure.microsoft.com/en-us/products/digital-twins/?ef_id=k_Cj0KCQjwsaqzBhDdARIsAK2gqnfrzA1s-HfjTDha6zfZcP6-bdrOuScKuUkZ9pXKb-IQ8rOS1hQf6oAaAmRhEALw_wcB_k_&OCID=AIDcmmj8drqamm_SEM_k_Cj0KCQjwsaqzBhDdARIsAK2gqnfrzA1s-HfjTDha6zfZcP6-bdrOuScKuUkZ9pXKb-IQ8rOS1hQf6oAaAmRhEALw_wcB_k_&gad_source=1&qclid=Cj0KCQjwsaqzBhDdARIsAK2gqnfrzA1s-HfjTDha6zfZcP6-bdrOuScKuUkZ9pXKb-IQ8rOS1hQf6oAaAmRhEALw_wcB, (acedido: jun. 16 2024)
49. <https://xeokit.io/>, (acedido: jun. 16 2024)
50. <https://threejs.org/>, (acedido: jun. 16 2024)
51. <https://docs.thatopen.com/intro>, (acedido: jun. 16 2024)
52. <https://www.ippatrimonio.pt/pt-pt/estacoes/estacao-de-porto-sao-bento>, (acedido: jun. 16 2024)
53. <https://www.visitportugal.com/pt-pt/content/cp-comboios-de-portugal-estacao-de-sao-bento>, (acedido: jun. 16 2024)
54. <https://portocool.com/fr/visiter/gare-sao-bento>, (acedido: jun. 16 2024)
55. <https://novaslinhas.metrodoporto.pt/linha-rosa/>, (acedido: jun. 16 2024)
56. <https://www.metrodoporto.pt/pages/636>, (acedido: jun. 16 2024)
57. Chakraborty, M. and A.P. Kundan, «Grafana», 2021.
58. <https://forums.sketchup.com/t/export-ifc-mapped-items/227734>, (acedido: jun. 16 2024)
59. https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/drafr/2528/180213_IFC_Handbuch.pdf, (acedido: jun. 16 2024)
60. <https://hdl.handle.net/10216/144269>, (acedido: jun. 16 2024)
61. <https://github.com/ThatOpen/web-ifc-viewer>, (acedido: jun. 16 2024)
62. <https://docs.thatopen.com/intro>, (acedido: jun. 16 2024)
63. <https://www.influxdata.com/integration/javascript-client-library/>, (acedido: jun. 16 2024)

64. <https://plotly.com/javascript/>, (acedido: jun. 16 2024)

Anexos

Anexo 1 - Especificações do conjunto de sensores instalados na Estação de São Bento

Sensor	Canal	Nome	Parâmetro	Unidade
50833	Ch1	VB_2Y	Aceleração	mg
	Ch2	VB_2Z	Aceleração	mg
	Ch3	VB_2X	Aceleração	mg
50834	Ch1	VB_3Y	Aceleração	mg
	Ch2	VB_3Z	Aceleração	mg
	Ch3	VB_3X	Aceleração	mg
50835	Ch1	VB_1X	Aceleração	mg
	Ch2	VB_1Z	Aceleração	mg
	Ch3	VB_1Y	Aceleração	mg
M1	Ch1	T_00	Temperatura	°C
63249	Ch2	T_01	Temperatura	°C
	Ch3	T_02	Temperatura	°C
	Ch4	T_03	Temperatura	°C
	Ch5	SN_Ref	Nível	mm
	Ch6	SN_01	Nível	mm
	Ch7	SN_02	Nível	mm
	Ch8	SN_03	Nível	mm
	M2	Ch1	T_04	Temperatura
63250	Ch2	T_05	Temperatura	°C
	Ch3	T_06	Temperatura	°C
	Ch5	SN_04	Nível	mm
	Ch6	SN_05	Nível	mm
	Ch7	SN_06	Nível	mm

Sensor	Canal	Nome	Parâmetro	Unidade
M3	Ch5	CL_1Y	Rotação	mm/m
63251	Ch6	CL_1X	Rotação	mm/m
	Ch7	CL_3Y	Rotação	mm/m
	Ch8	CL_3X	Rotação	mm/m
M4	Ch1	T_07	Temperatura	°C
63253	Ch2	T_08	Temperatura	°C
	Ch5	FS_3A	Deslocamento	mm
	Ch6	FS_3B	Deslocamento	mm
	Ch7	FS_3C	Deslocamento	mm
	Ch5	FS_1A	Deslocamento	mm
M5	Ch6	FS_1B	Deslocamento	mm
63254	Ch7	CL_2Y	Rotação	mm/m
	Ch8	CL_2X	Rotação	mm/m
M6	Ch1	T_09	Temperatura	°C
63255	Ch5	FS_2A	Deslocamento	mm
	Ch6	FS_2B	Deslocamento	mm
	Ch7	FS_2C	Deslocamento	mm
M7	Ch5	CL_4Y	Rotação	mm/m
63256	Ch6	CL_4X	Rotação	mm/m
	Ch7	CL_8Y	Rotação	mm/m
	Ch8	CL_8X	Rotação	mm/m

Sensor	Canal	Nome	Parâmetro	Unidade
M8	Ch1	T_10	Temperatura	°C
63257	Ch2	T_14	Temperatura	°C
	Ch5	CL_5Y	Rotação	mm/m
	Ch6	CL_5X	Rotação	mm/m
	Ch7	CL_6Y	Rotação	mm/m
	Ch8	CL_6X	Rotação	mm/m
M9	Ch1	T_11	Temperatura	°C
63258	Ch2	T_12	Temperatura	°C
	Ch5	FS_4A	Deslocamento	mm
	Ch6	FS_4B	Deslocamento	mm
	Ch7	FS_4C	Deslocamento	mm
M10	Ch5	CL_7Y	Rotação	mm/m
63260	Ch6	CL_7X	Rotação	mm/m
	Ch7	CL_9Y	Rotação	mm/m
	Ch8	CL_9X	Rotação	mm/m
M12	Ch1	T_13	Temperatura	°C
63261	Ch5	FS_6A	Deslocamento	mm
	Ch6	FS_6B	Deslocamento	mm
	Ch7	CL_10Y	Rotação	mm/m
	Ch8	CL_10X	Rotação	mm/m
M11	Ch5	FS_5A	Deslocamento	mm
8386	Ch6	FS_5B	Deslocamento	mm
	Ch7	FS_5C	Deslocamento	mm