

INTEGRAÇÃO DIGITAL DE INFORMAÇÃO PARA MANUTENÇÃO PREDITIVA DE INFRAESTRUTURAS FERROVIÁRIAS

Francisco Andrade⁽¹⁾, João Ventura⁽¹⁾, Rui Gavina⁽¹⁾, Ricardo Santos^(1,2), Diogo Ribeiro^(1,2)

(1) iBuilt, Instituto Superior de Engenharia, Politécnico do Porto, Porto, Portugal

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

Resumo

A digitalização de infraestruturas ferroviárias exige métodos capazes de integrar e estruturar informação proveniente de múltiplas fontes, assegurando interoperabilidade e consistência ao longo das fases de operação e manutenção. Este artigo apresenta os resultados preliminares de um fluxo desenvolvido no âmbito do projeto europeu NRPES, que combina BIM e SIG com processos automatizados para consolidar modelos digitais orientados à manutenção preventiva. A metodologia centraliza dados geométricos, estruturais, de inspeção e de monitorização, num ambiente comum de dados, permitindo enriquecimento semântico e análise espacial. O fluxo estabelece ligações explícitas entre localização geoespacial, características do ativo e informação associada aos elementos, suportando decisões de manutenção mais informadas e melhorando a gestão do ciclo de vida. A aplicação à Linha de Leixões evidencia o potencial de integração BIM-SIG para produzir representações digitais consistentes, escaláveis e replicáveis, alinhadas com a transição digital do setor ferroviário. O trabalho reforça ainda a necessidade de modelos semânticos normalizados e pipelines automáticos, essenciais para a rastreabilidade e para a extensão da metodologia a outros corredores. No conjunto, os resultados constituem passos iniciais para um Gémeo Digital, demonstrando como interoperabilidade e automatização podem fortalecer a manutenção preventiva e promover uma gestão mais sustentável das infraestruturas existentes.

1. Introdução

As infraestruturas ferroviárias operam sob requisitos cada vez mais exigentes em termos de segurança e continuidade do serviço, tornando o planeamento da manutenção e a gestão das informações sobre os ativos uma preocupação central da engenharia. Neste contexto, a transformação digital é frequentemente encarada como uma oportunidade para melhorar a forma como a condição, a geometria e o contexto operacional são consolidados para apoiar a tomada de decisões. No âmbito da gestão de ativos de infraestruturas, o uso combinado de *Building Information Modelling* (BIM) e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) tem-se destacado como uma forma de fortalecer a gestão, análise e visualização de informações, aumentando a capacidade de suporte a decisões relacionadas com ativos, incluindo a redução de riscos [1] .

Ambientes orientados para BIM e para SIG oferecem capacidades distintas e operam em diferentes escalas. O BIM permite representações geométricas e semânticas altamente detalhadas, mas, tipicamente, não incorpora o contexto envolvente. Por outro lado, o SIG suporta análise espacial e a interpretação contextual em grande escala, mas carece de um repositório digital detalhado e abrangente de informações ao nível do elemento [2]. Para casos de uso de gestão de ativos, esta complementaridade motiva fluxos de trabalho de integração que mantenham, num único ambiente, tanto a referência geoespacial como as informações de infraestrutura ao nível do elemento.

Apesar do potencial, a literatura continua a relatar atritos de interoperabilidade que limitam a adoção operacional, sobretudo para ativos existentes, onde os dados tendem a estar fragmentados e os processos de extração e transformação são dispendiosos. Em contextos ferroviários, os desafios incluem procedimentos morosos de extração de informações e o facto da conversão entre padrões conduzir, frequentemente, a perda de informação [1].

Do ponto de vista operacional, estas limitações tornam-se mais críticas porque a fase de operação e manutenção é descrita como a fase mais longa do ciclo de vida. Adicionalmente, as informações de inspeção e monitorização tendem a ser dispersas e nem sempre bem integradas, aumentando o risco de perda de informações e reduzindo a eficiência da gestão [3].

BIM e SIG são frequentemente descritos como tecnologias complementares que, quando combinadas com tecnologias facilitadoras, suportam o desenvolvimento de gémeos digitais (*Digital Twins*, DTs) de infraestruturas. Aplicações proprietárias, adaptadas a requisitos específicos, são também referidas como soluções que melhoram o acesso à informação, permitindo consultar o modelo 3D independentemente da aplicação de autoria e aceder à base de dados e às análises através de interfaces mais intuitivas [4]. No entanto, foi destacado que muitas soluções ainda dependem de plataformas isoladas com integração limitada entre BIM e SIG [5]. Em paralelo, no domínio da interoperabilidade e integração semântica, observa-se que abordar a interoperabilidade de dados pode motivar tecnologias semânticas que permitem a aplicação de consultas complexas em várias fontes de dados [6].

Este artigo apresenta os resultados preliminares de uma estrutura de integração de informação para manutenção de infraestruturas ferroviárias em ambiente ArcGIS Pro [7], desenvolvida no âmbito do projeto NRPCES. A estrutura foca-se nas bases de integração necessárias para tornar a informação de manutenção ferroviária utilizável num único ambiente, importando conjuntos de dados heterogéneos para a base de dados geográficos do projeto ArcGIS Pro, trazendo um modelo digital 3D da infraestrutura para o mesmo contexto do projeto e automatizando a criação de associações ao nível das camadas que permitem aos utilizadores navegar entre elementos físicos e registos com uma configuração SIG manual mínima. A contribuição é deliberadamente pragmática, focando o problema da integração e destacando a repetibilidade do *pipeline* e a facilidade de utilização para utilizadores não especializados.

Um caso de estudo num segmento da linha ferroviária de Leixões demonstra a abordagem, através da ligação dos elementos das informações de inspeção aos componentes estruturais, com foco em elementos específicos em cenas 3D com imagens contextuais do mapa base e camadas de referência 3D circundantes. O âmbito do artigo é intencionalmente delimitado ao desenho da estrutura de integração e à evidência do caso de estudo, posicionando o ambiente ArcGIS Pro e a automação orientada pela interface como uma base pronta para DT, preparada para receber conjuntos de dados adicionais de parceiros e resultados de análises futuras à medida que os fluxos de trabalho do projeto NRPCES amadurecem.

2. Metodologia

A metodologia apresentada traduz-se num fluxo de integração suportado por uma interface dedicada que automatiza a ingestão de dados e a associação de conjuntos de dados a ativos dentro de um projeto ArcGIS Pro. A Figura 1 resume a distribuição de responsabilidades entre a camada de interface e o ambiente ArcGIS. A interface gere a seleção do contexto do projeto e executa rotinas automatizadas de importação, conversão e associação, relatando o estado de execução e os resultados de rastreabilidade. O ArcGIS aloja as tabelas resultantes de outros fluxos de trabalho, e as camadas derivadas do modelo, permitindo a consulta de cenas 3D e o acesso associado, ao nível do elemento, às informações do conjunto de dados por meio de interações padrão, como pop-ups e visualizações de atributos.

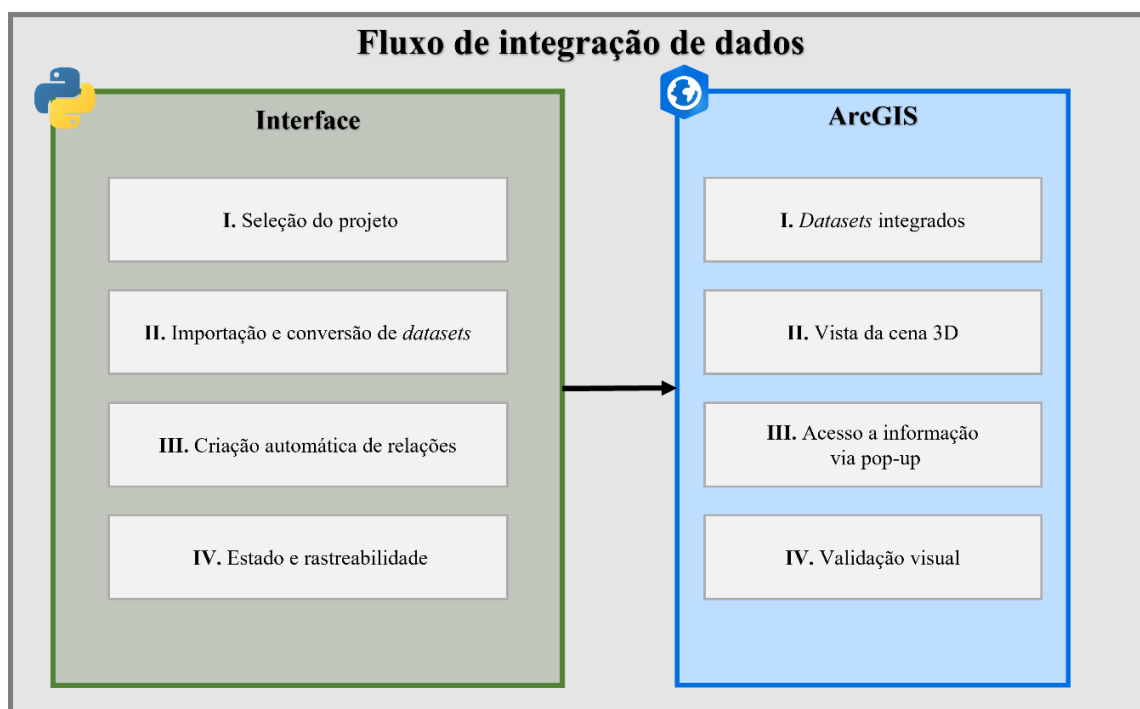


Figura 1 – Visão geral do fluxo de integração com camada de automatização e ambiente ArcGIS

2.1 Fontes de dados

O fluxo integra conjuntos de dados heterogêneos utilizados na manutenção ferroviária e na gestão de informações de ativos num projeto ArcGIS Pro. As entradas incluem conjuntos de dados tabulares, fornecidos em Excel e JSON, e modelos digitais 3D que representam a infraestrutura. Na configuração atual, o modelo digital é fornecido como um modelo IFC 4.3. As camadas SIG existentes e as imagens do mapa base no ArcGIS Pro são utilizadas como referência contextual durante a integração e validação.

A abordagem acomoda a variabilidade nos dados dos parceiros, priorizando a ingestão robusta na base de dados geográficos do projeto, em vez de impor um esquema manual na importação. As tabelas de inspeção incluem atributos de identificação que podem ser associados a camadas derivadas do modelo, permitindo a ligação determinística ao nível do elemento para ativos discretos, como componentes de viadutos, mantendo compatibilidade com referência futura de ativos lineares à medida que conjuntos de dados adicionais sejam disponibilizados.

Para manter a consistência entre entregas sucessivas, a interface oferece uma opção para reter cada conjunto de dados importado como uma entidade distinta na base de dados geográficos do projeto, permitindo que as atualizações sejam incorporadas sem sobrescrever as versões anteriores e apoiando a rastreabilidade da proveniência dos dados quando necessário.

2.2 Modelação e processamento de dados

Os dados são importados para o projeto ArcGIS Pro por meio de uma interface suportada por rotinas de automação e *add-ins* do ArcGIS Pro. Os ficheiros tabulares são convertidos em tabelas na base de dados geográficos usando a estratégia de uma tabela por ficheiro, preservando a granularidade da fonte e, opcionalmente, usando nomes com carimbo de data/hora para indicar a proveniência. Os atributos-chave de identificação e localização são preservados para permitir a associação posterior.

O modelo digital é importado para o mesmo projeto e convertido em camadas SIG derivadas do modelo e classes adequadas para visualização 3D e interação de atributos. A conversão produz várias classes correspondentes aos agrupamentos de diferentes conjuntos de objetos do modelo, permitindo a consulta ao nível do elemento de estruturas discretas. Na configuração atual, a plausibilidade espacial é verificada por meio da sobreposição com imagens do mapa base e camadas de contexto SIG existentes, confirmando que o modelo importado é interpretável na localização prevista e à escala esperada.

Esta integração de conteúdo tabular estabelece um espaço de trabalho coerente para o projeto, no qual atividades subsequentes de associação e inspeção podem ser realizadas sem transferências adicionais de dados entre ferramentas externas.

2.3 Criação e automatização de relações

Para minimizar a configuração manual do SIG e suportar uma integração repetível, as associações entre tabelas de inspeção e camadas derivadas do modelo são configuradas automaticamente. O fluxo de trabalho deteta correspondências candidatas entre tabelas importadas e camadas derivadas do modelo, aplicando associações dentro do ArcGIS Pro como relações e junções ao nível do mapa. Neste artigo, as associações são maioritariamente definidas por identificadores, o que permite consultar os registos de inspeção ao selecionar elementos do modelo, através dos *pop-ups* das camadas no próprio projeto. A execução da criação de relações é registada por meio de saídas estruturadas que indicam se a associação foi aplicada com sucesso, e assinalam problemas de validação, apoiando a rastreabilidade.

2.4 Visualização e interação

O fluxo de trabalho produz um projeto ArcGIS Pro onde conjuntos de dados tabulares importados e o modelo digital baseado em IFC coexistem no mesmo ambiente, e onde associações de camadas configuradas suportam a navegação entre geometria e registos. A visualização e a interação seguem as operações padrão do ArcGIS Pro, como navegar no mapa ou cena, selecionar elementos e inspecionar atributos por meio de tabelas e *pop-ups*, evitando a necessidade de os utilizadores configurarem manualmente junções ou relações.

A interação está centrada nos ativos. Os utilizadores podem selecionar um elemento derivado do modelo, por exemplo, um componente do viaduto, e aceder aos registos de inspeção ou medição correspondentes. Esta visualização integrada num único espaço de trabalho destina-se a apoiar a consistência interpretativa do elemento e dos resultados provenientes de outros fluxos.

3. Caso de estudo

3.1. Descrição

A Linha de Leixões, inaugurada em 1938, liga a estação de Campanhã na cidade do Porto à zona portuária de Leixões e tem alternado historicamente entre o transporte exclusivo de mercadorias e o serviço intermitente de passageiros. Os comboios de passageiros regressaram a 9 de fevereiro de 2025, com a reabertura de um troço de 19 km que liga o Porto a Leça do Balio e serve paragens intermédias, integrando a linha na rede suburbana do Porto da CP [8]. Nos primeiros três meses após a reabertura, a procura ultrapassou as 155,000 validações, com o Hospital de São João a emergir como a nova paragem mais utilizada e os dias de pico a ultrapassarem as 2,500 validações [9], indicando uma rápida aceitação do serviço e reforçando a adequação da linha como um piloto do mundo real para o fluxo de integração apresentado neste trabalho.

3.2. Integração de dados

O fluxo produziu um projeto ArcGIS Pro no qual o modelo digital baseado em IFC e os dados de inspeção importados coexistem na mesma cena 3D. O modelo foi importado e convertido em camadas derivadas, o que permite visualizar os elementos do viaduto em contexto SIG. Para suportar a interpretação contextual, a cena foi complementada com imagens do mapa base e edifícios 3D, por forma a que os elementos de infraestrutura fossem examinados dentro do ambiente urbano envolvente.

Neste caso de estudo, os dados de inspeção foram incorporados em tabelas de base de dados geográficos seguindo a estratégia de uma tabela por ficheiro, com nomenclatura de carimbo de data/hora disponível e com uma configuração opcional do utilizador para apoiar a rastreabilidade em importações sucessivas. A Figura 2 ilustra a cena 3D no ArcGIS Pro, evidenciando a geometria do viaduto, bem como a ferrovia e o posicionamento no contexto territorial.

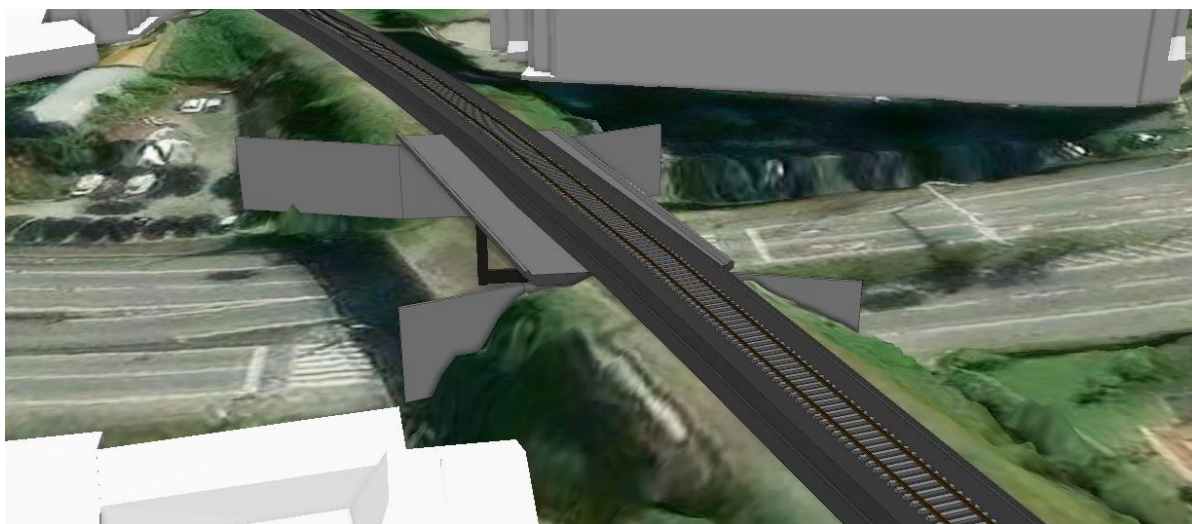


Figura 2 – Cena 3D integrada no ArcGIS Pro, compreendendo a visualização do modelo do viaduto derivado de IFC

3.3. Resultados e rastreabilidade

As associações entre tabelas de inspeção e camadas derivadas do modelo foram configuradas como relações ao nível de mapa, o que permite a navegação entre elementos físicos e os respetivos registos no ArcGIS Pro. Neste caso de estudo, foram estabelecidas relações para a camada de colunas do viaduto, o que permite que o utilizador selecione um elemento e consulte as informações de inspeção através do *pop-up* correspondente.

A interface suporta este processo ao identificar automaticamente as correspondências prováveis entre campos, reduzindo a necessidade de seleção manual de chaves. O resultado depende, contudo, da existência de atributos consistentes de identificação entre as tabelas e as camadas derivadas do modelo. A Figura 3 apresenta um exemplo desse resultado, em que a seleção de uma coluna expõe os atributos associados à inspeção no ArcGIS Pro.

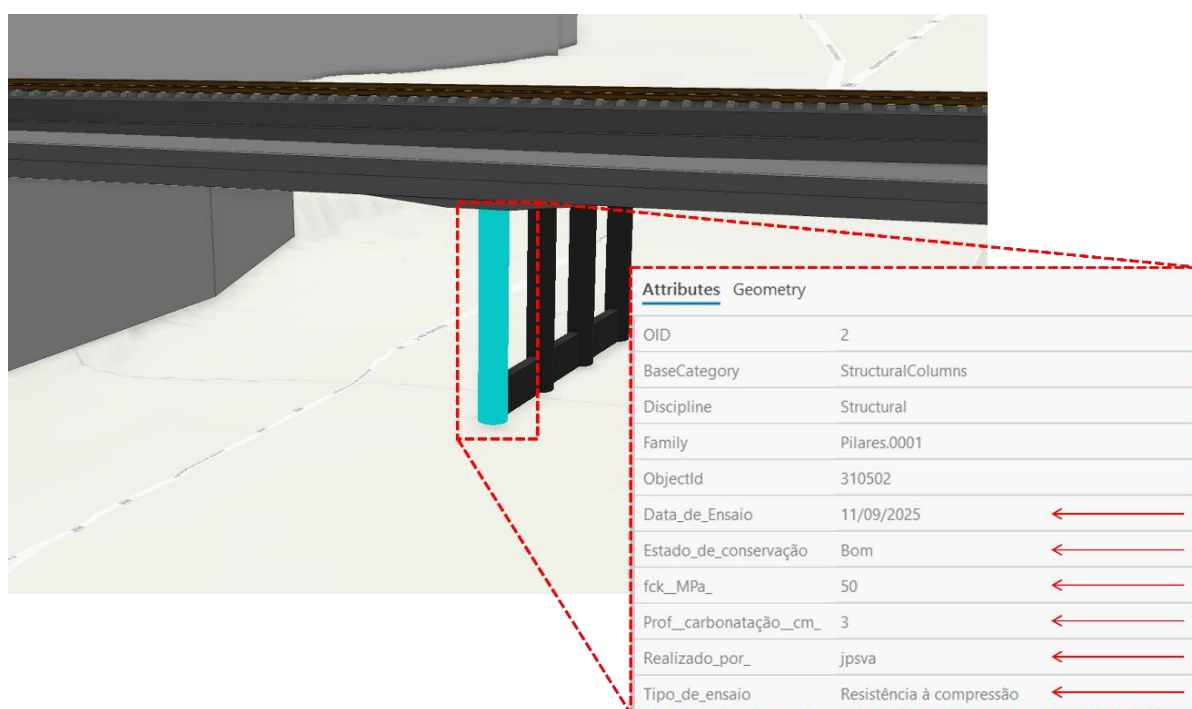


Figura 3 – Exemplo de informação de inspeção acessível a partir de um elemento do viaduto

4. Conclusões e trabalho futuro

Este artigo apresenta uma estrutura preliminar de integração para consolidar informação heterogénea sobre manutenção ferroviária num único ambiente consultável.

A abordagem centra-se em fundamentos práticos de integração: importação de conjuntos de dados para a base de dados geográficos do projeto, integração de um modelo digital 3D no mesmo contexto do projeto e automatização de associações ao nível das camadas, o que possibilita a navegação entre elementos físicos e registos com uma configuração manual mínima. Esta metodologia está intencionalmente posicionada como pronta para DT, dando prioridade à integração estruturada e à acessibilidade ao nível dos elementos como pré-requisitos para futuros módulos analíticos e de apoio à decisão.

O caso de estudo sobre um segmento da Linha de Leixões demonstrou a viabilidade do fluxo de trabalho num contexto real de ativos, incluindo a representação do viaduto numa cena 3D suportada por camadas contextuais. No mesmo projeto, integraram-se conjuntos de dados e camadas derivadas do modelo. De referir também que as relações estabelecidas ao nível do mapa permitiram consultar informação diretamente a partir de elementos selecionados, o que facilita o acesso por parte de intervenientes não especializados.

As limitações atuais estão, no essencial, relacionadas com a consistência dos dados. A associação dos elementos depende da presença de atributos de identificação compatíveis entre tabelas de inspeção e camadas derivadas do modelo. Para além disso, a implementação atual utiliza associações ao nível do mapa, o que suporta a configuração iterativa e a atualização rápida, continuando, no entanto, dependente do contexto do projeto.

O trabalho futuro consiste na incorporação de conjuntos de dados adicionais provenientes do projeto e na validação do fluxo com informações produzidas em todas as atividades. Adicionalmente, será explorada a integração de fluxos de monitorização contínua, de modo a incorporar séries temporais e eventos no mesmo contexto espacial. Em paralelo, ferramentas desenvolvidas por outros parceiros do projeto estão a ser integradas para que os fluxos de análises futuras não dependam de múltiplas aplicações ou interfaces. O objetivo é centralizar as funcionalidades num ambiente unificado em que as partes interessadas interajam através de uma única interface para aceder a dados integrados e resultados derivados.

Em termos de escalabilidade, o fluxo será avaliado em múltiplos troços com padrões de dados heterogéneos, com vista a consolidar regras de ingestão e associação reutilizáveis. A generalização a outros ativos lineares será discutida como extensão direta do mesmo princípio de integração, ajustando o modelo de referência e as estratégias de ligação conforme o tipo de ativo.

A estratégia de associação será alargada para além da ligação baseada em identificadores, passando a incluir referências por cadeia ao longo do alinhamento, correspondências baseadas em coordenadas e ligações a ponto de referência específicos quando os identificadores não estiverem disponíveis.

Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto NRPCES – "New Replacement Policy Considering Environmental Sustainability", financiado pelo Programa EUROGIA2030, no âmbito da EUREKA Clusters Sustainability Call 2022 (SUS2022-039), com cofinanciamento nacional do FEDER, através do programa Norte 2030, no enquadramento do Portugal 2030, com o número de projeto nacional 19217. Os autores agradecem igualmente o apoio da unidade de investigação UIDB/04708/2020 (DOI: 10.54499/UIDB/04708/2020) e do financiamento programático - UIDP/04708/2020 (DOI: 10.54499/UIDP/04708/2020), atribuídos ao CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções – financiados por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).

Referências

- [1] M. Garramone, E. Tonelli, and M. Scaioni, “A MULTI-SCALE BIM/GIS FRAMEWORK FOR RAILWAYS ASSET MANAGEMENT,” in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Feb. 2022, pp. 95–102. doi: 10.5194/isprs-archives-XLVI-5-W1-2022-95-2022.
- [2] X. Liu, X. Wang, G. Wright, J. C. P. Cheng, X. Li, and R. Liu, “A state-of-the-art review on the integration of Building Information Modeling (BIM) and Geographic Information System (GIS),” Feb. 01, 2017, *MDPI*. doi: 10.3390/ijgi6020053.
- [3] S. Cavieres-Lagos, F. Muñoz La Rivera, E. Atencio, and R. F. Herrera, “Integration of BIM Tools for the Facility Management of Railway Bridges,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 14, Jul. 2024, doi: 10.3390/app14146209.
- [4] J. J. Cepa, M. G. Alberti, R. M. Pavón, and J. A. Calvo, “Integrating BIM and GIS for an Existing Infrastructure,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 23, Dec. 2024, doi: 10.3390/app142310962.
- [5] Y. Gao, G. Xiong, Z. Hu, C. Chai, and H. Li, “Bridge Digital Twin for Practical Bridge Operation and Maintenance by Integrating GIS and BIM,” *Buildings*, vol. 14, no. 12, Dec. 2024, doi: 10.3390/buildings14123731.
- [6] C. Biagini, A. Bongini, and L. Marzi, “FROM BIM TO DIGITAL TWIN. IOT DATA INTEGRATION IN ASSET MANAGEMENT PLATFORM,” *Journal of Information Technology in Construction*, vol. 29, pp. 1103–1127, 2024, doi: 10.36680/j.itcon.2024.049.
- [7] ESRI, “ArcGIS Pro.” Accessed: Sep. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview>
- [8] Railway Gazette International, “Passenger trains return to Porto freight line.” Accessed: Sep. 25, 2025. [Online]. Available: <https://www.railwaygazette.com/passenger/passenger-trains-return-to-porto-freight-line/68395.article?adredir=1>
- [9] Porto Canal / Agências, “Linha de Leixões supera 155 mil passageiros nos primeiros três meses após reabrir.” Accessed: Sep. 25, 2025. [Online]. Available: <https://portocanal.sapo.pt/noticia/363990>