

DESENVOLVIMENTO DE DIGITAL TWIN BASEADO EM BIM PARA MANUTENÇÃO DA ENVOLVENTE EXTERIOR DE ATIVOS INDUSTRIAIS

Ruben Silva ^(1,2), Luiza Assunção ⁽¹⁾, Rui Garcia ⁽¹⁾, Eduardo Soares ⁽³⁾, Tomás Jorge ⁽³⁾, Pedro Oliveira ^(3,4), Diogo Ribeiro ^(2,3)

(1) Garcia, Garcia, S.A., Santo Tirso, Portugal

(2) CONSTRUCT, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal

(3) iBuilt, ISEP, Politécnico do Porto, Porto, Portugal

(4) VN2R-Engineering Innovation Consulting LDA, Porto, Portugal

Resumo

Este artigo apresenta uma metodologia para o enriquecimento de modelos BIM As-Is com informação relativa a anomalias na envolvente exterior de ativos industriais, desenvolvida no âmbito do projeto DigiMaTRIA. Embora o objetivo global do projeto consista no desenvolvimento de um Digital Twin orientado para a fase de operação e manutenção, o presente trabalho incide especificamente numa etapa intermédia e estruturante desse processo: a criação de um modelo digital de base, geometricamente e semanticamente enriquecido, capaz de integrar informação geométrica, não geométrica e dados de danos identificados por métodos digitais de inspeção. A aplicação preliminar em painéis sandwich, validada em ambiente experimental controlado e num ativo industrial, demonstrou a viabilidade da integração de anomalias no modelo BIM, reforçando a rastreabilidade da informação e estabelecendo uma base para futuras funcionalidades preditivas do Digital Twin.

1. Introdução

O mercado de manutenção de ativos industriais tem crescido significativamente, impulsionado por políticas europeias que favorecem a renovação e pela necessidade de prolongar a vida útil das infraestruturas, especialmente da sua envolvente exterior. A manutenção de ativos industriais é, na maioria dos casos, ainda suportada por avaliações pouco objetivas, o que conduz a intervenções corretivas tardias ou à substituição prematura de elementos ainda funcionais. Estas limitações reforçam a necessidade de desenvolver e implementar soluções inovadoras baseadas em tecnologias avançadas, capazes de automatizar os processos de inspeção e promover a sua digitalização, em alinhamento com os princípios da Indústria 4.0 [1]. Neste contexto, observa-se uma transição progressiva de abordagens reativas ou corretivas para estratégias preditivas de gestão de ativos, sustentadas por ferramentas digitais que permitem uma monitorização contínua e uma tomada de decisão mais informada. Esta

transformação digital contribui não só para o aumento da eficiência e fiabilidade operacional, mas também para a redução dos custos operacionais e das emissões de CO₂.

O projeto DigiMaTRIA surge neste contexto, com o objetivo de desenvolver uma abordagem holística para a manutenção da envolvente exterior de ativos industriais, baseada na criação de um Digital Twin (DT) concebido especificamente para apoiar as fases de operação e manutenção. O Building Information Modelling (BIM) desempenha um papel estruturante, atuando simultaneamente como processo, modelo e ferramenta colaborativa: como processo, estabelecendo procedimentos formais de gestão da informação; como modelo, funcionando como repositório digital que integra dados gráficos e não gráficos ao longo do ciclo de vida do ativo; e como mecanismo colaborativo, promovendo a interação entre os intervenientes nas fases adequadas, assegurando a atualização contínua dos modelos. Assim, o DT emerge como uma extensão natural do ecossistema BIM, operando como sistema central durante a operação e manutenção.[2].

No âmbito desta investigação, ainda em curso, o presente artigo apresenta uma etapa fundamental para a futura implementação de um Digital Twin: o desenvolvimento de um modelo BIM As-Is enriquecido com informação relativa ao estado atual da envolvente exterior e às anomalias observadas. O trabalho centra-se na definição de uma metodologia para aquisição, estruturação, classificação e integração de informação de danos no modelo digital, estabelecendo uma base geométrica e semântica para suportar, em fases posteriores, a integração de sensores IoT, algoritmos preditivos e funcionalidades avançadas de apoio à decisão.

2. Projeto Digimatria

2.1 Breve descrição

O Projeto DigiMaTRIA apresenta uma abordagem integrada para a gestão da manutenção da envolvente exterior de ativos industriais, assente na implementação de um Digital Twin (DT) dotado de algoritmos de inteligência artificial e funcionalidades preditivas avançadas. A plataforma integra tecnologias robóticas de inspeção, métodos automáticos de deteção assistida de anomalias e sensores IoT para monitorizar o estado de degradação, permitindo a reconstrução digital do ativo e a classificação do seu desempenho.

No âmbito do projeto, a aplicação e validação da metodologia incidirão especificamente sobre três tipologias de materiais da envolvente exterior: painéis pré-fabricados de betão, painéis sandwich e sistemas de impermeabilização em telas TPO, atendendo à sua representatividade em ativos industriais e à diversidade de mecanismos de degradação associados.

2.2 Arquitetura Digital Twin

A organização dos principais processos e fluxos de informação do projeto DigiMaTRIA está ilustrada esquematicamente na Figura 1 e envolve uma interligação entre o ativo industrial físico, uma plataforma digital de gestão da manutenção e uma plataforma de serviços ao cliente. No ativo físico é realizada a aquisição de dados por intermédio de sistemas de visão computacional acoplados a veículos aéreos não tripulados (UAVs) e por sistema de monitorização que inclui sensores estáticos de caracterização das condições ambientais e estruturais. No Digital Twin é realizada a análise de dados e a extração de conhecimento por intermédio de rotinas e algoritmos de scan-to-BIM, para a transformação das nuvens de pontos

em modelos digitais por objetos, classificadores de inteligência artificial dedicados a dados de sensores e imagens, para deteção automática de anomalias e análise preditiva. Por fim, a plataforma de serviços disponibiliza uma interface gráfica avançada onde o cliente poderá ter acesso a diversos tipos de informação customizada em função do perfil do utilizador.

No âmbito do presente trabalho, o foco incidirá apenas sobre uma parte específica do projeto, nomeadamente na componente de modelação BIM e no enriquecimento do modelo As-is. Em particular, será abordado o processo de conversão e estruturação da informação geométrica proveniente de levantamentos digitais para a construção do modelo BIM, bem como a integração e sistematização da informação relativa à identificação e caracterização de danos observados na envolvente exterior do ativo. As componentes relacionadas com a sensorização IoT contínua, os modelos preditivos de degradação e a sua ligação operacional à plataforma de Digital Twin encontram-se em desenvolvimento e constituem etapas futuras do projeto.

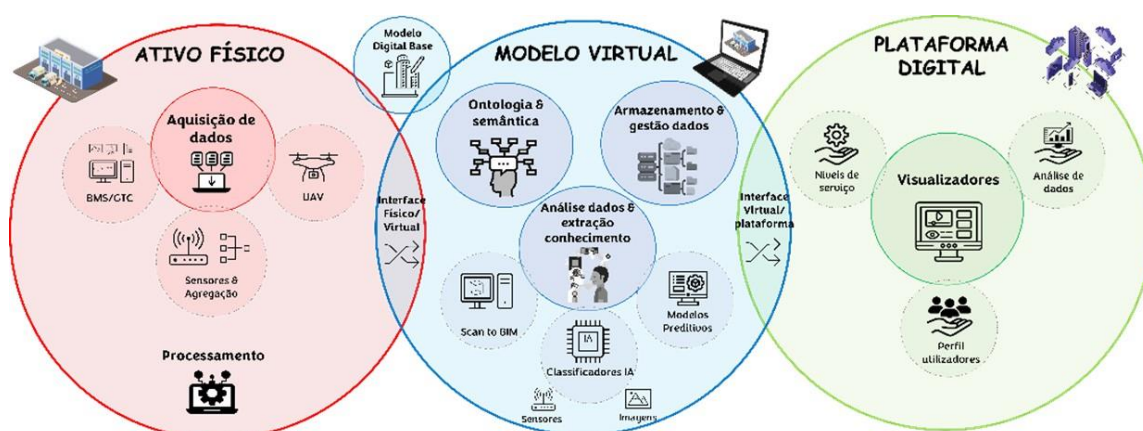


Figura 1: DigiMaTRIA: processos e fluxo de informação.

3. Metodologia de Enriquecimento do Modelo As-Is

3.1 Etapas principais

O estudo tem início a partir do modelo As-Built do ativo, desenvolvido com base no modelo BIM de preparação de obra e devidamente atualizado no termo da fase de construção, refletindo a configuração efetivamente executada. Numa fase subsequente, este modelo será objeto de um processo de enriquecimento que conduzirá à elaboração do modelo As-Is, estruturado em duas componentes complementares: uma correspondente à representação do estado real e atual do edifício e outra dedicada à integração e sistematização da informação relativa à identificação e caracterização dos danos observados na envolvente exterior do ativo.

A figura 2 ilustra o fluxo metodológico adotado, estruturado em cinco etapas: (1) aquisição de dados através de laser scanning e UAVs; (2) processamento e geração do modelo As-Is a partir das nuvens de pontos; (3) deteção automática de danos com recurso a algoritmos de *Computer Vision*; (4) projeção dos resultados no modelo digital; e (5) consolidação da informação num Modelo Digital de Base (MDB) que servirá de suporte estruturante ao desenvolvimento e à futura operacionalização do Digital Twin do edifício.

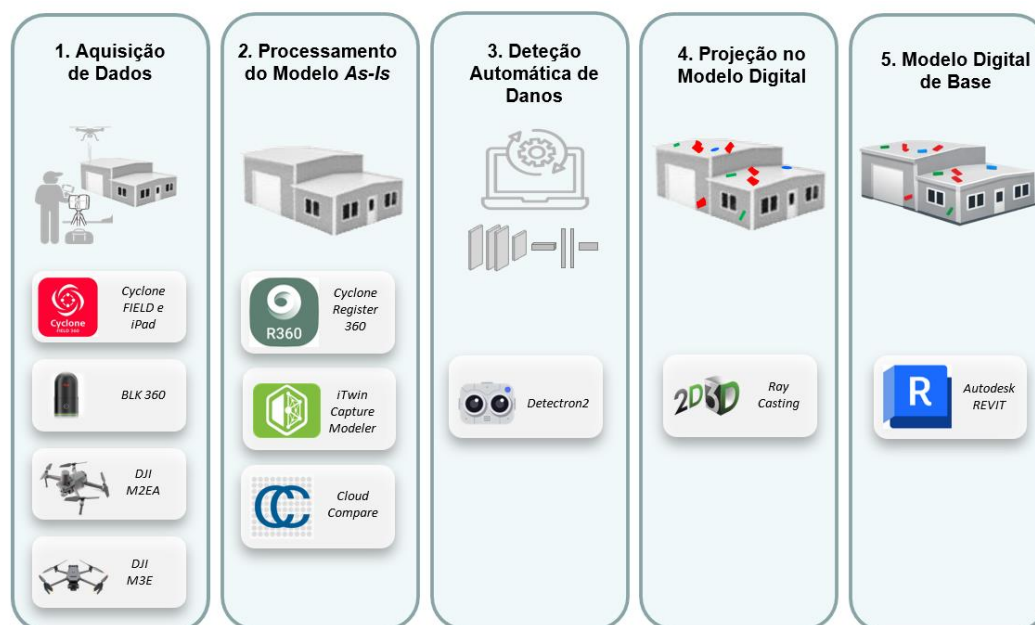


Figura 2: Principais etapas da metodologia para o desenvolvimento de um modelo fotogramétrico 3D As-Is com identificação de danos.

3.2 Aquisição e Estruturação de Informação

O desenvolvimento do modelo BIM assenta na adoção progressiva do LOD (Level of Development), garantindo que o nível de detalhe geométrico e informacional é adequado às diferentes fases do ciclo de vida do ativo [3]. No modelo de preparação de obra, os painéis pré-fabricados de betão e a tela TPO apresentam LOD 350, incluindo a definição das interfaces com elementos adjacentes e possibilitando a sua quantificação. O painel sandwich é modelado com LOD 400, por incorporar o detalhe necessário à fabricação e instalação. As anomalias são representadas com LOD 200 ou 300, em função do método de modelação adotado (cf. Subcapítulo 3.4).

Para além da geometria, o modelo integra informação não geométrica através de objetos paramétricos. No Autodesk Revit, recorre-se a *Shared Parameters*, assegurando uma gestão estruturada da informação, a extração para *schedules* e o mapeamento para *property sets*. Atendendo à natureza frequentemente não estruturada dos dados no setor da construção, torna-se essencial definir estratégias de normalização e organização da informação.

Neste contexto, é estruturado um *Product Data Template* (PDT) com base em normas harmonizadas, conjuntos de propriedades IFC, Declarações de Desempenho e demais documentação técnica [4]. A partir deste, desenvolve-se um *Digital Product Passport* (DPP), funcionando como repositório digital estruturado. Os objetos BIM passam, assim, a incorporar os parâmetros essenciais do DPP — identificador único, propriedades de desempenho, indicadores ambientais e referência ao passaporte — assegurando coerência semântica e interoperabilidade.

Os elementos são ainda organizados segundo o sistema de classificação *Uniclass*, escolhido pela sua maturidade, alinhamento com a ISO 12006-2 [5] e ampla aplicação internacional, permitindo estruturar produtos e sistemas de forma consistente ao longo do ciclo de vida do ativo.

Para garantir a interoperabilidade com plataformas de Digital Twin, o modelo é exportado em formato IFC (*Industry Foundation Classes*), padrão do OpenBIM. A correta associação às classes IFC é fundamental para preservar a integridade semântica e funcional dos elementos. A Tabela 1 apresenta as classes IFC atribuídas aos elementos construtivos e os respetivos códigos Uniclass. No caso das anomalias, utiliza-se a classe *IfcBuildingElementProxy*, por inexistir entidade específica para a sua representação.

Tabela 1: Classificação IFC e Uniclass

	Classe IFC	Código Uniclass
Painel Pré-fabricado de Betão	IfcWallType	Pr_20_93_71_17 – Concrete panels
Painel Sandwich	IfcPlateType	Pr_25_71_14_22 – Carbon steel insulating sandwich panels
Tela TPO	IfcCoveringType	Pr_25_57_51_32 – Glass fibre membranes

3.3 Detecção automática de danos em painéis sandwich

Foi desenvolvida uma metodologia avançada para a identificação de danos em painéis sandwich, com o objetivo de detetar danos mecânicos, corrosão e acumulação de água. Os danos mecânicos podem resultar de diversos fatores, nomeadamente do manuseamento inadequado durante o transporte e a instalação. A corrosão constitui uma das formas mais frequentes de degradação destes painéis, sendo provocada pela exposição prolongada a agentes ambientais agressivos.

A aquisição de dados é realizada através de UAVs, utilizados para fotogrametria, e de um sensor LiDAR, empregado na geração de nuvens de pontos de elevada precisão. Os UAVs permitem a recolha de imagens aéreas de alta resolução, enquanto o LiDAR terrestre assegura o levantamento detalhado das características geométricas das fachadas e coberturas.

Numa segunda fase, as nuvens de pontos são processadas no software Cyclone REGISTER 360 (dados LiDAR) e no iTwin Capture Modeler (fotogrametria obtida por UAV), *software* onde é também gerada uma malha 3D. Posteriormente, ambas as nuvens de pontos são integradas num modelo tridimensional georreferenciado unificado, recorrendo ao software CloudCompare, garantindo coerência geométrica e rigor espacial, através do algoritmo ICP (*Iterative Closest Point*). A malha 3D é sobreposta às nuvens de pontos para garantir o correto alinhamento entre os 2 modelos tridimensionais.

A terceira fase consiste na aplicação de técnicas de *deep learning*, incluindo a criação de um conjunto de dados rotulado e o treino de Redes Neurais Convolucionais (CNNs) para a deteção, identificação e classificação automática dos danos nos painéis. O modelo Mask R-CNN foi treinado com recurso ao *framework* Detectron2, com recurso a imagens captadas por UAV e posteriormente anotadas quanto à presença de corrosão, danos mecânicos e acumulação de água. O processo do algoritmo de identificação de danos encontra-se estruturado em três etapas principais: (i) organização e registo do *dataset*, (ii) treino e validação do modelo e (iii) teste e inferência.

Por fim, o algoritmo Ray Casting é aplicado com base na informação da pose da câmara, permitindo projetar, com elevada precisão, as instâncias de dano detetadas em imagens 2D

sobre a malha 3D. Já a nuvem de pontos permite delimitar com precisão os contornos dos danos no espaço tridimensional, com base na aplicação do algoritmo de agrupamento DBSCAN. O resultado consiste num modelo digital segmentado, no qual cada dano é codificado por cores de acordo com a respetiva classificação, facilitando a sua análise e interpretação.

3.4 Aplicação preliminar e validação experimental

A metodologia foi aplicada de forma preliminar a elementos de painéis sandwich, por se tratar de uma das tipologias de envolvente consideradas no projeto DigiMaTRIA e por apresentar mecanismos de degradação visualmente identificáveis, nomeadamente corrosão, danos mecânicos e acumulação de água. Esta aplicação decorreu em dois níveis complementares: primeiro, em ambiente experimental controlado, através da Torre FORTIS; e, posteriormente, num ativo industrial existente, correspondente ao edifício do ARCO, em Santo Tirso.

A primeira validação foi realizada no âmbito do projeto FORTIS. A infraestrutura de ensaio, denominada Torre FORTIS e localizada em Alfena, no Porto, foi concebida para replicar fachadas e coberturas de ativos industriais, permitindo a realização de testes de montagem, desmontagem e inspeção de painéis sandwich. Após a desmontagem dos painéis, foram captadas imagens sistemáticas dos componentes com recurso a drones de alta resolução. Estas imagens foram posteriormente processadas através de algoritmos de Deep Learning, nomeadamente o modelo Mask R-CNN, com o objetivo de identificar e quantificar automaticamente danos mecânicos e fenómenos de corrosão [6]. Após as fases de treino e validação, o modelo foi testado em imagens dos painéis, demonstrando um desempenho satisfatório na deteção de danos, conforme ilustrado na Figura 3. Para além da avaliação visual, o desempenho foi quantificado através da métrica AP50segm, tendo sido obtido um valor de 78,45%.

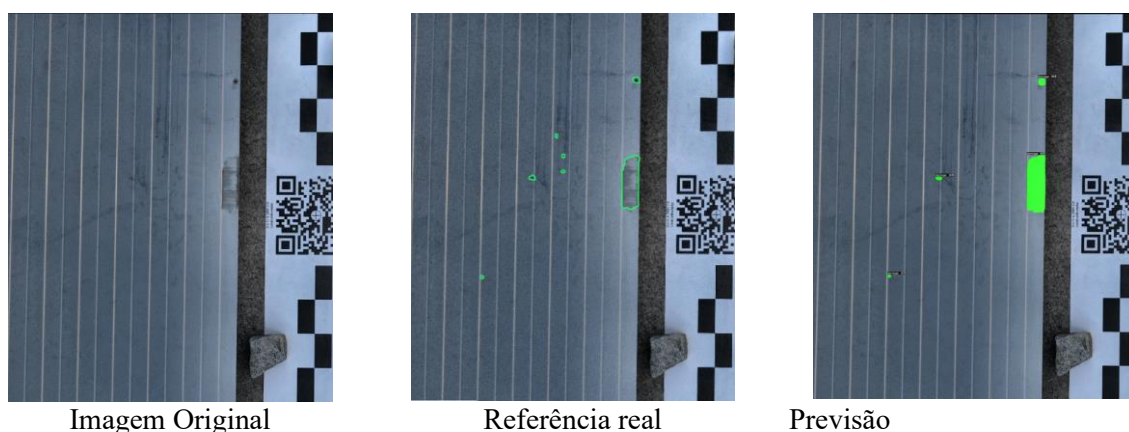


Figura 3: Comparação entre a imagem original, a referência real e a previsão.

Numa segunda fase, a metodologia foi aplicada a um ativo industrial existente que apresentava sinais visíveis de corrosão e danos mecânicos [7]. O edifício em estudo corresponde a uma unidade industrial localizada na Zona Industrial do ARCO, em Santo Tirso, Portugal, cuja cobertura e revestimentos de fachada são constituídos por painéis sandwich. As nuvens de pontos obtidas por LiDAR e por fotogrametria foram integradas no software CloudCompare, permitindo aumentar a densidade da informação tridimensional e colmatar lacunas resultantes de limitações no levantamento, conforme ilustrado na Figura 4.



Figura 4: Fusão das nuvens de pontos.

O *framework* desenvolvido foi aplicado à totalidade das imagens captadas em torno do edifício, assegurando uma deteção e mapeamento consistentes das anomalias. No modelo digital resultante, os danos encontram-se codificados por cores — vermelho para corrosão, verde para danos mecânicos e azul para acumulação de água — facilitando a sua identificação e visualização. A cobertura, apresentada na Figura 5, revelou-se uma das zonas com maior concentração de danos, destacando-se a predominância de fenómenos de corrosão.

No caso do edifício ARCO, o modelo atingiu valores de mAP de 68,4% para a deteção de danos e de 65,0% para a segmentação, demonstrando a sua capacidade para lidar com diferentes cenários de degradação, com níveis variados de complexidade e dimensão. A utilização de técnicas de aumento de dados, em conjunto com uma análise de sensibilidade dos hiperparâmetros, contribuiu ainda para melhorar o desempenho e a adaptabilidade do algoritmo.

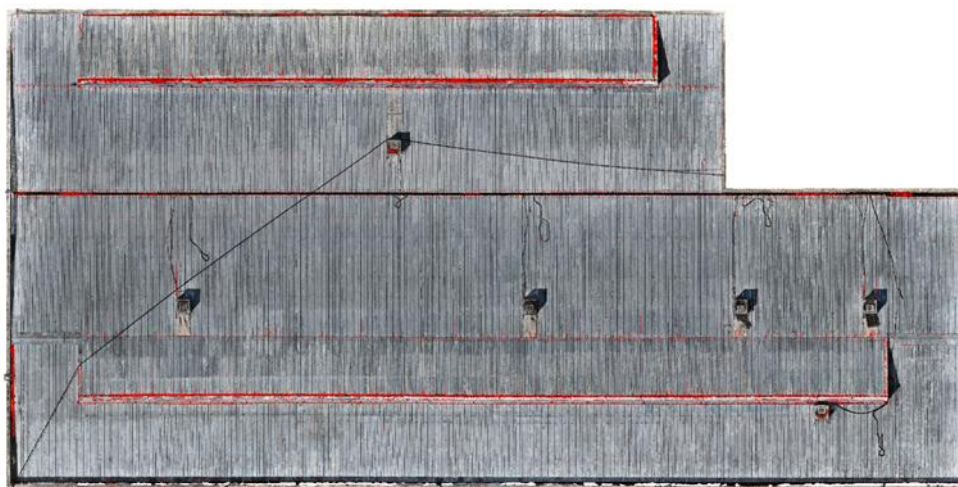


Figura 5: Modelo digital da cobertura inspecionado.

Como resultado do processo de deteção, é gerado automaticamente uma tabela em formato Excel, contendo informação quantitativa relevante para cada dano identificado, nomeadamente: identificação, tipologia, localização na fachada ou cobertura, coordenadas espaciais, dimensões, caminho da imagem das anomalias e data do levantamento. Este ficheiro constitui a base para a subsequente modelação das anomalias no modelo digital.

Apesar dos resultados obtidos demonstrarem a viabilidade técnica do fluxo proposto, a validação encontra-se, nesta fase, limitada à análise de painéis sandwich. A extensão da

metodologia a painéis pré-fabricados de betão e sistemas de impermeabilização em tela TPO encontra-se prevista em fases subsequentes, sendo necessária para avaliar a robustez do método perante diferentes materiais, geometrias, mecanismos de degradação e condições reais de operação.

3.5 Modelação das Anomalias

Este subcapítulo aborda a modelação paramétrica das anomalias, contemplando a representação geométrica dos danos identificados no ativo e a respetiva associação de informação. Para tal, recorre-se ao Dynamo, ferramenta de programação visual do Autodesk Revit, que permite desenvolver rotinas capazes de automatizar e sistematizar a criação e parametrização das anomalias no modelo. O ficheiro Excel com os dados recolhidos em inspeção é utilizado como fonte de informação para alimentar os scripts, assegurando a ligação direta entre o levantamento realizado em campo e a sua representação no ambiente BIM. Desta forma, estabelece-se um fluxo de trabalho integrado, automatizado e replicável, adequado a projetos de maior escala e a processos de monitorização contínua.

A representação das anomalias pode ser efetuada através de dois métodos distintos, definidos em função do LOD pretendido, da quantidade e qualidade da informação disponível e dos objetivos da análise subsequente:

- Método 1 – Modelação por Ponto: A anomalia é representada por um elemento tridimensional simplificado, com LOD 200, materializado por uma esfera posicionada segundo a coordenada do centroide do dano. Esta abordagem permite uma identificação rápida da localização e da distribuição espacial das anomalias, sendo particularmente adequada quando existe um elevado número de ocorrências de pequena dimensão. Contudo, não assegura uma representação geométrica rigorosa do dano, o que limita a sua aplicação em análises mais detalhadas. A Figura 6 ilustra a aplicação deste método aos painéis sandwich da Torre FORTIS, no âmbito do caso de estudo anteriormente referido.
- Método 2 – Modelação por Características Precisas: A anomalia é representada com a sua geometria real, correspondendo a um LOD 300, o que assegura maior rigor e detalhe na documentação. Esta abordagem é adequada para situações que exigem análises técnicas aprofundadas ou registo pormenorizado dos danos. Contudo, implica maior esforço na recolha e tratamento de dados, bem como maior complexidade no processo de modelação.

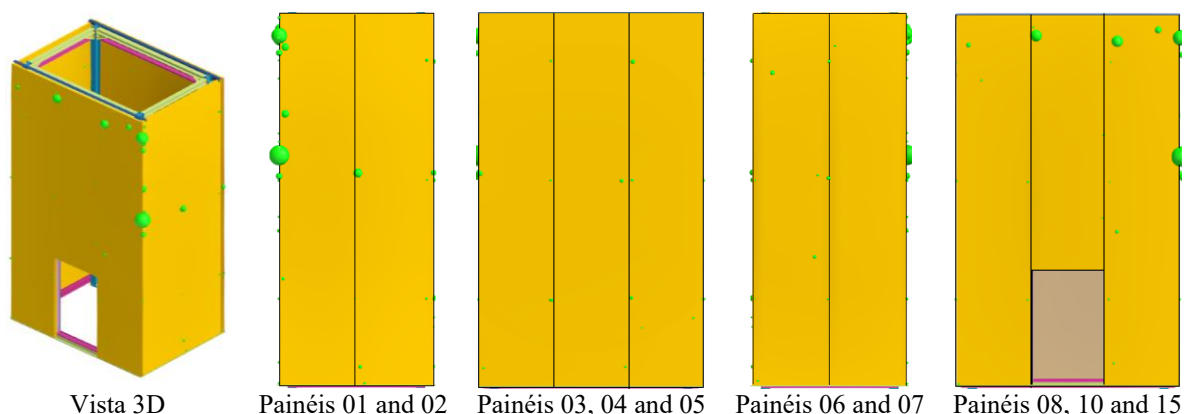


Figura 6: Modelo BIM da torre FORTIS com a representação das anomalias [6].

Para assegurar a correta execução dos scripts, o modelo BIM deve cumprir requisitos prévios, incluindo regras consistentes de modelação, criação de parâmetros específicos — nomeadamente para identificação de fachadas e coberturas — e correta georreferenciação de todos os modelos envolvidos. O processo inicia-se com a criação de um ficheiro Revit georreferenciado, ao qual o modelo do edifício é associado por vínculo. Posteriormente, são executadas as rotinas desenvolvidas em Dynamo, sendo que cada método de representação das anomalias corresponde a um script autónomo. A Figura 7 apresenta o fluxo do processo implementado em Dynamo relativo ao Método 2, sendo que o Método 1 segue uma abordagem semelhante, ainda que numa versão simplificada. Por último, os dados extraídos da tabela Excel são atribuídos aos parâmetros (*Shared Parameters*) associados às anomalias, assegurando a sua correta parametrização e integração no modelo BIM.

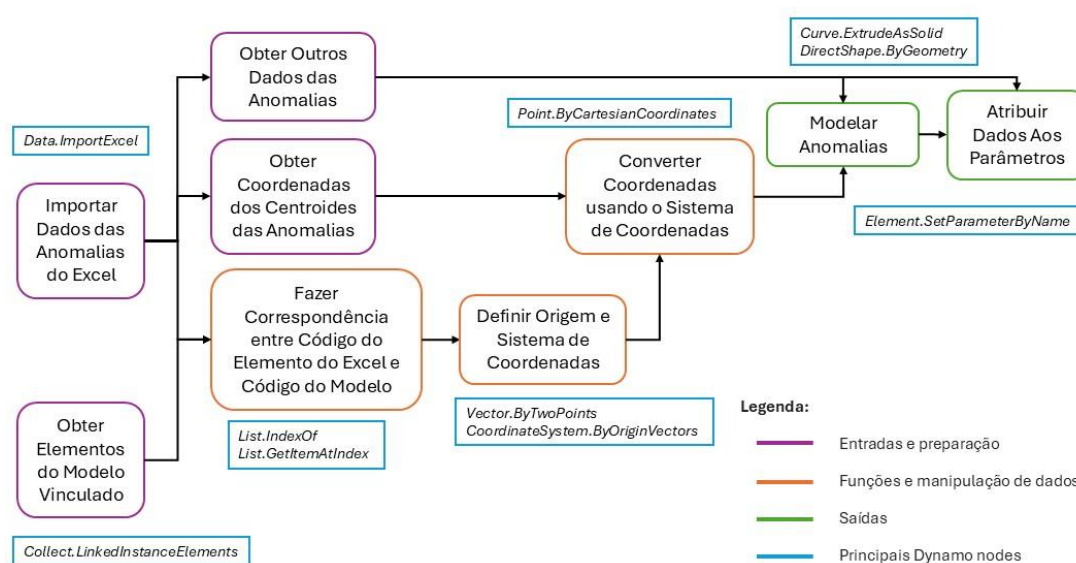


Figura 7: Método 2 – Diagrama do processo implementado em Dynamo.

4. Conclusões e trabalhos futuros

O presente trabalho apresentou uma metodologia para o enriquecimento de modelos BIM As-Is com informação relativa a anomalias na envolvente exterior de ativos industriais, no âmbito do projeto DigiMaTRIA. A contribuição principal consiste no desenvolvimento de uma base digital estruturada para suporte à futura operacionalização de um Digital Twin, integrando informação geométrica, semântica e dados de anomalias obtidos por processos digitais de inspeção.

A metodologia proposta articula a aquisição de dados por LiDAR e fotogrametria com UAV, a deteção automática de danos com recurso a técnicas de Deep Learning, a projeção tridimensional das anomalias e a sua integração paramétrica em ambiente BIM. A aplicação preliminar em painéis sandwich, incluindo validação em ambiente experimental controlado e num ativo industrial, demonstrou a viabilidade técnica do fluxo proposto, desde a identificação e classificação das anomalias até à sua representação e parametrização no modelo BIM.

Importa, contudo, salientar que a metodologia se encontra ainda numa fase de desenvolvimento. Nesta etapa, não foram ainda implementadas a integração contínua de dados provenientes de

sensores IoT, os módulos preditivos de degradação nem funcionalidades automáticas de apoio à decisão. Do mesmo modo, a validação quantitativa do desempenho da deteção automática, incluindo métricas por classe de dano e comparação com métodos tradicionais de inspeção, deverá ser aprofundada em fases subsequentes.

Como trabalhos futuros, prevê-se a expansão da validação a outras tipologias de materiais da envolvente exterior, nomeadamente painéis pré-fabricados de betão e sistemas de impermeabilização em TPO. Prevê-se ainda a integração de dados de sensorização, o desenvolvimento de algoritmos preditivos para simulação da evolução temporal das anomalias e a definição de indicadores de desempenho associados à eficiência da inspeção, precisão da deteção, rastreabilidade da informação e apoio à priorização de intervenções de manutenção. Estas etapas serão essenciais para consolidar a transição do modelo BIM As-Is enriquecido para um Digital Twin aplicado à operação e manutenção de ativos industriais.

Agradecimentos

Este trabalho teve o apoio financeiro do projeto de I&D DigiMaTRIA – Ref. NORTE2030-FEDER 00587800 - 14460, cofinanciado por Portugal 2030 – Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do Programa Regional NORTE 2030. Os autores agradecem ainda o apoio do projeto europeu FORTIS, financiado pelo programa Horizon Europe da União Europeia, ao abrigo do Grant Agreement No. 101135707.

Referências

- [1] B. G. Pantoja-Rosero, R. Achanta, and K. Beyer, *Damage-augmented digital twins towards the automated inspection of buildings*, Automation in Construction, vol. 150, Art. no. 104842, 2023, doi: 10.1016/j.autcon.2023.104842.
- [2] A. Revolti *et al.*, *From building information modeling to construction digital twin: A conceptual framework*, Production & Manufacturing Research, vol. 12, no. 1, 2024, doi: 10.1080/21693277.2024.2387679.
- [3] BIMForum, *Level of Development (LOD) Specification: Part I*, 2024. [Online]. Available: <https://bimforum.org/wp-content/uploads/2024/11/LOD-Spec-2024-Part-I-official-English.pdf>. Accessed: Jan. 21, 2026.
- [4] Universidade do Minho, "O que são os PDTs?" [Online]. Available: <https://pdts.pt/>. Accessed: Jan. 21, 2026.
- [5] International Organization for Standardization (ISO), "ISO 12006-2:2015 — Building construction — Organization of information about construction works — Part 2: Framework for classification", ISO, Geneva, Switzerland, 2015.
- [6] R. B. Garcia *et al.*, "Enabling circular reuse of sandwich panels through UAV inspection, deep learning, and BIM-based material passports", Sustainability, vol. 18, no. 5, Art. no. 2454, 2026, doi: 10.3390/su18052454.
- [7] P. Oliveira, "Mapeamento de anomalias na envolvente exterior de edifícios industriais com base em modelos tridimensionais fotogramétricos", Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal, 2024.