

METODOLOGIA BIM E GÉMEOS DIGITAIS EM BARRAGENS DE ATERRO: CONCEITOS E REVISÃO DA LITERATURA

BIM methodology and digital twins in embankment dams: concepts and literature review

Alexandra Rosa^a, Miguel Azenha^b, Joana Carreto^a

^a Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.

^b Universidade do Minho, ISISE, ARISE, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal.

RESUMO – A evolução da metodologia *Building Information Modelling* (BIM) e a sua extensão aos gémeos digitais têm sido exploradas na indústria da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO) para otimizar fluxos de trabalho, melhorar a comunicação e partilhar/estruturar informação, apoiando tomadas de decisão mais informadas. Apesar dos benefícios evidentes, a sua aplicação às barragens de aterro é ainda incipiente. Este estudo apresenta uma revisão do estado da arte neste contexto. São discutidos diversos aspetos do BIM, como a modelação 3D, requisitos de informação, recolha e organização de dados, planeamento e gestão e otimização de custos. Aborda-se também o papel dos gémeos digitais na monitorização estrutural, a integração com IoT, o desenvolvimento de modelos preditivos e a gestão da informação através de plataformas, a integração de bases de dados e o recurso à interoperabilidade semântica. Esta análise termina com a identificação de desafios e lacunas de investigação, oferecendo pistas relevantes para futuros trabalhos de investigação e aplicação.

ABSTRACT – The evolution of the Building Information Modelling (BIM) methodology and its extension to digital twins have been extensively explored by the AECO industry. They facilitate the optimization of workflows, improve communication, and enable the sharing and structuring of information, thereby supporting more informed decision-making. Despite their clear benefits, their application to embankment dams remains in its early stages. This study presents a comprehensive review in this context. Several BIM features are discussed, including 3D modelling, information requirements, data acquisition and organization, planning, quantity take-off, and cost management. The role of digital twins in structural monitoring is also examined, including the integration of IoT technologies and the development of predictive models. Information management is achieved through platforms, database integration, and the use of semantic interoperability, with their advantages also outlined. This analysis ends with the identification of challenges and knowledge gaps, providing valuable insights for future research.

Palavras Chave – modelação da informação da construção (BIM), gémeos digitais, barragens de aterro.

Keywords – building information modelling (BIM), digital twins, embankment dams.

E-mails: aorosa@lnec.pt (A. Rosa), miguel.azenha@civil.uminho.pt (M. Azenha), jcarreto@lnec.pt (J. Carreto)

ORCID: orcid.org/0009-0003-7667-3412 (A. Rosa), orcid.org/0000-0003-1374-9427 (M. Azenha), orcid.org/0000-0002-3602-3939 (J. Carreto)

1 – INTRODUÇÃO

A digitalização da construção é uma área científica que tem recebido bastante atenção nos últimos anos devido ao seu potencial para melhorar a comunicação, a colaboração e a partilha de informação entre os diversos intervenientes na indústria da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO). A integração do *Building Information Modelling* (BIM), ou Modelação de Informação da Construção, com os *digital twins* (DT), ou gémeos digitais, constitui um elemento-chave desta tendência, com recomendações e normas a serem progressivamente difundidas em todo o mundo. De facto, vários países como o Reino Unido, a Noruega, a Suécia, a Finlândia, a Dinamarca, a Austrália, Singapura e os Emirados Árabes Unidos, etc., já tornaram obrigatória a utilização da metodologia BIM para a conceção e realização de obras públicas (Shah, 2025).

Apesar das inúmeras vantagens demonstradas pela quantidade de casos de estudo referentes a edifícios, a aplicação dos gémeos digitais e do BIM às estruturas geotécnicas, e nomeadamente às barragens de aterro, ainda se encontra numa fase inicial. A integração deste tipo de inovações tecnológicas numa área específica da Engenharia Civil, como as barragens de aterro, requer a colaboração entre entidades da informática, profissionais especializados em barragens de aterro e organismos normativos.

Em Portugal, a publicação da Portaria n.º 255/2023 de 7 de agosto, assinala a importância e recomenda o recurso à “modelação digital de dados de construção” por intermédio da metodologia BIM, na elaboração dos projetos de obras públicas, incluindo a definição dos requisitos de informação e níveis de desenvolvimento, a descrição e atribuição de responsabilidades no contexto BIM, o faseamento construtivo no modelo e a descrição do fluxo de trabalhos bem definidos. Acresce o comunicado do Conselho de Ministros de 25 de setembro de 2025, com a Estratégia Nacional para a Implementação da Metodologia BIM (PortugalBIM), que surge como resposta à necessidade de criar mecanismos de apoio à adoção do BIM.

A necessidade de gerir infraestruturas envelhecidas, como é o caso do parque de barragens em Portugal, de uma forma holística e mais eficaz, estimulou o desenvolvimento de novas abordagens para dimensionar, construir, explorar e monitorizar estes ativos, aos quais o conceito de gémeos digitais está estreitamente associado. Neste contexto, torna-se, portanto, fundamental avaliar e sintetizar o estado da arte, tanto em Portugal como a nível internacional, relativamente à aplicação do BIM e dos gémeos digitais nas barragens de aterro, de forma a identificar lacunas, desafios, progressos e oportunidades para a sua implementação futura.

2 – METODOLOGIA

Para esta revisão foi dada preferência à consulta de artigos científicos, artigos publicados em conferências, relatórios técnicos e dissertações extraídos de páginas científicas como o Google Scholar, Scopus e Web of Science. Complementarmente, foram consideradas fontes provenientes de websites institucionais e de empresas do setor.

As principais palavras-chave utilizadas nessa pesquisa, tanto em inglês como nas respetivas traduções para português, no singular e nos seus plurais, foram combinadas para ampliar a abrangência dos resultados e as suas combinações (Quadro 1). A título de exemplo, foram feitas pesquisas utilizando os termos BIM + Barragem, BIM + Dam, Digital Twins + Barragem, etc.

Foram também pesquisadas publicações com base nas referências bibliográficas de trabalhos previamente analisados na íntegra, incluindo documentos redigidos em inglês, português e espanhol.

Inicialmente, delimitou-se temporalmente a pesquisa para documentos entre 2010 e 2025 para garantir a inclusão das tecnologias mais recentes. No entanto, dada a escassez de estudos específicos sobre barragens de aterro, estendeu-se essa consulta até ao ano 2000. Neste sentido, considerou-se pertinente incluir na pesquisa a análise de outras infraestruturas, tais como pontes e outras infraestruturas maioritariamente geotécnicas – túneis, estradas e ferrovias. Estas estruturas partilham várias características com as barragens, nomeadamente a elevada complexidade construtiva, a

necessidade de coordenação multidisciplinar, uma vida útil longa e a exigência de monitorização contínua para garantir a segurança e o seu desempenho. Apesar da maturidade do BIM e dos gémeos digitais nestes sectores não ser tão abrangente como a dos edifícios, estas oferecem exemplos de práticas que podem ser adaptadas ao contexto das barragens de aterro.

Quadro 1 – Principais palavras-chave pesquisadas.

Temas	Inglês	Português
BIM	Building Information Modelling (BIM)	Modelação de Informação da Construção
Gémeos Digitais	Digital Twin, DT	Gémeo Digital
Barragens	Dam, Embankment dam	Barragem, Barragem de aterro
Gestão/Management	Management, Data Management, Asset management, Infrastructure management, Platform, Ontology	Gestão, Gestão de dados, Gestão de ativos, Gestão de infraestruturas, Organização da informação, Plataforma, Ontologia
Inspeção/Inspection	Inspection, Monitoring, Internet of Things (IoT)	Inspeção, Monitorização
Segurança/Safety	Safety Assessment, Finite Element Analysis (FEA)	Segurança, Método dos Elementos Finitos (MEF)

Numa fase preliminar, foram selecionadas as publicações que continham as palavras-chave no título e no resumo. Usando uma abordagem qualitativa, com base no teor e no grau de especificidade dos resumos e do objetivo definido no início deste capítulo, as publicações foram categorizadas segundo estes temas:

- Evolução do BIM e dos gémeos digitais na engenharia civil
- Diferenças entre um modelo BIM e um gémeo digital
- Gestão da informação e integração de sistemas
- BIM nas barragens de aterro
- Gémeos digitais nas barragens de aterro.

Após uma leitura geral dos documentos, as publicações foram avaliadas, considerando a relevância temática, o tipo de aplicação (modelação geométrica, integração com sensores, gestão de informação, simulação, etc.), o grau de detalhe (conceptual, descritivo ou prático), as tecnologias utilizadas (*softwares*, plataformas, bases de dados, ontologias, etc.) e os casos de estudo; as publicações que cumpriam estes critérios foram então analisadas em maior detalhe, de modo a garantir a sua elegibilidade para este estudo.

3 – ANÁLISE CRÍTICA DO ESTADO DA ARTE

3.1 – Evolução do BIM e dos Gémeos Digitais na Engenharia Civil

A origem do termo *Building Information Modelling* (BIM) não é clara, mas designações semelhantes foram identificadas em publicações tais como, *Building Product Model* por Eastman (1975) ou *Building Modelling* por Aish (1986). O desenvolvimento de desenhos assistidos por computador (CAD) surgiu como resposta às limitações dos métodos tradicionais de desenho, mais suscetíveis a erros e mais demorados de produzir ou modificar (Azenha et al., 2023), bem como a crescente necessidade de integrar múltiplos elementos de projeto num sistema unificado. Estes

sistemas evoluíram de ferramentas utilizadas de forma isolada por cada especialidade da construção para plataformas integradas, nas quais todos os intervenientes trabalham sobre uma base comum. Esta integração permite uma coordenação mais eficaz e a atualização simultânea dos elementos do projeto ao longo do ciclo de vida da obra, contribuindo para uma maior eficiência dos processos envolvidos (Aish, 1986).

Desde então, o BIM evoluiu significativamente e as três palavras que dão origem ao seu acrónimo – *Building, Information e Modelling* – constituem componentes essenciais para qualquer projeto de construção, segundo Azenha et al. (2023). O BIM baseia-se na aplicação de uma metodologia, conforme definido pela NP EN ISO 19650-1 (2025), que (1) otimiza a colaboração e comunicação entre intervenientes e (2) fornece uma abordagem estruturada e integrada de organizar processos e informação durante o ciclo de vida da obra, “formando uma base confiável de apoio à decisão”.

Ao longo dos anos, foram publicadas várias revisões sistemáticas da literatura, cada uma abordando diferentes particularidades da aplicação da metodologia BIM, seja em termos de processos, especialidades ou tipos de estruturas na engenharia civil. Destacam-se métodos de partilha de informação BIM (Lou et al., 2020), integração e colaboração no BIM (Ali et al., 2022), gestão de ativos (Koumou e Isafiade, 2024; Saback et al., 2022), propósitos BIM (Shishehgarkhaneh et al., 2022) e desafios na fase de projeto (Silva et al., 2024). No domínio das barragens destacam-se Hasan et al. (2023), que efetuam uma análise de tecnologias para avaliação de custos na construção de barragens de betão, e Wahyuningrum et al. (2020) e Wangchuk et al. (2024) que abordam as vantagens da implementação do BIM para barragens e para infraestruturas hidroelétricas, respetivamente.

Segundo Jiang et al. (2019), o crescimento do número e da complexidade dos projetos de engenharia veio revelar uma necessidade premente de aumentar o nível de colaboração entre diferentes intervenientes e plataformas referentes a um projeto de construção. A abordagem OpenBIM surge neste contexto e vem facilitar a gestão da informação, através da definição de requisitos normalizados para a representação, partilha, armazenamento e consulta da informação, garantindo a interoperabilidade desejada. Na base do OpenBIM surgem as IFC (*Industry Foundation Classes*), desenvolvidas pela buildingSMART. A buildingSMART International é um “organismo mundial que impulsiona a transformação digital da indústria da construção”, (...) “através da criação e adoção de normas e soluções abertas e internacionais para infraestruturas e edifícios” (buildingSMART Portugal, 2022).

As IFC constituem um conjunto de especificações abertas e globais para representar digitalmente ativos construídos, definidas num formato neutro e normalizado (ISO 16739-1, 2024), cuja extensão tem o mesmo nome “.ifc”. Este formato permite que a informação possa ser partilhada, interpretada e utilizada de forma consistente entre diferentes plataformas, aplicações e pessoas. Atualmente, a versão em vigor é a IFC 4.3 ADD2, sendo possível consultar as atualizações diretamente na base de dados das especificações IFC, disponível no site oficial da buildingSMART.

A origem do conceito de gémeos digitais data de 2002, e foi apresentado durante uma formação no centro de Gestão do Ciclo de Vida do Produto (*Product Lifecycle Management – PLM*), na Universidade do Michigan pelo Dr. Michael Grieves (Grieves e Vickers, 2016). A proposta inicial do conceito continha três componentes: o objeto físico, o objeto virtual e um mecanismo de partilha de dados/informação entre ambos, como representado na Figura 1 (Ali et al., 2022; Grieves, 2014). Por se tratar de um conceito ainda em fase embrionária, as limitações tecnológicas, como a baixa potência computacional ou a dificuldade de garantir a conectividade dos dispositivos à internet, e a imaturidade da disciplina de gestão de dados dificultaram a disseminação prática do conceito (Singh et al., 2021).

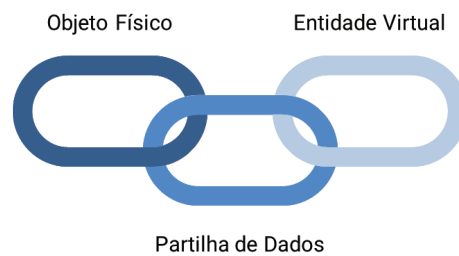


Fig. 1 – Principais componentes de um gêmeo digital.

O termo como é hoje conhecido surgiu em 2010 num plano estratégico tecnológico apresentado pela NASA como um dos grandes desafios técnicos a superar com o título “*Simulation-Based Systems Engineering: NASA Digital Twin*” (Shafto et al., 2010). A ideia por detrás desta definição é que um gêmeo digital é uma simulação integrada, multi-física, multi-escala e probabilística de um veículo ou sistema, que utiliza os melhores modelos físicos disponíveis, atualização de sensores, registos de manutenção e de dados, entre outros, para replicar o ciclo de vida do seu homólogo real. Os sistemas do gêmeo digital seriam capazes de mitigar danos ou a degradação na entidade real, recomendando alterações nesse sentido. De acordo com Wright e Davidson (2020), os gêmeos digitais são particularmente úteis para objetos que evoluem ao longo do tempo, auxiliando na monitorização, simulação, previsão e otimização de processos, etc. (Tao et al., 2022).

Segundo Hananto et al. (2024), desde 2014, os gêmeos digitais expandiram-se para além da aviação e encontraram aplicações noutros sectores (como na produção industrial, na saúde, etc.), incluindo na engenharia civil. A popularidade dos gêmeos digitais é evidente na Figura 2 que mostra o número de publicações que mencionam o termo *gêmeo digital* no título, resumo ou palavras-chave de um artigo, considerando apenas publicações em inglês provenientes de bases de dados Scopus e ScienceDirect (Singh et al., 2021).

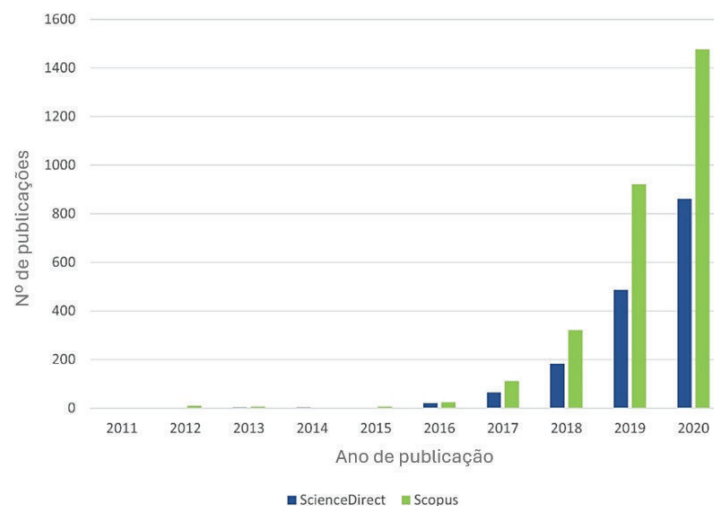


Fig. 2 – Número de publicações relacionadas com gêmeos digitais publicadas entre 2011 e 2020 no Scopus e no ScienceDirect, adaptado de Singh et al. (2021).

De acordo com Broo e Schooling (2023), os vários componentes de um gêmeo digital podem contribuir para uma representação abrangente e dinâmica de um ativo físico e contribuir para decisões bem fundamentadas e baseadas em dados obtidos ao longo do ciclo de vida do ativo. Estes componentes incluem o modelo 3D com geometria e metadados, sensores IoT (*Internet of Things*)

que recolhem dados em tempo real do ativo, formulários (*templates*) para organizar e estruturar os dados recolhidos, algoritmos de inteligência artificial e *machine learning* que, através da análise de dados, conseguem fornecer informações baseadas no registo histórico da documentação do projeto e nos eventos ocorridos durante as fases de construção e exploração e até mesmo, dados sobre o desempenho do ativo.

Apesar do crescimento dos gémeos digitais ter sido impulsionado pelo desenvolvimento de avanços tecnológicos, como o IoT, a inteligência artificial (IA), o *big data*, *machine learning*, plataformas, *clouds*, ambientes de dados comuns, modelação 3D, etc., foi também condicionado pela imaturidade dessas tecnologias, que ainda requerem investigação adicional para permitir explorar plenamente o potencial oferecido pelos gémeos digitais (Tao et al., 2022).

3.2 – Diferenças entre um Gémeo Digital e um modelo BIM

Os termos “modelo BIM” e “gémeo digital” são frequentemente mencionados em conjunto, nomeadamente no domínio da engenharia civil. Embora sejam distintos, eles estão interligados e a sua relação é crucial para a transformação digital na indústria da AECO.

Apesar de existirem diferentes interpretações do que representa um gémeo digital (Wright e Davidson, 2020), a definição mais aceite na comunidade científica estabelece que os dados devem fluir entre o objeto real e o digital, permitindo uma interação bidirecional em tempo real. Ou seja, uma alteração no objeto físico gera automaticamente uma alteração no objeto digital, e vice-versa. Por oposição, num modelo digital (também designado por modelo BIM) a partilha de dados é feita de forma manual nos dois sentidos, por isso, uma alteração no objeto real não tem efeito no seu homólogo digital.

Existe ainda um conceito que combina características dos dois modelos anteriores: *digital shadow* (sombra digital). Neste caso, os dados fluem automaticamente, mas de forma unidirecional entre o objeto real e o seu correspondente digital. Isso significa que qualquer alteração no objeto físico é refletida no objeto digital, mas alterações no objeto digital não afetam o objeto real (Fuller et al. (2020)). Uma representação destes três conceitos encontra-se esquematizada na Figura 3.

Assim, um modelo BIM pode servir de base para o desenvolvimento de um gémeo digital que, complementado pelas mais recentes tecnologias digitais, permite uma integração de dados em tempo real, a realização de análises preditivas e a possibilidade de impactar diretamente o objeto físico.

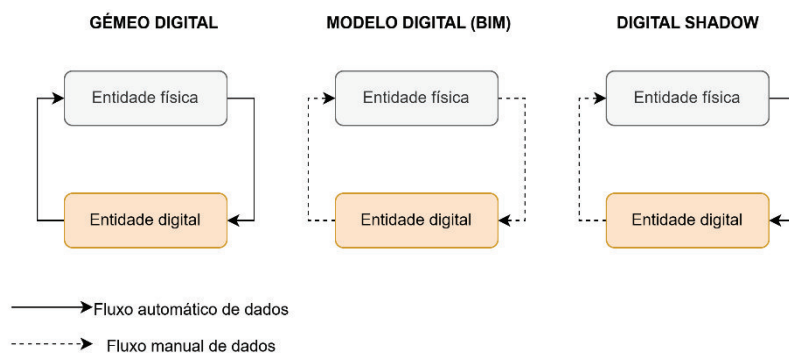


Fig. 3 – Diferenças entre um gémeo digital, um modelo digital (BIM) e uma *digital shadow*.

De acordo com Singh et al. (2021), uma tendência futura em franco desenvolvimento é o que se designa por *triplets* (trigêmeos) digitais que têm como base os gémeos digitais, mas distinguem-se por incluírem uma terceira camada que permite prever e simular cenários futuros. Esta terceira camada recorre a tecnologias como *machine learning*, inteligência artificial e análise avançada de

dados para modelar o estado hipotético ou futuro do ativo, antecipando eventuais alterações e contribuindo para uma tomada de decisão mais proactiva e para a otimização do mesmo ao longo do seu ciclo de vida.

3.3 – BIM nas barragens de aterro

3.3.1 – Propósitos BIM

A implementação da metodologia BIM em projetos de barragens de aterro requer a identificação dos propósitos BIM mais adequados, conforme descrito no Guia de Planeamento para a Execução de Projetos BIM (Messner et al., 2019). A definição dos propósitos é feita com base nos objetivos do projeto, nas fases do ciclo de vida e nas atividades habituais associadas a este tipo de estrutura, de forma a clarificar que processos irão beneficiar da implementação do BIM e com que objetivo é que a informação do modelo irá ser usada.

O Quadro 2 apresenta uma proposta para as principais fases do ciclo de vida de uma barragem de aterro – projeto, construção, primeiro enchimento e exploração (adaptado de Rosa et al. (2024) e Serra (2022)). Estes propósitos são explorados de forma transversal ao longo das secções seguintes, que abordam diferentes perspetivas e ferramentas relevantes para a sua aplicação a barragens de aterro ou a outro tipo de infraestruturas em que os conceitos discutidos possam ser relevantes.

3.3.2 – Modelação 3D

A modelação 3D pode ter várias dimensões tais como a geração do modelo da barragem, da sua fundação, a modelação de dispositivos, de equipamentos ou inclusive de ocorrências/anomalias observadas durante uma inspeção visual.

Atualmente, não existe nenhum *software* de desenho tridimensional criado para modelar barragens que tenha em conta as necessidades inerentes à modelação de uma barragem de aterro que, para além do corpo da barragem, requer, inequivocamente, a modelação da sua fundação.

O *software* mais utilizado para a construção deste tipo de estruturas, referido na maior parte das publicações, é o Revit da Autodesk.

Uma das referências relativamente à implementação do BIM nas barragens de aterro no campo da avaliação de segurança estrutural é Heleno (2021). A autora modelou a geometria da barragem de Odelouca (Algarve) em Revit, desenvolvendo um código em programação visual em Dynamo (Autodesk). Este código permite a geração dos principais constituintes do corpo da barragem (núcleo, maciços de montante e jusante e filtro-chaminé) através da leitura de uma base de dados em Excel que contém a informação geométrica (pontos). Na modelação tridimensional, os elementos mais básicos começam com a introdução de pontos que, ligados, dão origem a polígonos e posteriormente a sólidos (no Revit são referidos como “massas”). Fernandes (2015) aplicou um método similar, mas a barragens de betão ou galerias.

Cortijo García et al. (2021) abordaram também a modelação de uma barragem de betão, mas tendo em consideração o seu faseamento construtivo. Os blocos de betão foram modelados fixando a sua largura e altura, numa dimensão equivalente à espessura da camada de betão a betonar. A consideração do faseamento construtivo na modelação das estruturas permite controlar de forma mais eficiente as atividades, as quantidades e os custos durante a execução da obra e também garantir um registo histórico que permita, no futuro, cruzar informação, caso seja necessário.

Este método pode ser aplicado às barragens de aterro considerando os principais constituintes do seu corpo (núcleo, maciços, filtros, drenos e proteção de talude) como blocos com a altura equivalente à espessura da camada a compactar. Embora não seja mencionado nas publicações científicas, é importante referir que, para barragens de aterro, é fundamental considerar, na modelação, as alterações de geometria ao longo do tempo, nomeadamente durante a fase de construção, com vista a obter um modelo mais rigoroso representativo de um gémeo digital.

Quadro 2 – Exemplos de propósitos BIM nas principais fases de vida de uma barragem de aterro (adaptado de Rosa et al. (2024) e Serra (2022)).

Propósito BIM	Fases		
	Projeto	Construção	Primeiro enchimento, Exploração
Modelação tridimensional da barragem/fundação	x	x (introdução de eventuais alterações ao modelo)	x (barragens existentes)
Deteção de incompatibilidades entre diferentes especialidades no modelo BIM	x	x	-
Federação do modelo BIM	x	-	-
Registo e visualização de sondagens/ resultados de ensaios no modelo BIM	x	x	x (para diagnóstico)
Planeamento do faseamento construtivo (visualização e atualização)	x	x	-
Cálculo de quantidades e orçamentos	x	x	-
Registo e visualização de resultados de monitorização no modelo BIM	-	x	x
Visualização de notificações relacionadas com o comportamento da barragem no modelo BIM	-	x	x
Registo e visualização de ocorrências no modelo BIM	-	x	x
Preparação de formulários de inspeção e relatórios	-	-	x
Análise de modelos preditivos e definição de critérios de alerta	x	x	x

Relativamente a barragens existentes, ferramentas alternativas para a digitalização e geração de modelos 3D são as tecnologias de deteção remota (LiDAR, fotogrametria, etc.), obtendo-se uma nuvem de pontos cuja malha pode ser convertida num sólido ou superfície.

Apresentam-se alguns exemplos, como Hendriatiningsih et al. (2021) que utilizaram o método TLS (*Terrestrial Laser Scanning*) para obter uma nuvem de pontos a fim de modelar uma barragem de betão. Concluíram que o TLS não recolhe pontos com a precisão necessária à adequada definição de pequenos objetos como bombas hidráulicas e tubagens, sendo necessário complementar o levantamento recorrendo ao HLS (*Handheld Laser Scanner*), conforme apresentado na Figura 4.

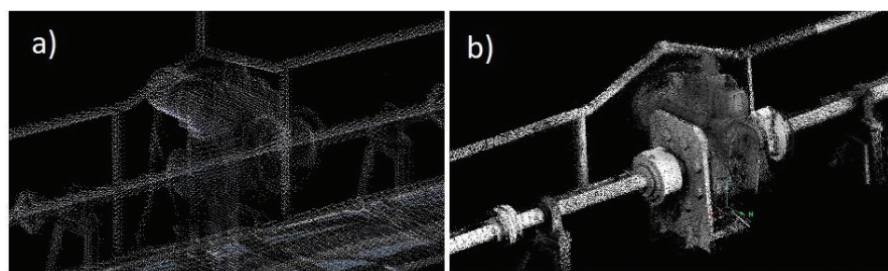


Fig. 4 – Levantamento realizado com: a) TLS; b) HLS (Hendriatiningsih et al. (2021)).

Em zonas remotas ou de acesso condicionado, o levantamento aéreo por laser (ALS) é também uma solução, tendo sido utilizado com sucesso por Smith (2012) para gerar o modelo digital de barragens de aterro.

Os levantamentos e os modelos tridimensionais de uma barragem, obtidos ao longo do tempo, podem também ser utilizados para detetar ocorrências e padrões de deformação, através da comparação entre os diferentes modelos produzidos em momentos distintos (Xiao et al., 2022).

A influência da presença de vegetação (densa ou não) na precisão das tecnologias de deteção remota foi abordada apenas de forma superficial pelo primeiro autor, que recorreu a uma solução manual nas zonas com definição insuficiente para a modelação da estrutura. A compreensão deste aspeto é essencial para a aplicação eficaz destas tecnologias no levantamento de barragens de aterro, onde a vegetação, frequentemente não controlada, pode crescer de forma extensa.

Relativamente à fundação, El Sibaii (2020) apresentou um caso real para o qual desenvolveu um programa em Dynamo, que lia os dados geológico-geotécnicos extraídos de sondagens e colocados num *template* previamente estruturado, e criava o modelo 3D dessas sondagens. Com base nas mesmas, conseguiu modelar camadas de fundação tridimensionais com a informação necessária à correta definição do material intrínseco. Esse modelo foi posteriormente exportado para IFC.

Software proprietário como o Rockworks (da Rockware) inclui uma ferramenta que gera automaticamente o modelo 3D e que o utilizador pode ajustar. Esta ferramenta lê uma folha de Excel preparada pelo próprio com base na informação dos logs das sondagens (Figura 5). No entanto, este *software* não permite a importação nem a exportação de ficheiros diretamente compatíveis com softwares BIM, como os formatos “.rvt” (do Revit) ou “.ifc”.

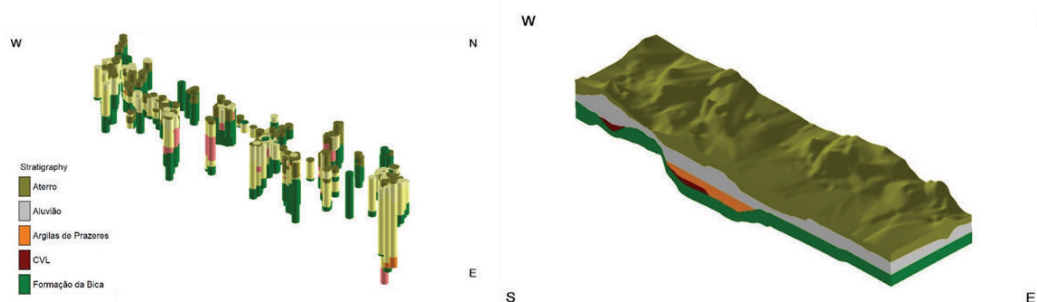


Fig. 5 – Modelo digital de terreno (MDT) em 3D feito com base na informação dos *logs* das sondagens utilizando o Rockworks.

Apesar de fora deste âmbito, importa referir que as tecnologias da Realidade Virtual (RV) e da Realidade Aumentada (RA) permitem uma visualização mais realista e imersiva do modelo 3D. Estas tecnologias servem de apoio durante a fase de construção e de monitorização de barragens novas e existentes.

Finalmente, a modelação deve seguir um conjunto de regras que têm como objetivo garantir uniformidade entre diferentes entidades para que haja a tão desejada interoperabilidade. Em Portugal, destaca-se o guia “Regras de Modelação de Objetos BIM” (CT197, 2021). Nesse documento são referidos documentos internacionais que se consideram úteis, como o *UK NBS BIM Object Standard* (NBS, 2023) no Reino Unido, ou a *OBOS Open BIM Object Standard*, na Austrália e Nova Zelândia (NATSPEC e MasterSpec (2018) e CT197 (2021)).

3.3.3 – Requisitos de informação e normalização em fluxos de trabalho BIM

Um dos principais objetivos do desenvolvimento ou utilização de um modelo BIM é integrar a informação necessária ao longo das várias fases do ciclo de vida de uma obra. O nível de complexidade, o nível de desenvolvimento e a grande quantidade de dados envolvidos implicam uma organização ou sistematização normalizada dos elementos/atividades (Serra, 2022). Este capítulo apresenta vários componentes do ecossistema BIM necessários para alcançar o objetivo referido. Estes elementos podem ou não estar interligados e, para clarificar a sua aplicação e relações, encontram-se resumidos na Figura 6.

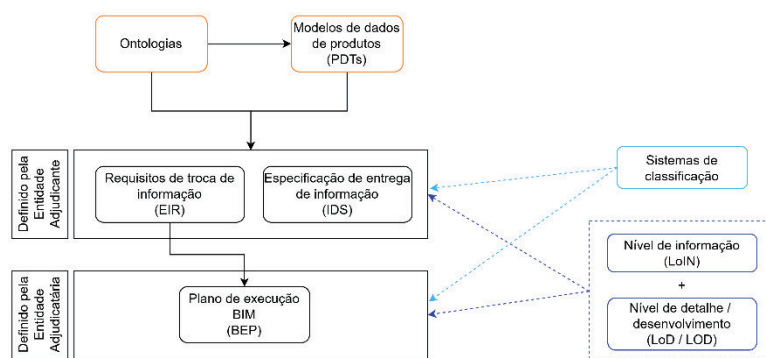


Fig. 6 – Alguns dos elementos do ecossistema BIM que contribuem para a organização e gestão da informação.

Uma vez que as vantagens das ontologias são amplamente reconhecidas pelo público em geral, e por não estarem diretamente relacionadas com o BIM, serão abordadas com maior detalhe no capítulo 3.4.2.

Os modelos de dados de produtos (*Product Data Template* – PDT) a integrar no modelo BIM contêm um conjunto de características consideradas relevantes para a descrição de objetos da construção, contribuindo para a uniformização e consistência da sua definição na indústria, num formato interoperável. Apesar das iniciativas existentes para desenvolver PDTs, nenhuma, contendo o formato aberto, cumpre os critérios da NP EN ISO 23386 (2020) e da ISO 23387 (em publicação) (Azenha e Sibaii, 2024).

Apresenta-se o trabalho desenvolvido por El Sibaii et al. (2022) sobre a criação de um BDT – *Borehole Data Template*, relativo a uma sondagem. Este modelo foi aplicado num caso de estudo e a informação dele resultante foi incorporada no modelo BIM, esquematizada na Figura 7. O mesmo autor é um dos responsáveis pelo desenvolvimento da plataforma portuguesa pdts.pt (Universidade do Minho, 2021), de acesso aberto.

Um documento que contribui para o aumento da eficiência na colaboração e execução de uma barragem de aterro, com base na metodologia BIM, é o EIR (*Exchange Information Requirements*) que contém, como o nome indica, os requisitos de troca de informação. Nele deve constar toda a informação uniformizada relativa a aspetos contratuais e comerciais, assim como os métodos de

produção e procedimentos a serem implementados pela Entidade Adjudicatária, como definido na NP EN ISO 19650-1 (2025). É importante realçar que a CEN/TR 17654 (2021) fornece recomendações sobre como implementar o EIR e o Plano de Execução BIM ao nível europeu, com base na EN ISO 19650-1 (2018) e na EN ISO 19650-2 (2018). Ao momento, a buildingSMART Portugal desenvolveu dois documentos exemplificativos de um EIR em português para a fase de projeto de uma obra privada (Granja et al., 2024b) e de uma obra pública (Granja et al., 2024a).

Dentro dos requisitos de informação, a norma NP EN ISO 19650-1 (2025) estabelece a necessidade de definir o *Level of Information Need* (LoIN) como parte integrante da gestão da informação em BIM.

Um dos objetivos da definição do LoIN é evitar a entrega de informação excessiva, assegurando que, no momento da entrega, apenas seja disponibilizada a informação necessária e relevante, adequada ao objetivo específico estabelecido. A norma NP EN ISO 7817-1 (2024) estabelece os conceitos e princípios para a definição do LoIN e das entregas da informação de forma consistente, no contexto da utilização do BIM. Define a extensão e a granularidade da informação, descrevendo as características necessárias que serão tanto ou mais detalhadas ao longo do ciclo de vida do ativo, como apresentado na Figura 8. Essa informação, que deve estar documentada, divide-se em informação geométrica e alfanumérica.

Nome do modelo	Sondagem		
Categoria do modelo	Obras Geotécnicas		
Aptidão para uso	Geotechnical engineering – BIM		
Nome do parâmetro	Valor	Unidades	Notas
Dados gerais			
NomeDoProjeto		Alfanumérico	Nome dado ao projecto relacionado com o sondagem.
ZonaSismica		Alfanumérico	A zona sísmica onde se situa o sondagem. Ex. Zona (1, 2A, 2B, 3, 4)
ProfundidadeTotalDaSonda		Número	A profundidade total do sondagem.
SistemaDeCoordenadas		Texto	O sistema de coordenadas utilizado para especificar a localização do sondagem (campo obrigatório).
Etc.		Etc.	Etc.
Distribuição das camadas da sondagem			
Dados da camada de solo			
Descrição da camada de solo			
-	-	-	-
Resultados dos Ensaios Laboratoriais			
-	-	-	-
Resultados dos Ensaios In-Situ			
-	-	-	-
Dados da camada de vazio			
-	-	-	-
Dados da camada de água			
-	-	-	-
Dados da camada de rocha			
Descrição da camada de rocha			
-	-	-	-
Resultados dos Ensaios Laboratoriais			
-	-	-	-
Resultados dos Ensaios In-Situ			
-	-	-	-

Fig. 7 – Representação esquemática do PDT de uma sondagem (adaptada de El Sibaii et al. (2022) e Universidade do Minho (2021)).

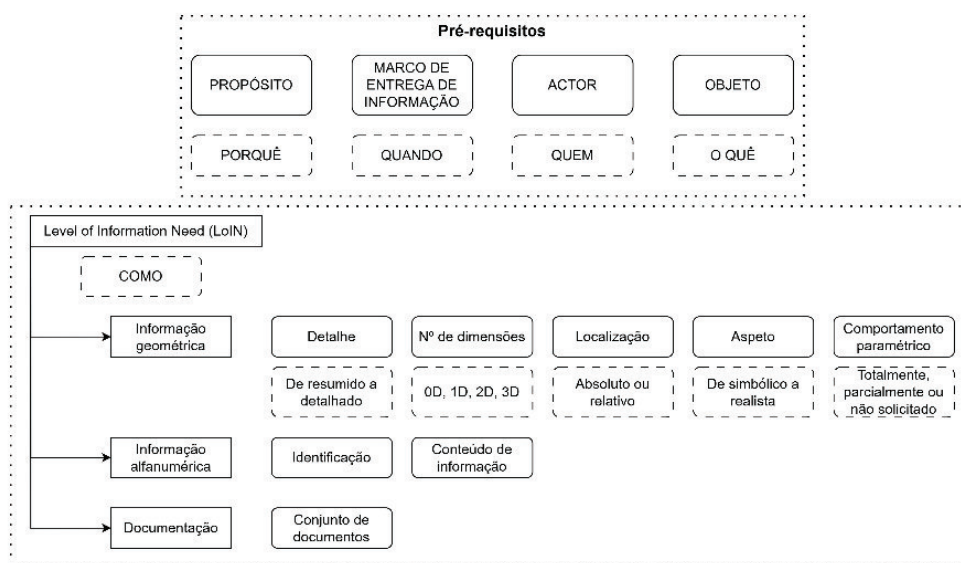


Fig. 8 – Diagrama das relações referentes ao LoIN (adaptado), segundo NP EN ISO 7817-1 (2024).

De realçar que os documentos exemplificativos de um EIR, elaborados por Granja et al. (2024a) e Granja et al. (2024b), incluem tabelas de LoIN já preenchidas, que servem igualmente como exemplo de utilização.

Embora não venha referido nas normas, é prática comum definir o grau de detalhe dos documentos provenientes da Entidade Adjudicante.

O LOD (*Level of Development*) corresponde à quantidade e ao tipo de informação gráfica e não-gráfica que será armazenada num modelo BIM, consoante a fase do processo BIM. É definido no documento “*Level of Development (LOD) Specification – Part I*” do conjunto de entidades pertencentes ao BIM Forum (2024).

Distinto do LOD, vem o LoD (*Level of Detail*) que especifica qual o grau de detalhe visual com que o elemento a implementar no modelo BIM deve ter, consoante a fase de desenvolvimento da obra.

A Figura 9 apresenta um exemplo dos diferentes níveis de desenvolvimento e detalhe aplicados a um elemento a utilizar no modelo BIM. O modelo deve incluir não só detalhes gráficos, mas atributos, propriedades, dados e informações técnicas necessárias e suficientes para ser usado com o propósito pretendido.

No que concerne à entrega da informação, com base na norma NP EN ISO 19650-2 (2025) que implementa os princípios relativos à entrega de informação ao longo das várias fases do ciclo de vida de um ativo, destaca-se o desenvolvimento da *Information Delivery Specification* (IDS). Este ficheiro, criado pela buildingSMART (2024b), contém um conjunto de especificações que os autores dos modelos BIM podem utilizar para validar se o mesmo cumpre todas as especificações requeridas de forma automática. Este vem no formato “.ids” em linguagem compreensível por humanos e interpretável por máquinas.

Da parte da Entidade Adjudicatária, é boa prática elaborar um Plano de Execução BIM (*BIM Execution Plan* – BEP). Para além da CEN/TR 17654 (2021), o *BIM Project Execution Planning Guide – version 2.2*, de Messner et al. (2019), é um recurso útil para o desenvolvimento de um BEP. Adicionalmente, a especificação técnica DNP TS 4585 (2020) disponibiliza um enquadramento para a elaboração do BEP em português, adaptado às fases pré-contratual e pós-contratual.



Fig. 9 – Exemplo de diferentes níveis de desenvolvimento e detalhe no modelo BIM (adaptado de Mcphee (2013) e de BIM Forum (2024)).

O ecossistema BIM integra um sistema de classificação hierárquica, com diferentes níveis de detalhe, associado a códigos alfanuméricos e com terminologia própria. A sua implementação facilita a comunicação e a colaboração em tarefas como medições, estimativas de custos, planeamento e gestão de conflitos em obra. Simultaneamente, apoia práticas da economia circular ao promover a consciencialização relativamente ao uso eficiente de materiais e à minimização de desperdícios. No contexto português, o sistema SECClasS (*Sustainability Enhanced Construction Classification System*) constitui uma tradução e adaptação do Uniclass 2015 (Lima et al., 2021) (Figura 10).

Código	Tabela	Descrição (PT)	iditem	Autor
6070	Produtos	Acionamentos de desvios ferroviários suplementares		10881 false
6071	Produtos	Desvios de ferrovia		10882 false
6072	Produtos	Interruptores de armadilha		10883 false
6073	Produtos	Desvios de ferrovia		10884 false
6074	Produtos	Produtos de estrutura de eixo		10885 false
6075	Produtos	Anéis de caixão de betão		10886 false
6076	Produtos	Lajes de cobertura de poço de betão		10887 false
6077	Produtos	Lajes de aterragem de poço de betão		10888 false
6078	Produtos	Unidades de eixo de betão pré-moldado		10889 false
6079	Produtos	Seções de madeira		10890 false
6080	Produtos	Cleft chestnut pales		10891 false
6081	Produtos	Tampo de madeira dura e trilhos de contra-esgrima		10892 false
6081	Produtos	Componentes de madeira para cerca e barreira		10893 false

Sum 177126553

Fig. 10 – Plataforma de pesquisa de termos SECClasS (2021).

3.3.4 – Planeamento, medição de quantidades e estimativa orçamental

Uma das vantagens mais evidentes da utilização do BIM é a sua aplicação ao planeamento, à medição de quantidades e, conseqüentemente, à elaboração de estimativas orçamentais. No domínio da geotecnia, a incerteza está sempre presente e a necessidade de se realizarem ajustes durante a execução da obra é quase inevitável, de forma a responder às condições efetivamente encontradas. Neste sentido, torna-se interessante desenvolver ferramentas que permitam otimizar processos e

mitigar erros em tarefas que são simultaneamente repetitivas e sujeitas a constantes alterações, como aquelas apresentadas.

Sentosa et al. (2023) apresentam um caso de estudo de uma barragem de aterro cujo modelo BIM foi utilizado para extrair quantidades e simular cenários da fase de construção, evidenciando possíveis dinâmicas do plano de trabalhos. A modelação da barragem teve em consideração estes propósitos BIM, sendo composta por objetos que podiam ser constituídos por um único elemento ou um conjunto de elementos agrupados, e que continham informação geométrica, de projeto, de localização e quantidades, facilitando a sua exportação para simulação e análise.

Este estudo demonstrou que uma abordagem baseada em BIM, juntamente com a construção do modelo que inclua toda a sequência construtiva e o plano de trabalhos pode conduzir a uma melhoria na coordenação e concretização das atividades em obra, ao detetar erros de planeamento, fornecer uma representação fidedigna dos dados que sustente a exploração de alternativas e a tomada de decisão, enquanto serve de base para o acompanhamento das fases de construção e assegura entregas atempadas.

O aparecimento do BIM também teve impacto no trabalho desenvolvido pelos medidores orçamentistas. Num estudo de Nigam et al. (2016), concluiu-se que a metodologia BIM permite a integração da estimativa de custos ao longo de todo o ciclo de vida do projeto, possibilitando atualizações em tempo real, garantindo a consistência nas medições, reduzindo erros como duplicação ou omissão de quantidades e reduzindo o tempo despendido na sua determinação. Dado que, nesta metodologia, as medições podem ser geradas automaticamente, os resultados, nomeadamente as quantidades e, conseqüentemente, as estimativas de custos, tornam-se mais precisos quanto maior for o nível de detalhe do modelo, o qual é ajustado consoante a fase do projeto ou da obra.

3.4 – Gestão da informação e processamento de dados

3.4.1 – Recolha, organização e armazenamento de dados

Durante o ciclo de vida de uma barragem de aterro são produzidos dados que constituem um registo histórico fundamental para compreender, analisar e prever o comportamento de uma barragem.

Tradicionalmente, a recolha e o registo de dados realizam-se através de redes locais (via *wi-fi*, *bluetooth* ou cabo) ou da transferência manual de dados guardados em *dataloggers* instalados nos postos de observação e controlo. Apesar das vantagens relacionadas com a simplicidade de instalação e o baixo custo inicial, estes métodos estão mais sujeitos a erro humano e dificultam a integração e análise de dados em grande escala.

Paralelamente, esta informação apresenta-se geralmente em formatos como papel, em PDF, em folhas de cálculo, em bases de dados locais ou em formatos específicos provenientes de sensores, comprometendo a sua partilha, armazenamento e processamento, uma vez que parte desses dados pode ser perdida ou ficar indisponível devido a incompatibilidades informáticas.

Atualmente, o uso de sensores IoT e outras tecnologias de monitorização remota (como o varrimento a laser, de acordo com Scaioni et al. (2018) ou Ramos-Alcázar et al. (2017)) permite mitigar alguns dos desafios existentes, simplificando a recolha de dados ao possibilitar a transmissão de informações e comandos em tempo real, de forma remota e com reduzida necessidade de intervenção humana. Estas condições traduzem-se numa maior frequência de leituras, ampliando o volume de dados já considerável, implicando o desenvolvimento de soluções e ferramentas capazes de organizar e armazenar tão elevado volume de dados, e com proveniências e períodos temporais tão distintos: medições contínuas, resultados da prospeção geológico-geotécnica, dos ensaios de caracterização e de compactação dos materiais, registos de inspeções visuais e informação técnico-operacional gerada durante as fases de projeto e construção.

Os custos elevados e a ausência de condições adequadas nas infraestruturas existentes, nomeadamente no que respeita à segurança necessária para proteger os equipamentos contra danos ou roubo, constituem entraves à disseminação destas tecnologias nas barragens.

Importa ainda referir que o Regulamento de Segurança de Barragens impõe a realização de visitas de inspeção visuais periódicas à barragem (Comissão dos Regulamentos de Barragens, 2019), por isso, apesar dos avanços tecnológicos, a introdução manual de observações registadas durante as visitas será sempre um requisito, quer seja pelo preenchimento de formulários em papel ou utilizando aplicações digitais, como o ArcGIS Survey123.

Com base no que foi referido, nas barragens de aterro, o tipo de dados recolhidos pode ser agrupado em dois grupos: dados métricos e dados semânticos.

Os dados métricos correspondem a valores brutos, números ou medições, como por exemplo o nível de água da albufeira (em metros). Os dados semânticos são “valores” com significado dentro de um determinado contexto, e podem ser extraídos, por exemplo, do modelo BIM. Estes dados têm propriedades ou atributos associados, como tipo de material do núcleo da barragem ou a localização de um dispositivo de observação, ou ainda de observações registadas durante as inspeções visuais, como a identificação de zonas de erosão, ressurgências, etc.

O armazenamento de dados métricos “estruturados” ou “estáticos”, como é o caso de leituras de monitorização de sensores, é frequentemente feito em bases de dados relacionais, pois este tipo de base de dados é composto por tabelas inter-relacionadas com esquemas fixos e pré-definidos, que permite facilmente a adição/atualização de novos dados e suporta um grande volume de dados (crescimento vertical) (Gosain, 2021).

Contudo, de acordo com Dadjoo e Kheirkhah (2015), não é possível extrair conhecimento que não esteja explícito nas bases de dados relacionais. Por outro lado, esse tipo de inferência é viável quando se utilizam bases de grafos, compostas por nós e arestas conectados entre si, que representam os dados semânticos e as suas relações. Este tipo de bases de dados permite o raciocínio lógico e a geração e extração de conhecimento com base em estruturas de informação e regras definidas. Com uma representação visual intuitiva, estas bases de conhecimento (semelhantes às redes neuronais) apresentam um desenho de esquema escalável, permitindo adicionar novas relações sem afetar a base de dados existente. A vantagem da utilização deste tipo de base de dados no contexto das barragens de aterro irá ser discutida no capítulo seguinte (capítulo 3.4.2).

Embora não tenham sido encontradas publicações que refiram o uso complementar de bases de dados relacionais com bases de dados de grafos no contexto das barragens de aterro, Baudrit et al. (2022) desenvolveram uma abordagem para converter os dados de bases de dados relacionais em bases de grafos, reconhecendo a vantagem de não só armazenar grandes volumes de dados de forma estruturada, como também explorar relações complexas entre esses dados. Esta organização integrada cria condições para a aplicação eficiente de técnicas de análise avançada, como o *machine learning* (Alocén et al. (2022), Mata et al. (2021) e Mwanza et al. (2024)) ou a mineração de dados (Heleno (2021) e Pan e Zhang (2021)). Contudo, há que ter em conta que a fiabilidade e a precisão dos modelos obtidos dependem da disponibilidade de grandes volumes de dados, de qualidade adequada, o que pode configurar uma limitação significativa na aplicação destas tecnologias a barragens, dado que a recolha de dados neste contexto continua a ser difícil e onerosa (Hariri-Ardebili et al., 2023).

3.4.2 – Ontologias e interoperabilidade semântica

A criação de ontologias constitui um passo fundamental para a representação do conhecimento, permitindo organizar e gerir de forma eficiente esse conhecimento, através da definição de entidades ou conceitos e das relações entre eles, dentro de um domínio específico (Arp et al., 2015). Ou seja, trata-se de uma base de conhecimento estruturada de forma hierárquica, recorrendo inclusive a taxonomias, que permite realizar inferências e apoiar o raciocínio lógico (Hastings, 2021).

A sua utilização diminui a ambiguidade na definição de conceitos (Debellis, 2021) e reforça a interoperabilidade semântica, tornando a informação estruturada legível por máquinas.

O World Wide Web Consortium (W3C) é uma organização internacional que se dedica a desenvolver normas para a *web* e é a entidade de referência no que concerne ao desenvolvimento da *web* semântica. O conceito de *web* semântica foi criado por Berners-Lee et al. (2001) e consiste numa rede de dados, estruturada de forma a permitir a partilha desses dados através de diferentes aplicações, empresas ou sistemas, podendo ser processados de forma automática por ferramentas ou de forma manual.

As ontologias pertencem ao que se designa como *technological stack* da *web* semântica do W3C (Figura 11). O *technological stack* é apresentado como uma arquitetura em camadas que descreve como a informação na *web* pode ser representada, interligada e processada de uma forma “inteligente”, ou seja, com capacidade de raciocínio automático sobre dados interligados, apoiando assim o desenvolvimento da *web* semântica (W3C (2025) e W3C (2001)).

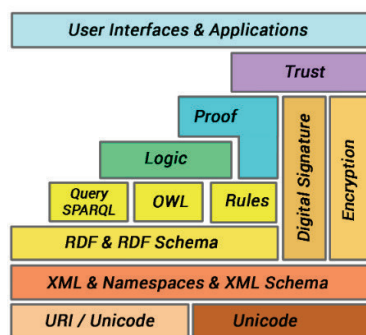


Fig. 11 – *Technology stack* da *web* semântica (Gezer e Bergweiler, 2016).

A linguagem mais comum para a criação de ontologias é a *Web Ontology Language* (OWL) criada pelo W3C e permite que estas possam ser compreendidas por programas informáticos, publicadas na *World Wide Web* e referir ou ser referidas por outras ontologias OWL. Esta linguagem é baseada no *Resource Description Framework* (RDF), que assume a forma dos chamados *triples* – sujeito, predicado e objeto, que imitam a linguagem humana. O esquema RDF (RDFS) atribui significado semântico aos dados em RDF, fornecendo uma estrutura hierárquica e disponibilizando vocabulário básico para a definição de classes (entidades), propriedades (objetos) e relações. O conhecimento pode ser inferido com base em regras lógicas previamente definidas pelos utilizadores, através da *Semantic Web Rule Language* (SWRL) (raciocínio). Por fim, os *triples* podem ser consultados em SPARQL (*Simple Protocol and RDF Query Language*). Estas consultas são concebidas para responder a perguntas de competência que validam a exatidão da ontologia.

Conforme referido no capítulo 3.4.1, um dos tipos de dados utilizados nas barragens de aterro são os dados semânticos. As ontologias permitem estruturar esses dados e transformá-los em conhecimento interrogável e validável por máquinas através de regras definidas *a priori*, potenciando a interoperabilidade entre sistemas pela definição de uma linguagem universal referente a um domínio específico.

Porém, a análise do estado da arte sobre este tema revela que não foram desenvolvidas ontologias dedicadas a barragens de aterro, sendo necessário adaptar ontologias existentes para este domínio.

Essa é uma das grandes vantagens do uso de ontologias: a possibilidade de reutilização entre diferentes domínios, formando um sistema escalável, alinhando-se com a visão de Berners-Lee et al. (2001). Ontologias existentes, como a *Semantic Sensor Network Ontology* e a *Sensor, Observation, Sample and Actuator Ontology* (SSN/SOSA) (Haller et al., 2020), a *Building Topology*

Ontology (BOT) (Rasmussen et al., 2021) e a *Smart Application REFerence Ontology* (SAREF) (Daniele et al., 2020) e a sua extensão para a água (SAREF4WATR) (Garcia-Castro, 2024), têm sido aplicadas em contextos de infraestruturas inteligentes (Antunes et al. (2024), Antunes (2024), Zhou et al. (2023), Schuler et al. (2025) e García-Castro et al. (2023)).

Destacam-se os autores Zhou et al. (2023) que desenvolveram uma ontologia para sistemas de monitorização de barragens de betão (OntoDSMS) que interliga informação BIM, sensores e bases de dados, com base nas ontologias SOSA e SSN. As Figuras 12 e 13 apresentam as classes e propriedades estabelecidas para a OntoDSMS.

Não obstante, continua a existir uma carência de ontologias que abranjam as zonas estruturais das barragens de aterro, os diferentes tipos de barragens, parâmetros geológico-geotécnicos, materiais e outros domínios relevantes, essenciais para a gestão e avaliação da segurança destas estruturas.

Para aumentar a interoperabilidade entre sistemas e plataformas, após a criação das ontologias, torna-se necessário mapear os respetivos termos com o esquema IFC. Por exemplo, um “Sensor” corresponderia ao “*IfcSensor*” no esquema IFC. Contudo, o esquema IFC 4.3, atualmente em vigor, não contempla muitos dos conceitos específicos das barragens de aterro. Assim, enquanto não forem introduzidos esses conceitos, será necessário recorrer a termos de carácter provisório e genérico, como “*IfcBuildingElementProxy*” com um “*Predefined Type – Userdefined*” (Serra et al., 2024).

Os autores Wu et al. (2021) apresentam algumas propostas de entidades IFC no domínio da geotecnia.

No domínio das infraestruturas rodoviárias, Ait-Lamallam et al. (2021a), Ait-Lamallam et al. (2021b) apresentam casos de estudo de sucesso de implementação da metodologia BIM, recorrendo a uma abordagem suportada na ontologia IFCInfra4OM por si desenvolvida, aplicada às fases de operação e manutenção.

Perspetiva Estrutural	
Classe	Descrição
LeftBankDam	A parte da barragem que se encontra do lado esquerdo quando olhamos no sentido do fluxo do rio.
RightBankDam	A parte da barragem que se encontra do lado direito quando olhamos no sentido do fluxo do rio.
DrainGate	A parte da barragem utilizada para drenar água.
CrossSection	Secções de uma barragem.
Element	A metaunidade de um componente, p.e. pilares, paredes, secções da barragem.
Material	O tipo de material de um componente, p.e. diferentes classes do betão armado.
Perspetiva da monitorização da segurança	
EnvironmentQuantity	Monitorização do nível de água a montante, temperatura, etc.
Transformation	Monitorização do magnitude, distribuição e evolução da deformação da barragem.
Seepage	Monitorização da percolação no corpo e na fundação da barragem.
StressStrainAndTemperature	Monitorização das tensões internas e alterações de temperatura.
SensorType	Tipo de sensor.
System	Uma unidade abstrata para peças da infraestrutura.
Platform	Uma entidade que alberga outras entidades, nomeadamente sensores.
Sensor	Uma subclasse de um <i>System</i> , mas também uma superclasse de um conjunto específico de dispositivos de monitorização.
Observation	Um conjunto de observações.
ObservableProperty	Um conjunto de propriedades observáveis. Incluindo deslocamentos relativos, absolutos e cumulativos, nível da água, abertura de fendas, caudais, deformação, temperatura, etc.
Abnormal	Um conjunto de sensores cujo estado operacional é anómalo.

Fig. 12 – Classes da ontologia OntoDSMS de acordo com uma perspetiva estrutural e uma perspetiva da monitorização da segurança, adaptado de Zhou et al. (2023).

Tipo	Propriedade	Domínio	Contradomínio/Intervalo	
ObjectProperty	hasSection	LeftBankDam RightBankDam DrainGate	CrossSection	
	isSectionOf	CrossSection	LeftBankDam RightBankDam DrainGate	
	hasElement	LeftBankDam RightBankDam DrainGate		
	isElementOf	Element	LeftBankDam RightBankDam DrainGate	
	hosts	LeftBankDam RightBankDam DrainGate		
	isHostedBy	Sensor	LeftBankDam RightBankDam DrainGate	
	observes	Sensor	ObservableProperty	
	isObservedBy	Observation	Sensor	
	madeObservation	Sensor	Observation	
	madeBySensor	Observation	Sensor	
	hasType	Sensor	SensorType	
	isTypeOf	SensorType	Sensor	
	observedProperty	Observation	ObservableProperty	
	hasMaterial	Element	Material	
	DatatypeProperty	hasResult	Observation	xsd:float
		resultTime	Observation	xsd:dateTime
		hasName	Sensor Element Material	xsd:string
hasManufactures		Sensor Element Material	xsd:string	
hasElevation		Sensor	xsd:float	

Fig. 13 – Propriedades, domínio e contradomínio da ontologia OntoDSMS (Zhou et al., 2023).

3.4.3 – Integração com plataformas digitais e sistemas de monitorização

As aplicações de modelação BIM mais recentes apenas suportam informação alfanumérica nos campos de propriedades dos objetos. Devido ao elevado volume de dados gerados ao longo do ciclo de vida de uma barragem de aterro, incluí-los completamente no modelo BIM poderia originar um ficheiro excessivamente pesado e complexo, comprometendo o desempenho do *software*. Assim, a adequada implementação da metodologia BIM num projeto desta natureza requer a utilização de uma plataforma ou interface na qual seja possível gerir e visualizar a informação relevante que não pode ser diretamente representada no modelo BIM. Esta plataforma funciona como uma ferramenta de observação integrada dos elementos que compõem a estrutura, permitindo identificar padrões e tendências nos conjuntos de dados e evidenciar o estado e o comportamento da barragem.

A Bentley (2023b) disponibiliza uma plataforma para gerir informação relativa à monitorização (iTwin) que inclui uma interface gráfica que facilita a interpretação dos resultados. Esta plataforma permite ainda identificar ocorrências ou situações e associá-las à informação recolhida por sensores ou através de inspeções visuais (Figura 14). Contudo, os formatos de ficheiro da Bentley não são considerados abertos, tornando a interoperabilidade com outros *softwares* muito mais desafiante.

Segundo a linha de orientação da buildingSMART (2024a), é recomendado utilizar plataformas ou ferramentas que privilegiem a exportação e importação em formato IFC. Existem *softwares* gratuitos para visualizar modelos BIM e os seus campos e propriedades nesse formato: Solibri, BIM Vision, usBIM (ACCA) e até o Notepad.



Fig. 14 – Interface do software iTwin da Bentley Bentley (2023a).

Para a análise e visualização de dados de monitorização de forma dinâmica e interativa, é possível recorrer a ferramentas de *business intelligence*, como o PowerBI, que permite criar *dashboards*, gráficos e relatórios a partir de diferentes fontes de dados, como utilizado por Heleno (2021). Com recurso à aplicação IFC Viewer, desenvolvida por GmbH (2025), é possível também integrar o modelo BIM nessas análises.

Alguns autores referem que o processamento de dados e a criação de plataformas para gestão e manipulação de dados de monitorização foram possíveis graças à programação, dando prioridade ao uso de formatos abertos (Ma e Chi, 2016, Zhu et al., 2021, Han et al., 2022).

Um exemplo de um sistema de gestão de dados de barragens é o *Online Dam Information System* (ODIS), desenvolvido pelas empresas Ofiteco e Hochtief-Vicon, que permite a visualização do modelo 3D e da informação recolhida por sensores e inspeções visuais. Adicionalmente, possibilita a análise de dados através de séries temporais, a definição de modelos estatísticos e a criação de sistemas de alerta/emergência em conformidade com o definido nos planos de observação e de emergência (Hochtief-Vicon e Ofiteco, 2013; Hoppe e Fleitz, 2021).

Na Coreia do Sul, Jeon et al. (2009) desenvolveram um sistema para gestão da segurança em barragens designado por KDSMS, que integra dados sobre a barragem e a albufeira, informação hidrológica, informação resultante de inspeções visuais e de monitorização, incluindo monitorização sísmica. Este sistema encontra-se implementado para 30 barragens geridas pela Kwater (*Korea Water Resource Corporation*), empresa pública sul-coreana responsável pela gestão de recursos hídricos.

Em Portugal, destaca-se o GESTBARRAGENS, desenvolvido no LNEC. Embora não esteja diretamente relacionado com o BIM, trata-se de um sistema de gestão de informação integrada para o controlo e segurança de barragens de betão. Este sistema permite a consulta de bases de dados, que vão sendo atualizadas no decorrer das visitas de inspeção visual, bem como a sincronização e atualização automática da informação proveniente dos sistemas de monitorização de algumas das suas barragens (Silva, et al. (2005) e Silva et al. (2006)).

3.5 – Gémeos digitais nas barragens de aterro

3.5.1 – Considerações iniciais

Sendo as barragens de aterro um dos tipos de barragens mais construídos em todo o mundo, segundo o ICOLD (2024), o número de falhas ou acidentes é também um dos mais elevados. Estas situações estão frequentemente associadas a uma inadequada ou insuficiente caracterização geológico-geotécnica da fundação e dos materiais de aterro, a deficiências de projeto e construção,

a falta de manutenção, entre outros fatores; ou seja, estes incidentes são, em grande parte, atribuídos ao erro humano (Laginha (1982) citado em Pimenta (2008)).

Os processos e atividades inerentes ao projeto, construção, primeiro enchimento e operação de uma barragem de aterro são, por natureza, complexos, envolvendo múltiplas entidades que necessitam de comunicar e colaborar entre si. Acresce ainda que, ao longo da vida da barragem de aterro, é gerado um volume significativo de dados que devem ser eficientemente geridos. Incluem-se resultados de sondagens e ensaios, documentação de projeto, alterações introduzidas durante a fase de construção, bem como dados de monitorização e registos das operações de manutenção. Toda esta informação deve ser estruturada e organizada de forma a garantir que, caso seja necessária uma análise, o engenheiro tenha pleno acesso a ela, permitindo-lhe avaliar de forma rigorosa a situação e tomar decisões fundamentadas. Em qualquer fase, sem uma gestão cuidada e correta de toda a informação, entregáveis e tarefas programadas, o sucesso do projeto ou da obra poderá ficar comprometido, conduzindo a potenciais atrasos, derrapagens de custos, prolongamento dos prazos e a dispositivos ou equipamentos inoperacionais ou danificados.

Um exemplo prático da utilização de um gémeo digital durante a fase de construção é o trabalho apresentado por Ma e Chi (2016), no qual foram descritas várias tecnologias orientadas para a segurança na construção de barragens de aterro. A monitorização, em tempo real, da qualidade da compactação do aterro do núcleo, conforme esquematizado na Figura 15, permitiu intervir na obra num curto espaço de tempo, corrigindo e/ou adaptando os parâmetros de compactação ou removendo camadas deficientemente compactadas, reduzindo os períodos de interrupção e aumentando a qualidade da construção.

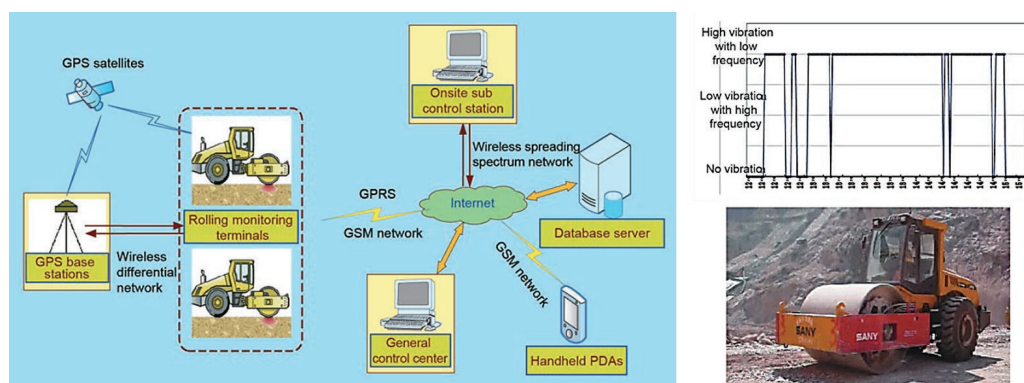


Fig. 15 – Esquema de monitorização, em tempo real, da compactação do núcleo da barragem de Nuozhadu, adaptado de Ma e Chi (2016).

Assim, a criação de gémeos digitais de barragens de aterro, aliada à metodologia BIM, apresenta-se como uma solução que não só possibilita a realização de todas estas atividades de uma forma holística, como também potencia a gestão de informação, a comunicação entre entidades e a otimização contínua dos processos ao longo de todo o ciclo de vida da obra.

Embora existam muitos exemplos de sucesso da aplicação do BIM e dos gémeos digitais em edifícios (Nguyen e Adhikari, 2023), as publicações relativas a barragens são ainda escassas, sendo mais frequentes no caso das barragens de betão (Liu et al., 2021; Marques, 2015; Park e You, 2023; Serra, 2022; Wangchuk et al., 2024; Liu e Luo, 2023; Fernandes, 2015) e muito limitadas no que respeita às barragens de aterro (Heleno, 2021; Seyed-Kolbadi et al., 2020; Mwanza et al., 2024).

É importante ressaltar que, no caso das barragens, a configuração de um gémeo digital não vem necessariamente associada a uma resposta automática na entidade física em tempo real, mas, por exemplo, através de um sistema de notificações, gerar uma resposta ou ação nessa entidade. A sua automatização não poderá ser total, uma vez que são estruturas bastante complexas, em que a

possibilidade de erros e as consequências associadas tornam imperativo que exista uma intervenção humana ao longo do processo e principalmente na decisão final – um conceito também conhecido como *human-in-the-loop* (Meng, 2023).

3.5.2 – Previsão e simulação de comportamentos

A previsão do comportamento de uma barragem de aterro, designadamente no que se refere às tensões e às deformações e à percolação recorre, habitualmente, a *softwares* proprietários como o Plaxis da Bentley, ou o Sigma/W, o Seep/W e o Slope/W da Seequent. Essa análise é tradicionalmente feita em modelos bidimensionais, o que levanta um desafio na forma como se deverão modelar tridimensionalmente as barragens de aterro, incluindo não só a superestrutura, mas também os terrenos de fundação.

Geralmente, estas análises recorrem ao método dos elementos finitos (MEF), que desempenha um papel muito importante na verificação da integridade estrutural da barragem. Na fase de projeto, o MEF permite definir a solução e determinar os critérios de alerta/emergência. Nas fases de construção, primeiro-enchimento e operação, é geralmente necessário atualizar esses modelos devido a alterações no projeto, sendo cruciais para as tomadas de decisão.

No entanto, os habituais *softwares* geotécnicos para análise numérica não atingiram ainda a interoperabilidade necessária com os *softwares* de modelação e visualização BIM. A integração BIM-para-MEF é já uma funcionalidade nativa para *softwares* de análise estrutural de edifícios, como o Robot e o Tekla, importando geometria e dados semânticos, mas tal não se verifica para as barragens de aterro, cuja modelação é significativamente mais complexa.

Satyanaga et al. (2023) resumem alguns dos métodos utilizados por diversos autores para ultrapassar este desafio.

Utilizando *software* proprietário, Fabozzi et al. (2021) apresentaram um caso de estudo de dois túneis de metro em Nápoles, onde é possível visualizar os dados geológico-geotécnicos, a estrutura do túnel e o processo de escavação, no modelo digital 3D. Para o efeito, recorreram a um pacote da Bentley de 2021 que continha o seguinte *software*: OpenRail Designer 2021 (versão 10.10.21.04), o hINT Professional 2021, o SynchroPro 2021 e o Plaxis 3D. Concluíram que, embora a importação de informação geométrica pudesse ser feita de forma automática utilizando ficheiros .dwg, .ifc ou nuvens de pontos, existirá sempre a necessidade de efetuar operações de forma manual para a definição completa do modelo numérico.

Giangiulio et al. (2023) desenvolveram uma metodologia alternativa recorrendo à criação de interfaces de programação de aplicações (APIs) para converter o modelo BIM de uma barragem de aterro e a fundação no seu correspondente modelo numérico, exportando os resultados de volta para o modelo BIM (Figura 16). Esta abordagem, que constitui uma evolução do método de Tschuchnigg e Lederhilger (2020), recorre a uma interface Python para gerir o fluxo bidirecional de dados entre o modelo BIM, através do *software* ProVI (uma aplicação utilizada para o dimensionamento de infraestruturas rodoviárias em 3D) e o modelo numérico, através do Plaxis 2D da Bentley. Esta interface permite recolher dados de fontes externas (como o faseamento construtivo, relatórios de sondagem e de ensaios laboratoriais, etc.) integrando-os no modelo numérico, permitindo a análise de tensões e de deformações da estrutura de uma forma mais automatizada. O seu algoritmo permite também otimizar a qualidade da malha de elementos finitos refinando automaticamente as áreas com maior gradiente tensão-deformação. Recorrendo a uma abordagem discreta no tempo, obtiveram-se os assentamentos para vários perfis transversais da barragem num determinado intervalo de tempo. O conjunto de resultados obtidos para cada ponto deu origem a uma nuvem de pontos, que constitui a representação tridimensional dos assentamentos da barragem ao longo do tempo.

Esta abordagem foi utilizada de forma semelhante por Alsahly et al. (2020), que aplicaram um conceito desenvolvido por Dadvand et al. (2010) na Universidade de Ruhr, em Bochum, designado por EKate (Enhanced Kratos for Advanced Tunnelling Engineering), para desenvolver um TIM-*Tunnel Information Model*, desenvolvido especificamente para projetos de escavação de túneis,

permitindo extrair automaticamente informação relevante como a geologia, alinhamentos, recobrimentos, materiais e parâmetros de processo, para utilização em tecnologias de análise numérica baseadas no MEF. A informação extraída é armazenada em ficheiros de formato .txt, que são lidos por um algoritmo desenvolvido em Python, que executa a análise numérica. Embora não especifique em que formato os resultados obtidos são armazenados, os autores referem que os mesmos são incorporados automaticamente no TIM, ao qual o acesso é contínuo e permanente.

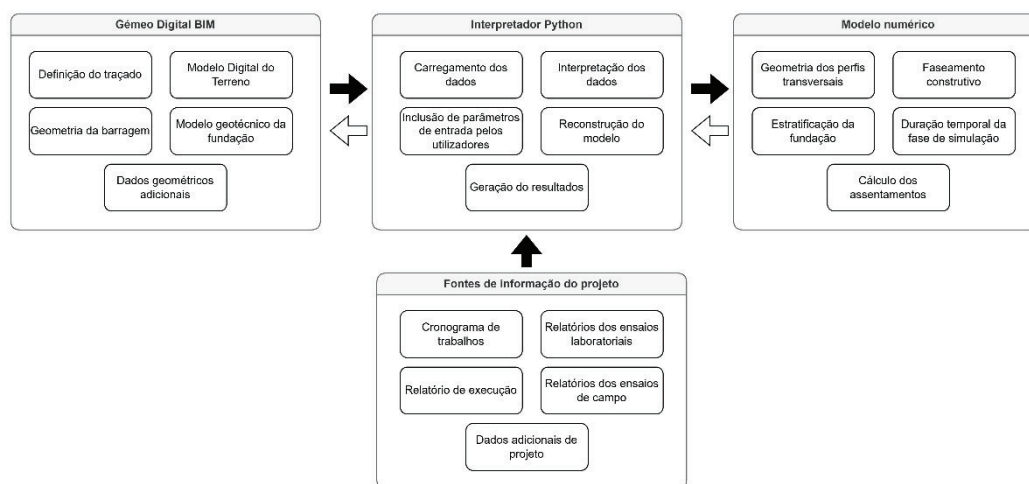


Fig. 16 – Metodologia de processamento de dados, adaptado de Giangiulio et al. (2023).

4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

As vantagens e desvantagens associadas à integração da metodologia BIM com gémeos digitais têm sido amplamente discutidas ao longo dos últimos anos. Os benefícios da sua adoção são evidentes e o futuro da engenharia civil passará, necessariamente, pelo seu amadurecimento. No entanto, permanece um elevado potencial de desenvolvimento relativamente à associação do BIM com novas tecnologias de digitalização, integração com redes de dispositivos e sensores, bem como soluções de *software* e outras ferramentas com ligação em rede destinadas à recolha e partilha de dados entre projetos e bases de dados. Simultaneamente, observa-se uma crescente relevância do conceito OpenBIM e da interoperabilidade entre diferentes sistemas, que contribuem para reduzir riscos tecnológicos e expandir domínios de aplicação do BIM a infraestruturas como estradas, ferrovias, pontes e, mais recentemente, túneis. No contexto das barragens, a implementação do BIM encontra-se ainda numa fase inicial, com apresentação de casos de estudo sobretudo em barragens de betão e muito poucos em barragens de aterro.

Embora muitas vezes sejam vistos como modelos tridimensionais, os modelos BIM são na realidade modelos de informação muito mais abrangentes, que integram dados geométricos, técnicos, temporais, económicos e operacionais. Esta metodologia oferece, assim, um grande potencial para melhorar e otimizar os fluxos de trabalho em todo o ciclo de vida de uma barragem de aterro integrando várias especialidades num modelo unificado, antecipando potenciais conflitos e mitigando erros e incompatibilidades durante a fase de construção. As tendências futuras incluem o uso de modelos tridimensionais para uma melhor compreensão de geometrias complexas, simulações 4D para o planeamento do faseamento construtivo otimizando recursos, e a geração de mapas de quantidades mais precisos contribuindo para se obter estimativas orçamentais mais rigorosas (5D). Aliado a isto, o desenvolvimento de plataformas para a visualização de dados de

monitorização em tempo real, em conjunto com a integração de gémeos digitais BIM, contribuem para uma gestão mais eficiente da informação em todo o ciclo de vida da barragem, com especial relevância nas fases de exploração e manutenção, constituindo ferramentas essenciais para a realização das avaliações estruturais.

O aparecimento de *triplets* digitais (trigémeos digitais) contribui adicionalmente para a realização de modelação preditiva avançada, ao incorporar *machine learning* e *business intelligence*, permitindo tomadas de decisão mais proactivas ao longo de todo o ciclo de vida do ativo (Singh et al., 2021).

No entanto, a aplicação generalizada do BIM e dos gémeos digitais em barragens de aterro é ainda bastante incipiente, com um número reduzido de publicações e casos de estudo de sucesso em revistas indexadas e mesmo em artigos de conferência. Entre os principais desafios incluem-se a falta de maturidade e de investimento em formação e investigação, a falta de normalização e documentos com exemplos de boas práticas, e outras lacunas como, a existência de uma linguagem universal específica para barragem de aterro e uma biblioteca de dados contendo a definição inequívoca de conceitos relacionados com barragens de aterro e que possa ser referenciada em especificações IDS e modelos IFC. Estes termos devem constar de modelos de dados de produtos (PDTs) relacionados com barragens de aterro.

A falta de interoperabilidade entre o modelo BIM em .ifc e as ferramentas geotécnicas de análise numérica (como o Plaxis ou as ferramentas da Seequent) constitui um entrave à disseminação da metodologia BIM para os gémeos digitais, que tem como um dos grandes objetivos contribuir para a gestão e análise da segurança.

Ainda existe uma escassez de plataformas *open-source* que sejam capazes de hospedar modelos BIM e permitam o armazenamento e consultas de bases de dados, com a possibilidade de notificações em tempo real sempre que um critério de alerta seja atingido.

Apesar da metodologia BIM e dos gémeos digitais terem um impacto positivo no projeto e construção de novas barragens, o parque de barragens existentes também é digno de atualização. Neste sentido, é crucial desenvolver ferramentas que permitam importar e digitalizar dados antigos, muitas vezes disponíveis apenas em papel ou em ficheiros Excel ou PDF, como era predominante no passado. Para tal, pode recorrer-se a tecnologias de OCR (*Optical Character Recognition*), que convertem automaticamente texto impresso ou digitalizado em informação editável e estruturada. Porém, estas ferramentas ainda carecem de grande desenvolvimento, não só para garantir uma conversão realmente precisa, mas também porque cada documento apresenta características e formatos distintos, o que dificulta a existência de uma solução única capaz de lidar eficazmente com todos os casos.

5 – AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) no âmbito da Unidade de I&D Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Estruturas de Engenharia (ISISE), com a referência UID/04029/Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Estruturas de Engenharia (ISISE), e no âmbito do Laboratório Associado Produção Avançada e Sistemas Inteligentes ARISE com a referência LA/P/0112/2020.

Este trabalho é financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia, ao abrigo do contrato da bolsa [2024.05521.BDANA] atribuída ao primeiro autor.

Este trabalho beneficiou igualmente da colaboração do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), cujo conhecimento técnico e apoio institucional foram valiosos para o avanço desta investigação.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aish, R. (1986). *Building modelling the key to integrated construction CAD*. 5th International Symposium on the Use of Computers For Environmental Engineering related to Buildings, pp. 55–67, Bath.
- Ait-Lamallam, S.; Sebari, I.; Yaagoubi, R.; Doukari, O. (2021a). *IFCInfra4OM: An Ontology to Integrate Operation and Maintenance Information in Highway Information Modelling*. ISPRS International Journal of Geo-Information, 10 (5), p. 305. <https://doi.org/10.3390/ijgi10050305>
- Ait-Lamallam, S.; Yaagoubi, R.; Sebari, I.; Doukari, O. (2021b). *Extending the IFC Standard to Enable Road Operation and Maintenance Management through OpenBIM*. ISPRS International Journal of Geo-Information, 10 (8), p. 496. <https://doi.org/10.3390/ijgi10080496>
- Ali, K. N.; Alhajlah, H. H.; Kassem, M. A. (2022). *Collaboration and Risk in Building Information Modelling (BIM): A Systematic Literature Review*. Buildings, 12 (5), p. 571, Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/buildings12050571>
- Alocén, P.; Fernández-Centeno, M. Á.; Toledo, M. Á. (2022). *Prediction of Concrete Dam Deformation through the Combination of Machine Learning Models*. Water, 14 (1133), pp. 1–19. <https://doi.org/10.3390/w14071133>
- Alsahly, A.; Hegemann, F.; König, M.; Meschke, G. (2020). *Integrated BIM-to-FEM approach in mechanised tunnelling*. Geomechanics and Tunnelling, 13 (2), pp. 212–220. <https://doi.org/10.1002/geot.202000002>
- Antunes, A. (2024). *Application of semantic web techniques in data warehouse and business intelligence systems*, PhD. Thesis, ISCTE, Lisboa.
- Antunes, A.; Barateiro, J.; Marecos, V.; Petrović, J.; Cardoso, E. (2024). *Ontology-based BIM-AMS integration in European Highways*. Intelligent Systems with Applications, 22p. 200366. <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2024.200366>
- Arp, R.; Smith, B.; Spear, A. D. (2015). *Building Ontologies with Basic Formal Ontology*, The MIT Press. <https://doi.org/10.7551/mitpress/9780262527811.001.0001>
- Azenha, M.; Lino, J. C.; Caires, B. (2023). *20ª Edição do Curso BIM: Capítulo 1 - Introdução ao BIM*.
- Azenha, M.; Sibaii, M. E. (2024). *Passaportes Digitais dos Produtos e a iniciativa pdts.pt*. Workshop 5ª Edição do ptBIM 2024, Lisboa.
- Baudrit, C.; Taillandier, F.; Curt, C.; Hoang, Q. A.; Sbartai, Z.-M.; Breyse, D. (2022). *Graph based knowledge models for capitalizing, predicting and learning: A proof of concept applied to the dam systems*. Advanced Engineering Informatics, 52p. 101551. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101551>
- Bentley. (2023a). *iTwin Capture*. <https://br.bentley.com/software/itwin-capture/>.
- Bentley. (2023b). *Dam Monitoring*. <https://www.bentley.com/solutions/dam-monitoring/>.
- Berners-Lee, T.; Hendler, J.; Lassila, O. (2001). *The Semantic Web: A New Form of Web Content That is Meaningful to Computers Will Unleash a Revolution of New Possibilities*. ScientificAmerican.com.
- BIM Forum (2024). *Level of Development - LOD specification - Part I*. <https://bimforum.org/wp-content/uploads/2024/11/LOD-Spec-2024-Part-I-official-English.pdf>

- Broo, D. G.; Schooling, J. (2023). *Digital twins in infrastructure: definitions, current practices, challenges and strategies*. International Journal of Construction Management, 23 (7), pp. 1254–1263. <https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1966980>
- buildingSMART. (2024a). *OpenBIM*. OpenBIM. <https://www.buildingsmart.org/about/openbim/>.
- buildingSMART (2024b). *Information Delivery Specification (IDS)*. <https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/information-delivery-specification-ids/>
- buildingSMART Portugal (2022). *BuildingSMART Portugal*. <https://buildingsmart.pt/>.
- CEN/TR 17654 (2021). *Guideline for the implementation of Exchange Information Requirements (EIR) and BIM Execution Plans (BEP) on European level based on EN ISO 19650-1 and -2*, CEN, Brussels, Belgium. https://standards.cencenelec.eu/dyn/www/?p=CEN:110:0:::FSP_PROJECT,FSP_ORG_ID:68723,1991542&cs=146E981B5A0FD0FD0B3B13B2941732CFC
- Comissão dos Regulamentos de Barragens. (2019). *Regulamento de Segurança de Barragens (RSB)*. Decreto-Lei n.º 21/2018 de 28 de março, 1433–1454 p.
- Cortijo García, A.; De Miguel Sin Monge, M. A.; Rodríguez Gamero, J.; García Alberti, M.; Arcos Álvarez, A. A. (2021). *Aplicación de BIM a la modelización de una presa arco*. Anales de Edificación, 7 (3), pp. 20–25. <https://doi.org/10.20868/ade.2021.4971>
- CT197 (2021). *Regras de modelação de objetos BIM, SECCLasS - Sustainability Enhanced Construction Classification System*. <https://secclass.pt/relatorios/regras-de-modelacao-de-objetos-bim/>
- Dadjoo, M.; Kheirhah, E. (2015). *An Approach For Transforming of Relational Databases to OWL Ontology*. International journal of Web & Semantic Technology, 6 (1), pp. 19–28. <https://doi.org/10.5121/ijwest.2015.6102>
- Dadvand, P.; Rossi, R.; Oñate, E. (2010). *An Object-oriented Environment for Developing Finite Element Codes for Multi-disciplinary Applications*. Archives of Computational Methods in Engineering, 17 (3), pp. 253–297. <https://doi.org/10.1007/s11831-010-9045-2>
- Daniele, L.; Garcia-Castro, R.; Lefrançois, M.; Poveda-Villalón, M. (2020). *SAREF: the Smart Applications REference ontology*. <https://saref.etsi.org/core/v3.1.1/>
- Debellis, M. (2021). *A Practical Guide to Building OWL Ontologies - Using Protégé 5.5 and Plugins*.
- DNP TS 4585. (2020). *Modelação de Informação da Construção (BIM) - Plano de Execução BIM (BEP) - Especificação da estrutura do documento*, IPQ, Lisboa, Portugal, 20 p.
- Eastman, C. (1975). *The Use of Computers Instead of Drawings in Building Design*. AIA Journal, 63pp. 46–50.
- El Sibaii, M. (2020). *Towards efficient BIM use of underground geotechnical data*, MSc Thesis, Universidade do Minho, Guimarães.
- El Sibaii, M.; Granja, J.; Bidarra, L.; Azenha, M. (2022). *Towards efficient BIM use of geotechnical data from geotechnical investigations*. Journal of Information Technology in Construction (ITcon), 27 (19), pp. 393–415. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.019>
- EN ISO 19650-1 (2018). *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*, CEN, Brussels, Belgium, 42 p.
- EN ISO 19650-2 (2018). *Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) - Information management using building information modelling - Part 2: Delivery phase of the assets*, CEN, Brussels, Belgium.
- Fabozzi, S.; Biancardo, S. A.; Veropalumbo, R.; Bilotta, E. (2021). *I-BIM based approach for geotechnical and numerical modelling of a conventional tunnel excavation*. Tunnelling and Underground Space Technology, 108. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103723>
- Fernandes, L. (2015). *An integrated model for simulation of construction phasing of arch concrete dams*, MSc Thesis, Universidade do Minho, Guimarães.
- Fuller, A.; Fan, Z.; Day, C. (2020). *Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research*. IEEE Access, 8pp. 108952–108971. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>
- Garcia-Castro, R. (2024). *SAREF4WATR: an extension of SAREF for the water domain*. <https://saref.etsi.org/saref4watr/v2.1.1/>
- García-Castro, R.; Lefrançois, M.; Poveda-Villalón, M.; Daniele, L. (2023). *The ETSI SAREF Ontology for Smart Applications: A Long Path of Development and Evolution*. Energy Smart Appliances, pp. 183–215, John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119899457.ch7>
- Gezer, V.; Bergweiler, S. (2016). *Service and Workflow Engineering based on Semantic Web Technologies*. 10th International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies, vol.10, pp. 152–157, Venice, Italy.
- Giangiulio, M.; Granitzer, A. N.; Tschuchnigg, F.; Hoffmann, J. (2023). *BIM-to-FEM: Development of a Software Tool to Increase the Operational Efficiency of Dam Construction Projects*. Lecture Notes in Civil Engineering (LNCE), vol.306, pp. 182–195, Springer, Guimarães. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20241-4_13
- GmbH, F. (2025). *IFC Viewer*. PowerBI visuals. <https://appssource.microsoft.com/en-us/product/power-bi-visuals/flinkergmbh1644589155747.ifc-viewer>
- Gosain, D. (2021). *A Survey and Comparison of Relational and Non-Relational Database*. International journal of engineering research and technology.
- Granja, J.; Espinho, A.; Mendes, A.; Silva de Oliveira, A.; Pires, C.; Penedo, C.; ... Azenha, M. (2024a). *EIR para a fase de projeto de uma obra pública*, buildingSMART Portugal. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.14576465>
- Granja, J.; Silva de Oliveira, A.; Pinto, D.; Lima, F.; Silva, H.; Rodrigues, I.; ... Azenha, M. (2024b). *EIR para a fase de projeto de uma obra privada*, buildingSMART Portugal. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.14547997>
- Grieves, M. (2014). *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*. https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excelle ce_through_Virtual_Factory_Replication
- Grieves, M.; Vickers, J. (2016). *Origins of the Digital Twin Concept*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>

- Haller, A.; Janowicz, K.; Cox, S.; Le Phuoc, D.; Taylor, M.; Lefrançois, M. (2020). *SSN: Semantic Sensor Network Ontology & SOSA: Sensor, Observation, Sample and Actuator Ontology*. <https://www.w3.org/TR/vocab-ssn/>
- Han, Z.; Li, Y.; Zhao, Z.; Zhang, B. (2022). *An Online safety monitoring system of hydropower station based on expert system*. *Energy Reports*, 8pp. 1552–1567. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.02.040>
- Hananto, A. L.; Tirta, A.; Herawan, S. G.; Idris, M.; Soudagar, M. E. M.; Djamari, D. W.; Veza, I. (2024). *Digital Twin and 3D Digital Twin: Concepts, Applications, and Challenges in Industry 4.0 for Digital Twin*. *Computers*, 13 (4), p. 100, Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/computers13040100>
- Hariri-Ardebili, M. A.; Salazar, F.; Pourkamali-Anaraki, F.; Mazzà, G.; Mata, J. (2023). *Soft Computing and Machine Learning in Dam Engineering*. *Water*, 15 (5), pp. 917–925. <https://doi.org/10.3390/w15050917>
- Hasan, H.; Naimi, S.; Hameed, M. M. (2023). *A Comprehensive Analysis of BIM Technology's Critical Role in Assessing Cost for Complex Dam Construction Projects*. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 10 (3). <https://doi.org/10.18280/mmep.100305>
- Hastings, J. (2021). *Formal Representations of Ontologies for Automation of Analyses*, Committee on Accelerating Behavioral Science Through Ontology Development and Use, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. <https://nap.nationalacademies.org/resource/26464/Hastings-comissioned-paper.pdf>
- Heleno, A. F. (2021). *BIM for information management in structural safety control of embankment dams*, MSc Thesis - European Master in Building Information Modelling BIM A+, Universidade do Minho, Guimarães.
- Hendriatiningsih, S.; Widyastuti, R.; Saptari, A. Y.; Harpiandi, A.; Suhandri, H. F.; A. Khalifa, N. (2021). *Harnessing Multi Source Point Cloud Technology to Overcome High Resolution Building Information Modeling of Manganti Dam, Indonesia: A Preliminary Result*. *Jurnal Kejuruteraan*, 33 (4), pp. 943–953. [https://doi.org/10.17576/jkukm-2021-33\(4\)-17](https://doi.org/10.17576/jkukm-2021-33(4)-17)
- Hochtief-Vicon.; Ofiteco. (2013). *BIM solution for dam monitoring services*. pp. 29–31. https://www.ofiteco.com/sites/default/files/2016-11/BIM%20%26%20SHM%20Excerpt%20Newsletter%20Jun13_v0.1.pdf
- Hoppe, S.; Fleitz, J. (2021). *Using BIM for dam safety management*. 4th International Dam World Conference, pp. 189–198, LNEC, Lisboa, Portugal.
- ISO 16739-1 (2024). *Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries - Part 1: Data schema*, ISO, Geneva, Switzerland.
- ISO 23387 (em publicação). *Building information modelling (BIM) — Data templates for objects used in the life cycle of assets*, ISO, Geneva, Switzerland.
- Jeon, J.; Lee, J.; Shin, D.; Park, H. (2009). *Development of dam safety management system*. *Advances in Engineering Software*, 40 (8), pp. 554–563. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2008.10.009>
- Koumou, K. O.; Isafiade, O. (2024). *Asset Management Trends in Diverse Settings Involving Immersive Technology: A Systematic Literature Review*. *IEEE Access*, pp. 1–1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3461548>

- Laginha, S. (1982). *Elements for a thorough statistical analysis of dam failures*. Separata da revista da Universidade de Coimbra, XXIXpp. 163–178.
- Lima, R.; Couto, P.; Falcão, M. J.; Salvado, F.; Resende, R.; Parece, S. (2021). *SECClass - Análise de conceitos, normas e sistemas de classificação da informação da construção -Relatório de Abril*. p. 72, Lisboa. https://secclass.pt/wp-content/uploads/2021/10/Relatorio_Abril_SECClass.pdf
- Liu, R.; Luo, Z. (2023). *Application of digital intelligent construction in the field of water conservancy and hydropower engineering*. Journal of Physics: Conference Series, 2565 (1), p. 012025, IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2565/1/012025>
- Liu, T.; Zhang, S.; Wang, C. (2021). *A BIM-Based Safety Management Framework for Operation and Maintenance in Water Diversion Projects*. Water Resources Management, 35 (5), pp. 1619–1635. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02813-7>
- Lou, J.; Lu, W.; Xue, F. (2020). *A review of BIM data exchange method in BIM collaboration*. Proceedings of the 25th International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate, Wuhan, China.
- Ma, H.; Chi, F. (2016). *Major Technologies for Safe Construction of High Earth-Rockfill Dams*. Engineering, 2 (4), pp. 498–509. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.04.001>
- Marques, A. (2015). *Implementação de metodologias BIM na Direção de Engenharia de Barragens da EDP: Casos de estudo de projeto de estruturas em obras hidráulicas*, MSc Thesis, Universidade do Minho.
- Mata, J.; Salazar, F.; Barateiro, J.; Antunes, A. (2021). *Validation of Machine Learning Models for Structural Dam Behaviour Interpretation and Prediction*. Water, 13 (2717), pp. 1–27. <https://doi.org/10.3390/w13192717>
- Mcphee, A. (2013). *practical BIM: What is this thing called LOD*. practical BIM.
- Meng, X.-L. (2023). *Data Science and Engineering With Human in the Loop, Behind the Loop, and Above the Loop*. Harvard Data Science Review, 5 (2). <https://doi.org/10.1162/99608f92.68a012eb>
- Messner, J.; Anumba, C.; Dubler, C.; Goodman, S.; Kasprzak, C.; Kreider, R.; ... Zikic, N. (2019). *BIM Project Execution Planning Guide, Version 2.2*, Computer Integrated Construction Research Program, The Pennsylvania State University, University Park, PA, USA. <https://bim.psu.edu/>
- Mwanza, J.; Mashumba, P.; Telukdarie, A. (2024). *A Framework for Monitoring Stability of Tailings Dams in Realtime Using Digital Twin Simulation and Machine Learning*. Procedia Computer Science, 232, pp. 2279–2288. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.02.047>
- NATSPEC; MasterSpec (2018). *The OBOS - Open BIM Object Standard - version 1.0*, OBOS Open BIM Object Standard & OBOS Open BIM Object Standard.
- NBS (2023). *NBS BIM Object Standard - version 2.2*, NBS.
- Nguyen, T. D.; Adhikari, S. (2023). *The Role of BIM in Integrating Digital Twin in Building Construction: A Literature Review*. Sustainability (Switzerland), 15 (13). <https://doi.org/10.3390/su151310462>
- Nigam, M.; Dixit, A.; Sachan, K. (2016). *BIM Vs Traditional Quantity Surveying And Its Future Mapping*. IJEDR, pp. 1261–1265.

- NP EN ISO 7817-1 (2024). *Building information modelling - Level of information need - Part 1: Concepts and principles*, IPQ, Lisboa, Portugal, 3 p.
- NP EN ISO 19650-1. (2025). *Organização e digitalização da informação sobre edifícios e obras de engenharia civil, incluindo modelação da informação da construção (BIM) - Gestão da informação utilizando modelação da informação da construção - Parte 1: Conceitos e princípios*, IPQ, Lisboa, Portugal, 44 p.
- NP EN ISO 19650-2 (2025). *Organização e digitalização da informação sobre edifícios e obras de engenharia civil, incluindo modelação da informação da construção (BIM) - Gestão da informação utilizando modelação da informação da construção - Parte 2: Período de desenvolvimento dos ativos*, IPQ, Lisboa, Portugal, 37 p.
- NP EN ISO 23386 (2020). *Building information modelling and other digital processes used in construction - Methodology to describe, author and maintain properties in interconnected data dictionaries*, IPQ, Lisboa, Portugal, 3 p.
- Pan, Y.; Zhang, L. (2021). *A BIM-data mining integrated digital twin framework for advanced project management*. *Automation in Construction*, 124 (103564), pp. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103564>
- Park, D.; You, H. (2023). *A Digital Twin Dam and Watershed Management Platform*. *Water*, 15 (11), p. 2106. <https://doi.org/10.3390/w15112106>
- Pimenta, L. (2008). *Abordagens de Riscos em Barragens de Aterro*, Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Ramos-Alcázar, L.; Marchamalo-Sacristán, M.; Martínez-Marín, R. (2017). *Estimating and Plotting TLS Midrange Precisions in Field Conditions: Application to Dam Monitoring*. *International Journal of Civil Engineering*, 15 (2), pp. 299–307. <https://doi.org/10.1007/s40999-016-0093-3>
- Rasmussen, M.; Pauwels, P.; Lefrançois, M.; Schneider. (2021). *BOT: Building Topology Ontology*. <https://w3c-lbd-cg.github.io/bot/>.
- Rosa, A.; Azenha, M.; Carreto, J. (2024). *Recurso a Metodologias BIM em Barragens de Aterro: Práticas Atuais, Possibilidades e Desafios*. 12º Congresso Luso-Brasileiro-8as Jornadas Luso-Espanholas de Geotecnia, LNEC.
- Saback, V.; Popescu, C.; Blanksvärd, T.; Täljsten, B. (2022). *Asset Management of Existing Concrete Bridges Using Digital Twins and BIM: a State-of-the-Art Literature Review*. *Nordic Concrete Research*, 66 (1). <https://doi.org/10.2478/ncr-2021-0020>
- Satyanaga, A.; Aventian, G. D.; Makenova, Y.; Zhakiyeva, A.; Kamaliyeva, Z.; Moon, S.-W.; Kim, J. (2023). *Building Information Modelling for Application in Geotechnical Engineering*. *Infrastructures*, 8 (103), pp. 1–19. <https://doi.org/10.3390/infrastructures8060103>
- Scaioni, M.; Marsella, M.; Crosetto, M.; Tornatore, V.; Wang, J. (2018). *Geodetic and Remote-Sensing Sensors for Dam Deformation Monitoring*. *Sensors*, 18 (11), p. 3682, Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/s18113682>
- Schuler, P.-C.; Mirboland, M.; Stark, Y.; Mohammad, A. A.; Koch, C. (2025). *Linked Data for Structural Diagnostics: A Semantic Framework for Sustainable Infrastructure Management*, Porto, Portugal.
- SECClasS (2021). *Ferramenta de Pesquisa SECClasS | SECClasS*. <https://secclass.pt/search/>.

- Sentosa, G. A.; Azzaqy, A.; Wardani, S. G.; Setyandito, O.; Ambiaro, A. S.; Pierre, A. J.; Farell (2023). *Construction scheduling and monitoring control of dams based on BIM*. The 6th International Conference on Eco Engineering Development 2022 (ICEED 2022), vol.1169, pp. 1–9, IOP Publishing, Institute of Physics. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1169/1/012033>
- Serra, C. (2022). *As potencialidades e desafios da implementação BIM adaptada ao controlo de segurança estrutural de barragens de betão*. 4º Congresso Português de Building Information Modelling, vol.1, pp. 371–382, UMinho Editora, Braga. <https://doi.org/10.21814/uminho.ed.32.31>
- Serra, C.; Silva, J. C.; Granja, J.; Azenha, M. (2024). *BIM no controlo de segurança de barragens de betão: Uma ferramenta de apoio às inspeções visuais*. 5º Congresso Português de Building Information Modelling Volume 1: ptBIM, UMinho Editora. <https://doi.org/10.21814/uminho.ed.142.12>
- Seyed-Kolbadi, S. M.; Hariri-Ardebili, M. A.; Mirtaheri, M.; Pourkamali-Anaraki, F. (2020). *Instrumented Health Monitoring of an Earth Dam*. *Infrastructures*, 5 (3), p. 26. <https://doi.org/10.3390/infrastructures5030026>
- Shafto, M.; Conroy, M.; Doyle, R.; Glaessgen, E.; Kemp, C.; LeMoigne, J.; Wang, L. (2010). *Modeling, Simulation, Information Technology and Processing Roadmap - Technology Area II*, NASA.
- Shah, N. (2025). *Leading Countries With BIM Adoption*. United-BIM. <https://www.united-bim.com/leading-countries-with-bim-adoption/>.
- Shishehgarkhaneh, M. B.; Keivani, A.; Moehler, R. C.; Jelodari, N.; Laleh, S. R. (2022). *Internet of Things (IoT), Building Information Modeling (BIM), and Digital Twin (DT) in Construction Industry: A Review, Bibliometric, and Network Analysis*. *Buildings*, 12 (10). <https://doi.org/10.3390/buildings12101503>
- Silva, A.; Barateiro, J.; Galhardas, H.; Matos, H. (2006). *Data Analysis Features of the GESTBARRAGENS System*. Second International Conference of Innovative Views of .NET Technologies, Florianópolis, Brazil.
- Silva, A. R.; Galhardas, H.; Portela, E. (2005). *O Sistema de Informação GESTBARRAGENS*. Actas do Seminário: Barragens - Tecnologia, Segurança e Interacção com a Sociedade, Comissão Nacional das Grandes Barragens, Lisboa.
- Silva, T. F. L. da.; Vieira, D. R.; de Carvalho, M. M. (2024). *Exploring the challenges in Building Information Modeling (BIM) during the Design Phase: Evidence from cross-country studies*. *IEEE Transactions on Engineering Management*, pp. 1–18. <https://doi.org/10.1109/TEM.2024.3461508>
- Singh, M.; Fuenmayor, E.; Hinchy, E. P.; Qiao, Y.; Murray, N.; Devine, D. (2021). *Digital Twin: Origin to Future*. *Applied System Innovation*, 4 (2), p. 36, Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/asi4020036>
- Smith, M. (2012). *Embankment dam foundation analysis for the decrease of internal erosion likelihood*. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 6 (4), pp. 431–436. <https://doi.org/10.1007/s11709-012-0183-5>
- Tao, F.; Xiao, B.; Qi, Q.; Cheng, J.; Ji, P. (2022). *Digital twin modeling*. *Journal of Manufacturing Systems*, 64pp. 372–389. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.06.015>

- Tschuchnigg, F.; Lederhilger, C. (2020). *BIM in Geotechnics - Application to Road and Railway Construction*. Information Technology in Geo-Engineering. ICITG 2019, pp. 471–482, Springer Series in Geomechanics and Geoengineering, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32029-4_41
- Universidade do Minho. (2021). *PDTs Portugal*. <https://ppts.pt/dashboard>
- W3C. (2001). *The Semantic Web made easy*. Metalog - towards the Semantic Web. <https://www.w3.org/RDF/Metalog/docs/sw-easy>
- W3C. (2025). *Semantic Web Standards*. Semantic Web Standards. https://www.w3.org/2001/sw/wiki/Main_Page
- Wahyuningrum, C. A.; Sari, Y. C.; Kresnanto, N. C. (2020). *Building Information Modeling (BIM) for Dams-Literature Review and Future Needs*. Journal of the Civil Engineering Forum, 6 (1). <https://doi.org/10.22146/jcef.51519>
- Wangchuk, J.; Banihashemi, S.; Abbasianjahromi, H.; Antwi-Afari, M. F. (2024). *Building Information Modelling in Hydropower Infrastructures: Design, Engineering and Management Perspectives*. Infrastructures, 9 (7), p. 98. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9070098>
- Wright, L.; Davidson, S. (2020). *How to tell the difference between a model and a digital twin*. Advanced Modelling and Simulation in Engineering Sciences, 7 (1), p. 13. <https://doi.org/10.1186/s40323-020-00147-4>
- Wu, J.; Chen, J.; Chen, G.; Wu, Z.; Zhong, Y.; Chen, B.; ... Huang, J. (2021). *Development of Data Integration and Sharing for Geotechnical Engineering Information Modeling Based on IFC*. Advances in Civil Engineering, 2021 (1), p. 8884864. <https://doi.org/10.1155/2021/8884864>
- Xiao, P.; Zhao, R.; Li, D.; Zeng, Z.; Qi, S.; Yang, X. (2022). *As-Built Inventory and Deformation Analysis of a High Rockfill Dam under Construction with Terrestrial Laser Scanning*. Sensors, 22 (2), p. 521, Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/s22020521>
- Zhou, Y.; Bao, T.; Shu, X.; Li, Y.; Li, Y. (2023). *BIM and ontology-based knowledge management for dam safety monitoring*. Automation in Construction, 145 (104649), Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104649>
- Zhu, X.; Bao, T.; Yeoh, J. K. W.; Jia, N.; Li, H. (2021). *Enhancing dam safety evaluation using dam digital twins*. <https://doi.org/10.1080/15732479.2021.1991387>, pp. 1–17, Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1080/15732479.2021.1991387>

