

GERAÇÃO AUTOMÁTICA DE MODELOS BIM PARA INFRASTRUTURAS FERRÓVIARIAS

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

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

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

Resumo

A descarbonização das infraestruturas ferroviárias transcende a inovação ao nível dos materiais, exigindo a adoção de processos digitais que integrem princípios de sustentabilidade e economia circular desde as fases iniciais. Este enquadramento sublinha a importância de modelos digitais interoperáveis para corredores ferroviários existentes. Os progressos no processamento de dados geoespaciais e na classificação semântica originaram condições para automatizar a geração de modelos openBIM aplicados à infraestrutura ferroviária. O presente artigo expõe um processo automatizado, concebido no âmbito do projeto NRPCES-EU, que transforma dados geoespaciais abertos em modelos ferroviários IFC 4.3 centrados no alinhamento e preparados para enriquecimento. A estrutura do modelo segue os padrões da *buildingSMART*, assegurando consistência e interoperabilidade. O resultado constitui uma base normalizada para o inventário de ativos ferroviários e uma referência linear consistente para ligação de conjuntos de dados externos. A metodologia implementada envolve a reconstrução paramétrica do alinhamento e do enriquecimento semântico, recorrendo a conceitos do *buildingSMART Data Dictionary* e a propriedades alinhadas com *Product Data Templates*. A aplicação à Linha de Leixões demonstra a viabilidade da geração automática de modelos IFC 4.3, constituindo um ponto de partida escalável para inventário de ativos e a integração de dados ao longo do ciclo de vida.

1. Introdução

A infraestrutura ferroviária desempenha um papel crucial nas estratégias de mobilidade sustentável e de descarbonização. O setor ferroviário, enquanto sistema de longa duração e com utilização intensiva, enfrenta uma pressão crescente para reduzir os impactos ambientais, garantindo simultaneamente a segurança, a fiabilidade e a rentabilidade das operações ao longo do ciclo de vida. Para enfrentar estes desafios, torna-se imperativo dispor de representações digitais preparadas para apoiar a tomada de decisão, nomeadamente na manutenção e na gestão do desempenho operacional [1]. Os progressos recentes na digitalização têm impulsionado o desenvolvimento de abordagens de representação mais inteligentes e orientadas para a partilha rápida de informação. Neste contexto, os gémeos digitais surgem como um elemento chave no

setor da engenharia, ao permitirem a ligação entre ativos físicos e as representações virtuais enriquecidas com dados. No setor ferroviário, os gémeos digitais têm um papel relevante em aplicações como a monitorização do estado de conservação, a manutenção preditiva, a otimização operacional e a segurança [2]. Contudo, na prática corrente, muitas implementações são baseadas em modelos *Building Information Modelling* (BIM) criados manualmente, limitando a sua escalabilidade em ativos lineares de grande extensão [3]. Consequentemente, as iniciativas de gémeos digitais tendem a privilegiar a integração de sensores e a análise de dados, partindo implicitamente do pressuposto de que existem modelos de base capazes de os receber, o que, em muitos casos, não se verifica.

Em linhas ferroviárias existentes e de grande extensão, a informação digital de projeto é frequentemente inexistente, desatualizada ou apenas parcialmente disponível. A caracterização geométrica do corredor ferroviário pode valer-se de dados geoespaciais, tais como eixos de via e modelos digitais de terreno. Não obstante, a interoperabilidade entre Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e BIM continua a constituir um desafio. Enquanto os SIG são adequados à representação e análise espacial, os ambientes BIM fornecem modelos estruturados para a gestão de informação. A articulação entre estes dois domínios é complexa, pois os processos de transformação SIG-BIM são morosos, suscetíveis a erros e pouco compatíveis com a escalabilidade e o ritmo de evolução exigidos pelos processos de digitalização [4]. Esta lacuna é evidente na representação da geometria ferroviária, que assume um papel estrutural na definição do corredor. Diversos estudos têm sido conduzidos sobre a reconstrução de alinhamentos ferroviários com recurso a dados SIG, utilizando métodos automáticos de otimização com restrições que conseguem recuperar a geometria da linha [5, 6]. Apesar destes progressos, as atuais abordagens operam, de modo geral, de forma independente em relação a modelos de informação normalizados e não abordam explicitamente a representação dos alinhamentos em esquemas openBIM, como as *Industry Foundation Classes* (IFC).

O desenvolvimento do IFC 4.3, formalizado na norma ISO 16739-1, constitui um avanço significativo na normalização e interoperabilidade da informação aplicada a infraestruturas, ao introduzir suporte explícito para modelos lineares ferroviários, no ecossistema buildingSMART. Apesar dos progressos, a implementação prática do IFC 4.3 em projetos ferroviários continua limitada. Os estudos iniciais demonstram a viabilidade da utilização de processos semi-manuais, suportados por dados SIG, para a reconstrução de alinhamentos ferroviários em IFC. Contudo, é importante salientar que esses esforços revelam limitações significativas em termos de automatização, da escalabilidade e da consistência semântica da informação [7]. Na ausência de recursos semânticos normalizados, tais como o *buildingSMART Data Dictionary* (bSDD), que assegura a definição e identificação semântica de classes e propriedades, e os *Product Data Templates* (PDTs), que estruturam os respetivos requisitos e domínios de valores [8, 9], é espetável que os modelos ferroviários baseados em IFC tendam a apresentar classificações inconsistentes e atribuição incompleta de propriedades. Neste sentido, torna-se evidente a necessidade de desenvolver processos automatizados e conformes com os padrões, capazes de articular dados geoespaciais e a geometria ferroviária, viabilizando processos digitais escaláveis e semanticamente consistentes. Os processos em questão representam uma etapa crucial no sentido de mitigar a carência de informação digital estruturada e coerente nas infraestruturas ferroviárias existentes.

2. Metodologia para a geração automática de modelos ferroviários IFC 4.3

Esta secção expõe uma visão geral da metodologia para a geração automática de modelos de informação ferroviária em IFC 4.3 com base em dados geoespaciais. A metodologia combina a extração seletiva de dados geoespaciais, a análise e a reconstrução paramétrica de alinhamentos e o enriquecimento semântico, fundamentados no bSDD e PDTS. Este enquadramento permite a transformação estruturada de dados SIG em modelos IFC 4.3 normalizados. A articulação destes processos promove a interoperabilidade entre os domínios SIG e BIM. Os modelos gerados apresentam escalabilidade, podem ser reutilizados e progressivamente enriquecidos, de modo a suportar a gestão e a análise da infraestrutura ferroviária. A Figura 1 esquematiza uma visão global das principais etapas da metodologia.

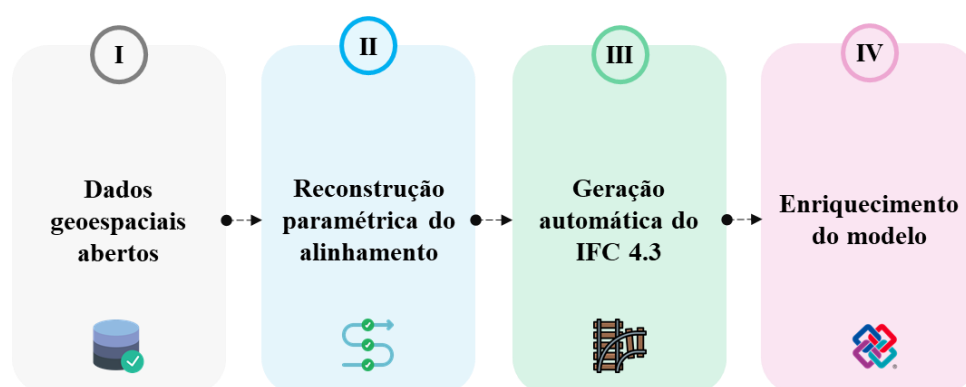


Figura 1. Visão geral da metodologia para a geração automática de modelos ferroviários IFC 4.3 a partir de dados geoespaciais.

2.1 Aquisição de dados abertos

A metodologia é iniciada com a aquisição automatizada de informação geoespacial relevante para a caracterização do corredor ferroviário. Esta etapa baseia-se na integração de dados provenientes de fontes abertas com conjuntos de dados oficiais de referência, designadamente informação institucional disponibilizada pela Infraestruturas de Portugal (IP) e pela Direção Geral do Território (DGT), assegurando coerência geométrica desde o início do processo.

A geometria da via ferroviária é obtida automaticamente a partir do OpenStreetMap (OSM) [10], recorrendo a consultas espaciais e semânticas efetuadas diretamente através da Overpass API. Este procedimento possibilita a extração sistemática da geometria da via, bem como dos elementos de referência associados ao corredor envolvente, sem necessidade de operações manuais. A informação adicional obtida é submetida a um processo de tratamento, com vista à criação de uma representação singular e contínua do eixo ferroviário.

Em função dos objetivos da análise, esta representação pode abranger a totalidade de uma linha ferroviária ou ser restringida a um segmento específico, definido com base em estações ou limites de quilometragem. Desta forma, garante-se que a geometria resultante define um alinhamento coerente, adequado ao processamento paramétrico subsequente e passível de ser tratada por troços de dimensão controlada. O conjunto de dados preparado nesta fase estabelece a base geométrica necessária para a reconstrução paramétrica do alinhamento ferroviário, apresentada na Secção 2.2.

2.2 Reconstrução paramétrica do alinhamento ferroviário

O alinhamento ferroviário constitui o elemento geométrico estruturante do corredor, estabelecendo a referência linear necessária às etapas subsequentes de modelação baseada no esquema IFC. Em conformidade com a metodologia aplicada, a geometria inicial, representada por um eixo derivado de dados SIG, é convertida num alinhamento paramétrico contínuo, definido ao longo da quilometragem ferroviária e passível de regeneração consistente a partir dos seus parâmetros.

A reconstrução paramétrica do alinhamento contempla, de forma integrada, a geometria em planta (alinhamento horizontal), o perfil longitudinal (alinhamento vertical) e, sempre que a informação se encontre disponível, os parâmetros de sobrelevação da via. Esta descrição paramétrica garante a compatibilidade com o esquema de alinhamento IFC, permitindo a associação consistente, no modelo, de informação técnica e operacional ao longo da quilometragem da via.

O processo de reconstrução assenta na análise da geometria do eixo e na sua decomposição numa sequência ordenada de elementos geométricos, incluindo troços retilíneos, curvas circulares e curvas de transição. A identificação e a parametrização destes elementos são realizadas através de um processo faseado e orientado por regras explícitas, que propõem segmentos candidatos e procedem ao seu ajuste durante a conversão paramétrica, garantindo continuidade geométrica e coerência na sequência dos elementos.

O alinhamento resultante é descrito por um conjunto de parâmetros, permitindo a sua regeneração independentemente da discretização geométrica inicial. Esta representação possibilita o mapeamento direto para entidades de alinhamento compatíveis com o esquema IFC 4.3, constituindo uma base robusta para a geração do modelo ferroviário nas etapas subsequentes.

2.3 Geração automática do modelo ferroviário IFC 4.3

A geração do modelo ferroviário em IFC 4.3 é realizada de forma automática a partir do alinhamento paramétrico reconstruído, recorrendo a um módulo dedicado desenvolvido com base na biblioteca *IfcOpenShell* [11]. Este módulo implementa o esquema IFC, permitindo a criação de modelos conformes com o padrão e semanticamente interoperáveis, sem necessidade de intervenção manual.

O processo inicia-se com a instanciação do contexto do projeto IFC, incluindo a definição das unidades e do sistema de referência espacial através da entidade *IfcProjectedCRS*. Esta etapa assegurada a georreferenciação do modelo de acordo com o sistema cartográfico dos dados SIG, considerando limitações de visualização associadas a coordenadas afastadas da origem. Em seguida, é construída uma estrutura espacial orientada ao domínio ferroviário, organizada de acordo com a hierarquia IFC, através das entidades *IfcProject*, *IfcSite*, *IfcRailway* e *IfcRailwayPart*, estabelecendo o enquadramento lógico da infraestrutura.

O alinhamento reconstruído é integrado explicitamente no modelo como uma entidade *IfcAlignment*, assumindo o papel de sistema de referência linear do corredor ferroviário. A representação é efetuada através das componentes horizontal, vertical e de sobrelevação, em conformidade com as entidades de alinhamento definidas no esquema IFC, assegurando o posicionamento, a referenciação e a consulta estruturada da informação. O resultado é um modelo ferroviário tridimensional centrado no alinhamento (Figura 2), que constitui a base para a fase seguinte de consolidação geométrica e enriquecimento semântico.

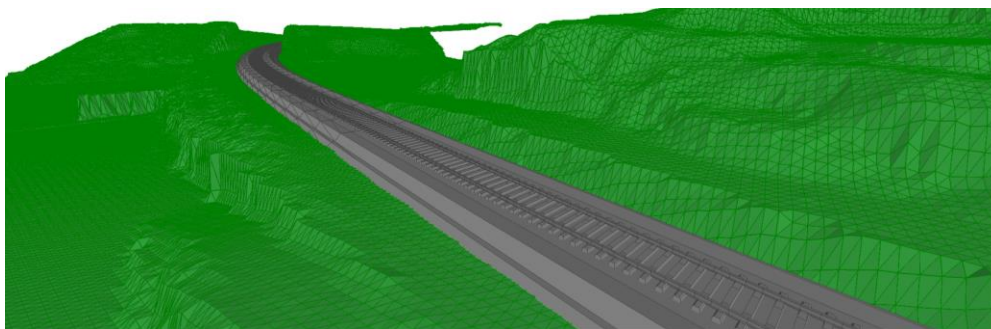


Figure 1. Geração do modelo ferroviário IFC 4.3.

2.4 Enriquecimento do modelo IFC 4.3

Após a geração do modelo ferroviário em IFC 4.3, procede-se à etapa de enriquecimento geométrico, semântico e contextual, concebida como um processo de pós-processamento independente. Esta separação garante a otimização do nível de enriquecimento em conformidade com o volume, a qualidade e a maturidade dos dados disponíveis, sem comprometer a geometria base do modelo.

O enriquecimento baseado na geometria fundamenta-se na extração de descritores quantitativos derivados da geometria reconstruída, por exemplo, comprimentos de troços, raios de curvatura, quilometragens e o parâmetro da clotóide (A), os quais são integrados no modelo como propriedades, sem alterar a sua representação geométrica.

Em paralelo, procede-se ao enriquecimento semântico, através da atribuição de significado normalizado e identidade semântica aos elementos do modelo. Para tal, são utilizados dois mecanismos complementares. Em primeiro lugar, recorre-se a identificadores conceptuais fornecidos pela bSDD, os quais são incorporados no modelo através dos mecanismos nativos de classificação do IFC, acompanhados de metadados que permitem a rastreabilidade semântica. Posteriormente, o modelo é enriquecido com base em PDTs, que permitem a atribuição sistemática de propriedades e quantidades normalizadas aos ativos ferroviários, estabelecendo uma distinção clara entre informação ao nível do tipo, como especificações ou parâmetros padronizados, e informação ao nível da instância, associada a características localizadas.

Para além do enriquecimento interno do modelo, são integradas camadas de informação derivadas de dados SIG, introduzindo contexto ao nível do corredor ferroviário. Este enriquecimento contextual inclui informação não geométrica e dependente da localização, como pontos operacionais, passagens de nível, localização de dispositivos de monitorização e sensores instalados ao longo da via, permitindo a sua referência espacial. Adicionalmente, elementos envolventes ao corredor, tais como pontes, viadutos, túneis ou infraestruturas hidráulicas, frequentemente disponíveis em bases de dados geoespaciais, podem ser espacialmente associados ao modelo final como camadas de informação contextual, de forma a permitir a sua posterior integração em plataformas de gémeos digitais.

Esta referência espacial e contextual estabelece uma base sólida para a articulação futura com dados operacionais e históricos, como informação de manutenção, tipicamente geridos em plataformas de gestão externas, contribuindo para a construção de modelos ferroviários semanticamente consistentes e preparados para aplicações avançadas de digitalização e gémeos digitais.

3. Caso de estudo

A metodologia foi aplicada à Linha de Leixões (Porto, Portugal), um corredor ferroviário com cerca de 19 km de extensão, que estabelece a ligação entre a cidade do Porto e o Porto de Leixões. Este corredor constitui o *Use Case 4* do projeto NRPCES, no âmbito do qual se pretende desenvolver e validar metodologias digitais orientadas para a monitorização, manutenção e gestão de ativos ferroviários.

A escolha desta linha justifica-se pela sua relevância técnica e operacional. Trata-se de uma infraestrutura existente, recentemente reativada ao tráfego de passageiros, num contexto em que a disponibilidade de informação digital estruturada é limitada. Nesse sentido, a Linha de Leixões (Figura 3) representa um caso particularmente adequado para avaliar a capacidade da metodologia em gerar uma base openBIM interoperável a partir de dados geoespaciais disponíveis. Do ponto de vista geométrico, o corredor apresenta uma diversidade representativa de condições de traçado, incluindo troços retilíneos, curvas circulares e zonas de transição. Esta variabilidade permite testar o processo de reconstrução paramétrica do alinhamento horizontal em diferentes configurações geométricas.

A recente reativação da linha confere particular relevância ao caso de estudo, na medida em que cria uma oportunidade para a implementação de abordagens de monitorização preventiva suportadas por modelos digitais semanticamente enriquecidos. Neste contexto, o modelo IFC 4.3 gerado constitui uma base estruturada para a futura integração de dados de inspeção e monitorização.

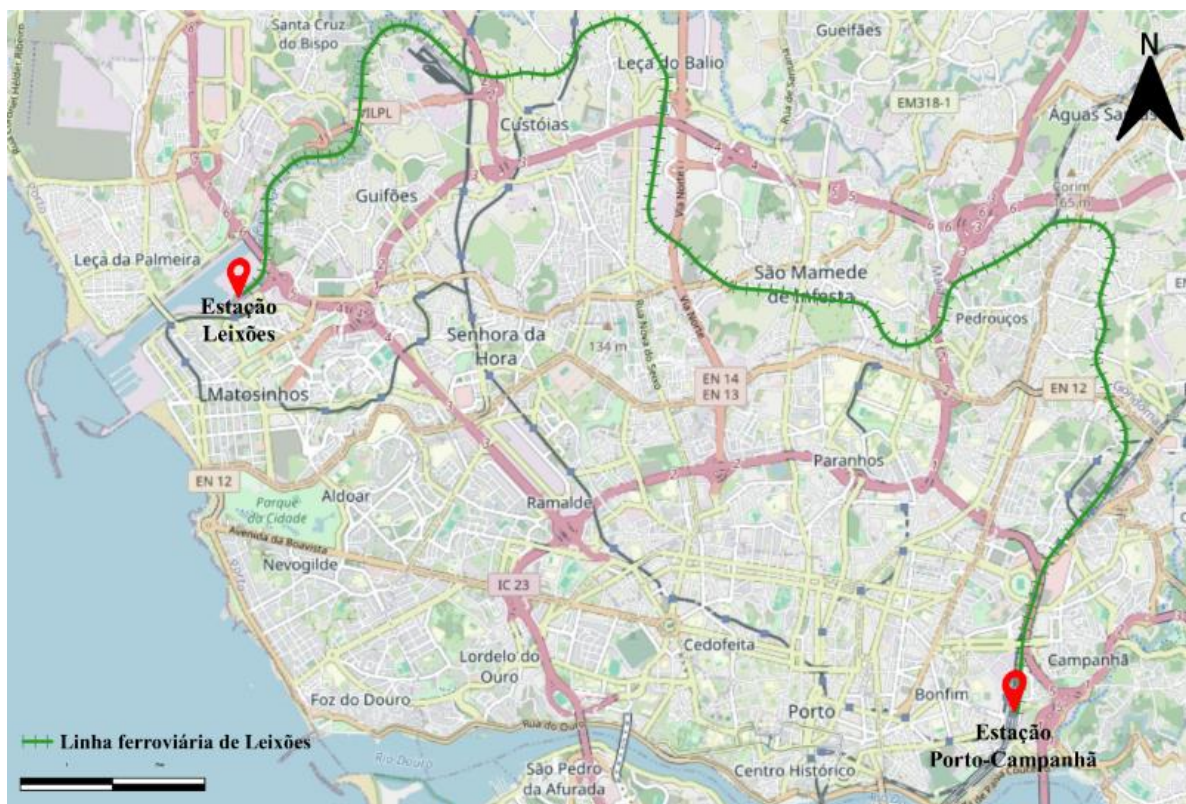


Figura 2. Traçado da Linha de Leixões e estações terminais.

Inicialmente, procedeu-se à extração e processamento da geometria da linha, com vista à geração de um alinhamento paramétrico contínuo, definido em função da quilometragem ferroviária e compatível com o esquema IFC 4.3. Esta representação permitiu estruturar a geometria em planta, o perfil longitudinal, com base em dados nacionais de terreno, e a informação de sobrelevação disponibilizada pela IP. De seguida, o modelo foi organizado segundo um esquema normalizado IFC 4.3, recorrendo a entidades orientadas para o domínio ferroviário.

A qualidade geométrica do alinhamento reconstruído foi avaliada através da comparação entre a geometria paramétrica gerada e a linha original derivada dos dados geoespaciais. A análise foi realizada em 21 segmentos sucessivos, com cerca de 1 km cada, recorrendo ao desvio médio, ao RMSE e ao desvio máximo. Os resultados indicam um desempenho global satisfatório, com um RMSE ponderado de 1.92 m e um desvio médio ponderado de cerca de 1.43 m. Em termos espaciais, 15 dos 21 segmentos, correspondentes a cerca de 71% da extensão analisada, apresentaram RMSE inferior a 2 m. Foi identificado um segmento crítico entre os PK 6+000 e 7+000, com desvio médio elevado de 7.19 m. Este resultado evidencia limitações quanto à reconstrução paramétrica do alinhamento em zonas com maior complexidade geométrica. No caso específico deste troço, os desvios observados são consistentes com a presença de aparelhos de via, nomeadamente mudanças de via, que alteram localmente a geometria extraída do eixo ferroviário e introduzem ambiguidades na definição do traçado de referência.

Após a geração do modelo IFC, foi implementada uma etapa de enriquecimento em pós-processamento, com o objetivo de reforçar a utilidade informacional do modelo. Este enriquecimento combina três camadas de informação complementares. Num primeiro momento, procede-se ao enriquecimento geométrico, fundamentado na extração de informação relacionada com os alinhamentos, devidamente definidos ao longo da quilometragem da via. De seguida, procede-se ao enriquecimento semântico, através da atribuição de classificações e propriedades normalizadas alinhadas com conceitos bSDD e PDTs, permitindo a criação de uma base interoperável entre diferentes domínios de informação. Por fim, é integrada informação contextual do corredor, derivada de dados SIG, incluindo camadas adicionais que permitem estruturar um inventário de ativos, constituindo uma base digital para a gestão de informação não apenas da via ferroviária, mas também das restantes componentes que integram a infraestrutura.

De forma geral, a Linha de Leixões evidencia que os dados geoespaciais podem ser sistematicamente convertidos em modelos ferroviários IFC 4.3, em conformidade com o padrão estabelecido, e semanticamente enriquecidos, mediante um fluxo automatizado de integração SIG-BIM. Ao articular dados SIG com representações OpenBIM, a abordagem proposta reduz a dependência de processos manuais de modelação geométrica e fornece uma base normalizada, reutilizável e preparada para apoiar a gestão de ativos, bem como a integração futura em aplicações de gémeos digitais.

4. Conclusões

A geração automática de modelos ferroviários IFC 4.3 a partir de dados geoespaciais constitui uma resposta prática e eficaz à lacuna persistente na articulação entre informação SIG e modelos BIM. A metodologia apresentada define um processo normalizado, conforme com o

esquema IFC 4.3, permitindo transformar informação derivada dos SIG numa base openBIM interoperável, concebida para reutilização e extensão ao longo do tempo.

A aplicação da metodologia à Linha de Leixões demonstra a viabilidade da produção automática de um modelo ferroviário informacional fiável a partir de dados geoespaciais, sem necessidade de recorrer à modelação BIM manual. A reconstrução paramétrica do alinhamento ocupa uma posição central nesse processo, fornecendo uma estrutura geométrica coerente e uma referência linear contínua que organiza e posiciona a informação ao longo da quilometragem da via.

A avaliação geométrica realizada evidencia uma concordância global satisfatória entre o alinhamento reconstruído e a geometria de referência, embora tenham sido identificados desvios localizados que deverão ser considerados em desenvolvimentos futuros, nomeadamente através da introdução de mecanismos adicionais de validação e otimização local.

O enriquecimento semântico e contextual, fundamentado em conceitos do bSDD e propriedades alinhadas com os PDTs, permite estruturar um inventário de ativos e apoiar análises orientadas para a gestão do ciclo de vida das infraestruturas ferroviárias existentes. Em particular, o modelo IFC estabelece uma base sólida para a associação estruturada de dados externos, tais como o registo de inspeção, as observações pontuais dos sensores e os indicadores de sustentabilidade, corretamente referenciados à localização ao longo do corredor ferroviário.

Em termos globais, a geração automatizada de modelos IFC 4.3 reduz a dependência de processos manuais de modelação BIM, promovendo a digitalização escalável de ativos existentes. A contribuição deste trabalho visa disponibilizar uma base openBIM reproduzível e extensível a diferentes linhas, adequada ao suporte de gestão de ativos e à integração em aplicações de gémeos digitais.

Como desenvolvimentos futuros, prevê-se o reforço dos algoritmos de reconstrução paramétrica, em particular zonas com aparelhos de via, mudanças de via ou alterações súbitas do eixo ferroviário. Pretende-se ainda aumentar o nível de detalhe do modelo IFC gerado, através da inclusão progressiva de elementos ferroviários envolventes ao corredor, como sinalização, catenárias e estações. Por fim, a metodologia deverá ser testada em outras linhas ferroviárias existentes, como diferentes características geométricas e operacionais, de modo a avaliar a escalabilidade, robustez e replicabilidade.

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] Kaewunruen, S. and N. Xu, Digital Twin for Sustainability Evaluation of Railway Station Buildings. 2018. Volume 4 - 2018.DOI: 10.3389/fbuil.2018.00077.
- [2] Thompson, E.A., et al., Revolutionizing railway systems: A systematic review of digital twin technologies. *High-speed Railway*, 2025. 3(3): p. 238-250.DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hspr.2025.05.005>.
- [3] Kaewunruen, S., et al., Digital twins for managing railway maintenance and resilience [version 2; peer review: 2 approved]. 2021. 1(91).DOI: 10.12688/openreseurope.13806.2.
- [4] Ciccone, A., et al. Application of openBIM for the Management of Existing Railway Infrastructure: Case Study of the Cancellò–Benevento Railway Line. *Sustainability*, 2022. 14, 2283 DOI: 10.3390/su14042283.
- [5] Pu, H., et al., Recreating horizontal alignments of existing railways with a hybrid analytic and harmony search algorithm. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2024. 128: p. 107354.DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107354>.
- [6] Castro, A., et al., A simple method for automatic recreation of railway horizontal alignments. *Railway Engineering Science*, 2025. 33(1): p. 62-78.DOI: 10.1007/s40534-024-00348-2.
- [7] Garramone, M. and M. Scaioni, IFCALIGNMENT FOR RASTER-TO-VECTOR GIS RAILWAY CENTRELINE: A CASE STUDY IN THE SOUTH OF ITALY. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2022. XLIII-B4-2022: p. 39-45.DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B4-2022-39-2022.
- [8] Parracho, D.F.R. and J. Poças Martins, idBIM4.0-National Library of BIM Objects: The Railway. 2023. Available from: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/161913>.
- [9] buildingSMART, I., buildingSMART Data Dictionary (bSDD), 2024, Geneva, Switzerland: buildingSMART International. Available from: <https://www.buildingsmart.org/users/services/buildingsmart-data-dictionary/>.
- [10] OpenStreetMap. ArcGIS Online distribution. 2025; Available from: <https://openstreetmap.maps.arcgis.com/home/index.html>.
- [11] Krijnen, T. and D. Moul, IfcOpenShell: The open source IFC toolkit and geometry engine. 2026.