

Aplicação da metodologia BIM na monitorização da segurança de barragens de aterro

<https://doi.org/10.21814/uminho.ed.32.38>

**Aline Heleno¹, Miguel Azenha²,
Laura Caldeira³, Maria João Silva⁴**

¹ Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT),
São Paulo, ID ORCID 0000-0002-3732-3458

² Universidade do Minho, Guimarães, ID ORCID 0000-0003-1374-9427

³ Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, ID ORCID 0000-0002-9164-2118

⁴ Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, ID ORCID 0000-0002-3723-0948

Resumo

A construção de barragens é fundamental para o desenvolvimento de diversas atividades essenciais para as infraestruturas urbana e industriais. Existem registos históricos de roturas de barragens, sendo maioria as associadas a barragens de aterro. Dada a importância dessas estruturas e os impactos gerados pelo rompimento, os esforços desenvolvidos para o controlo da segurança de uma barragem afiguram-se como fundamentais. Existem ainda algumas barragens nas quais as medições da instrumentação são, ainda, realizadas de forma manual, sem recurso a processos integradores da informação. Neste sentido, a utilização de modelos BIM integrados em bases de dados, e apoiados por ferramentas específicas para sua análise, torna-se um procedimento essencial para a resolução de alguns problemas decorrentes do processo de análise da segurança de barragens.

O presente trabalho apresenta uma aplicação da metodologia BIM à monitorização da segurança de barragens de aterro, contribuindo para gestão integrada da informação indexada no seu contexto espacial a um modelo 3D. O trabalho desenvolvido apresenta os procedimentos para visualização tridimensional dos dados obtidos da instrumentação de uma barragem de aterro localizada em Portugal, estabelecendo a interoperabilidade entre os dados registados e uma ferramenta para análise dos mesmos. A metodologia é testada para um tipo particular de instrumentação, designadamente para as baterias de assentamento, permitindo a integração dos dados entre o modelo BIM, a base de dados e a respectiva ferramenta de análise. São apresentadas as principais conclusões.

1. Introdução

Os modelos subjacentes às metodologias Building Information Modelling (BIM) destacam-se por concentrar grande quantidade de informações relevantes [1,2], sendo portanto uma excelente ferramenta de gestão de informações sobre qualquer infraestrutura, como barragens. Têm sido desenvolvidos vários trabalhos com recurso à metodologia BIM para a análise dos dados de observação aplicada às diferentes fases da vida útil de barragens de betão [3–5], mas não se encontrou nenhuma aplicação em barragens de aterro na revisão bibliográfica encetada no contexto do presente artigo.

A construção de barragens está associada a diversas atividades sejam elas industriais e até de subsistência, com diferentes tipos usos, como: energia hidroelétrica, navegação, controlo de cheias, abastecimento de água, e contenção de resíduos da exploração mineira entre e outros [6].

No entanto, este tipo de estrutura pode causar enormes impactos ambientais, sociais e económicos durante as fases de construção, operação e desmantelamento, e ainda mais no caso de rotura, com potencial para resultar no alagamento de vastas áreas a jusante com perda de vidas humanas. Nos últimos 100 anos, milhares de pessoas morreram ou perderam suas propriedades, por causa do rompimento de barragens [7].

Dos tipos de barragens existentes a mais comum é a barragem de aterro, totalizando 77% de todas as barragens do mundo, sendo também a que registra mais acidentes [7–9].

Um estudo recente baseado numa base de dados de roturas/acidentes em barragens de resíduos mostrou que desde 1915, ocorreram 283 roturas, provocando 2300 mortos e vários impactos ambientais, sociais e económicos. Além disso, desde 2000 ocorreram aproximadamente 500 mortes por causa de roturas de barragens deste tipo. Também foram registadas roturas em barragens de diferentes usos, mostrando a importância de uma estratégia de monitorização integrada com o entendimento das melhores práticas geotécnicas [10].

Para evitar a rotura da barragem, é imprescindível estabelecer o respetivo controlo de segurança durante as fases de construção e operação como um processo permanente de monitorização e avaliação do comportamento, mediante a realização de inspeções visuais, campanhas de medição e análises de instrumentação [11,12]. Nesse sentido a possível concentração das informações numa base de dados indexada espacialmente com modelo BIM, permite a avaliação de diferentes tipos de dados fornecidos pela instrumentação, pelas inspeções visuais e eventuais ensaios de laboratório e de campo realizados na barragem de forma integrada e automatizada. Deste modo, é possível, de forma mais fácil do que com metodologias convencionais, identificar comportamentos anómalos, diagnosticar a sua causa, prever a sua evolução e, se necessário, remediá-los para garantir a segurança da barragem.

A aplicação da metodologia BIM na monitorização de barragens possibilita a solução de diferentes tipos de problemas identificados durante os procedimentos de aquisição, organização e análise dos dados de instrumentação, sendo as principais oportunidades de melhoria identificadas as seguintes:

- Processos manuais de medição da instrumentação instalada, em alguns casos utilizando formulários em papel. Este procedimento pode gerar além de erros de digitação, tempo excessivo entre a medição dos parâmetros em campo e a digitalização das informações. Uma solução para este problema está na medição em tempo real utilizando dispositivos/conexões 'Internet of Things' (IoT), conectados a base de dados, com objetivo de reduzir o tempo de envio de dados ao responsável técnico pela análise da instrumentação.
- Existência de diversos ficheiros e/ou folhas de cálculo para análise da instrumentação, não permitindo a análise integrada dos dados. Uma solução é o uso de uma base de dados para integrar todos os dados de instrumentação e sua conexão com ferramentas que auxiliam na visualização e análise. Isso pode ajudar a prever o comportamento da barragem e, até mesmo, ao estabelecimento de um sistema automático de emissão de alerta, o qual não dispensa a presença de especialistas para validar as análises e o alerta.
- Medição de parâmetros de instrumentação e de registo decorrentes de inspeções de segurança realizadas periodicamente. Utilização de métodos de inspeção automática que podem complementar a inspeção presencial realizada, como a utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) associado a modelos BIM para inspeções visuais, bem como de métodos geofísicos, em operação constante, para determinação das zonas saturadas da barragem. Em complemento, o uso da Inteligência Artificial (IA) para processar todas as informações e identificar possíveis anomalias nas imagens aéreas.

Praticamente todas as soluções apontadas para os problemas identificados estão associados ao conceito de gestão de ativos ou *Facility Management* (FM)

O uso de FM em obras civis tem sido amplamente estudado com diferentes tipos de aplicações utilizando a metodologia BIM, como por exemplo o acesso e a atualização dos dados de forma contínua e fiável durante todo o ciclo de vida de uma obra [13,14]. Um exemplo geral de aplicações de BIM com FM é a otimização da gestão e da manutenção das infraestruturas, integrando o modelo de construção *as-built* e as informações dos equipamentos aos sistemas usados ao longo do ciclo de vida dessa infraestruturas [15,16]. Outra aplicação é o uso de dispositivos IoT para integrar informações de estruturas em tempo real, o que pode ser benéfico para diferentes tipos de utilizadores no contexto da gestão de ativos, como diferentes tipos de monitorização [16–18].

Embora existam várias discussões sobre as aplicações da integração entre o BIM e o FM no projeto, construção e operação / manutenção de edifícios, ainda é necessário recorrer a algumas adaptações para o uso da metodologia BIM em projetos de

infraestruturas. Recentemente, tem havido um interesse crescente na aplicação do BIM à infraestrutura, que possui complexidades e particularidades próprias [19]. No entanto, existem diversos tipos de obras de infraestrutura como túneis, barragens, aeroportos, rodovias e ferrovias entre outros, cada um potencialmente exigindo uma abordagem diferente baseada em BIM, que criam um desafio para a integração do BIM no FM [19].

Já existem algumas aplicações do uso da metodologia BIM para barragens de betão. No entanto, ainda são necessários avanços significativos para incorporar as ferramentas de BIM na aplicação completa para todas as fases da barragem (projeto, construção e operação). No caso de aplicação a barragens de aterro, a metodologia BIM é ainda incipiente e praticamente não existem trabalhos técnico-científicos a respeito. Para este tipo de barragem, as aplicações reportadas limitam-se à fase de projeto.

Com base no exposto, o principal objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de procedimento baseado na metodologia BIM, e aplicada a barragens de aterro, que permita tirar proveito da informação indexada em contexto geométrico para facilitar os processos de análise dos dados de instrumentação de barragens de aterro existentes. Este processo pretende automatizar algumas atividades para solucionar alguns dos problemas identificados durante o processo de análise manual dos dados de instrumentação, como (i) dados disponíveis em ficheiros diferentes, não permitindo uma análise concentrada e integrada, (ii) falta de processos automatizados para conectar as informações em diferentes tipos de análise de dados e ferramentas de visualização.

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados diferentes tipos de ferramentas e *softwares*. O modelo BIM foi desenvolvido no *Revit* versão 2021. Os códigos de análise de dados e para vincular as informações ao *Revit* foram desenvolvidos no *Dynamo* utilizando programação em *Python*. Os dados foram armazenados e estruturados em base de dados Relacional.

A metodologia desenvolvida foi aplicada a uma barragem de aterro real, a Barragem de Odelouca. Esta barragem está localizada na região do Algarve, em Portugal, para abastecimento de água. O principal resultado é um modelo 3D BIM com informações geométricas da barragem e os respectivos dados de instrumentação.

2. Estrutura integrada para o monitorização de barragens

Para o entendimento completo das etapas de trabalho, a Figura 1 mostra o respetivo fluxograma computacional. Nesse fluxograma o procedimento foi dividido em quatro atividades identificadas com A, B, C e D, que correspondem respectivamente a: criação da geometria; definição e implementação do sistema de base de dados; definição dos objetos BIM e conexão com a base de dados; visualização e análise dos resultados.

A atividade identificada como A consiste na conversão da geometria existente no modelo BIM tridimensional. Para isso as informações de projeto foram transpostas para folhas de cálculo em Microsoft Excel, tendo sido utilizada programação visual e a linguagem Python para estabelecer a troca de informações com a plataforma de modelação BIM. O resultado é o modelo BIM *As-is* da geometria da barragem.

A geometria é gerada a partir dos pontos chave das secções transversais da barragem (maciços estabilizadores, núcleo e sistema de drenagem interno). A partir destes pontos, de cada uma das zonas é gerado um polígono. Esses polígonos são extrudidos em relação ao eixo da barragem, gerando três sólidos independentes. Este procedimento é realizado para os três tipos de zonas (maciços estabilizadores, núcleo e sistema de drenagem interno). O sólido correspondente à barragem de aterro é cortado de acordo com as geometrias correspondentes às diferentes zonas da barragem.

A atividade B consiste na criação da base de dados das informações referentes à instrumentação e à verificação dos dados previamente existentes na base de dados, e conseqüentemente a escrita de dados inexistentes. A programação foi realizada em linguagem *Python* utilizando a plataforma aberta *Jupyter Notebook*. Quanto ao sistema de gestão da base de dados (SGBD) escolheu-se o *SQLite* por ser uma ferramenta disponível gratuitamente que não oferece restrições ou limite de atributos e permite a permanência dos dados. Além disso, com *SQLite*, a conexão entre o modelo BIM e a base de dados torna-se fácil usando a linguagem de programação visual. Com efeito, a conexão não precisa de um servidor dedicado porque esta base de dados lê e grava diretamente do ficheiro em disco.

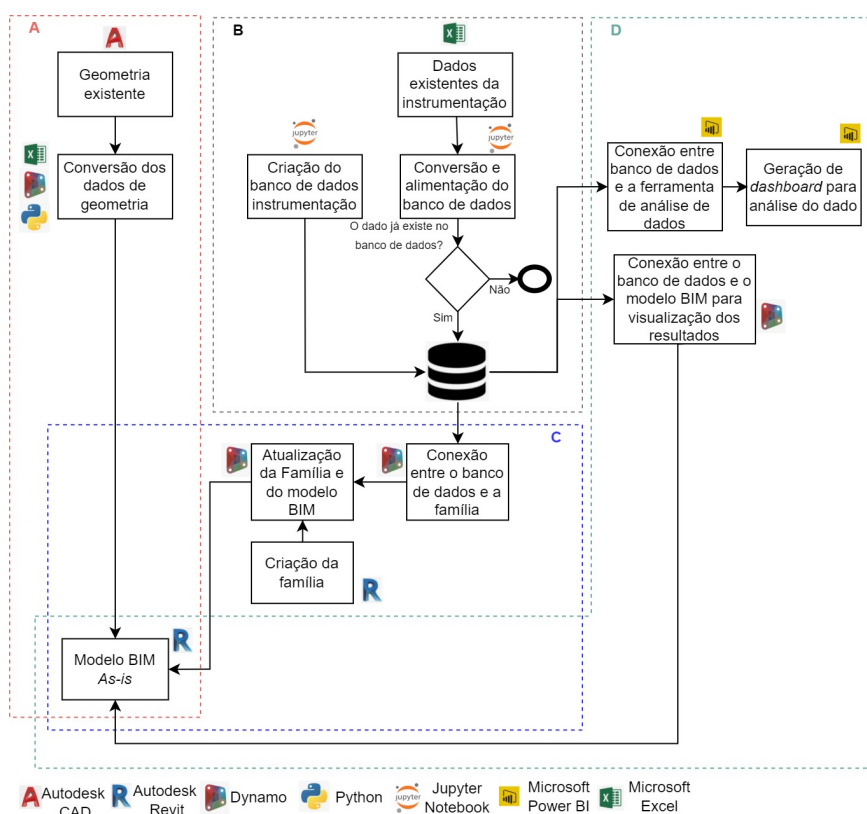


Figura 1
Fluxograma
computacional.

O esquema conceptual da base de dados criada, pode ser analisado em detalhe na dissertação de mestrado que está na génese do presente artigo [20].

A atividade C consiste na criação dos objetos BIM e a conexão da base de dados com o modelo BIM, estabelecida por meio a programação visual.

A primeira etapa na criação de um novo objeto BIM é definir um dos padrões ou procedimentos, como o *Open BIM Object Standard* (OBOS), que contribui para a interoperabilidade em modelos BIM. A segunda etapa é identificar a existência de objetos e modificar e inserir as informações necessárias para o projeto [13]. Porém, não existem bibliotecas de instrumentação geotécnica disponíveis, tampouco existem *templates* que possam auxiliar na construção do objeto.

Portanto, para a criação do objeto de instrumentação, optou-se por iniciar o desenvolvimento do *Product Data Template* (PDT) de um instrumento, as baterias de assentamento.

O *level of information need* foi definido de acordo com as condições de uma barragem já construída, ou seja, considerando que os instrumentos estão instalados e estão em fase de operação. O desenvolvimento do modelo BIM é uma forma de contribuir com a análise e visualização dos resultados da instrumentação. Neste contexto, o *level of information need* foi definido em função das informações necessárias para análise da segurança da barragem e modo a evitar o excesso ou informações que não pudessem ser utilizadas nas análises.

As informações mais importantes definidas para as baterias de assentamento são: i) o nome e localização do instrumento, ii) o nome e a profundidade da instalação de cada anel, iii) a data de medição e iv) a visualização da medição. Foram também adicionados alguns parâmetros geométricos.

Para os parâmetros do instrumento, procurou-se adequar as regras do *NBS BIM Object Standard* [21], conforme apresentado na Tabela 1, que mostra o PDT proposto. A Figura 2 mostra os dados geométricos e a visualização 3D das baterias de assentamento.

Tabela 1

PDT baterias de assentamento informação não geométrica e geométrica.

Group Parameter	Parameter name	Units	Data Type	Example
Geometric Data	PipeLenght	mm	Numeric	1
	PipeRadius	mm	Numeric	40
	PlateRadius	mm	Numeric	500
	PlateThickness	mm	Numeric	50
Others	DamName	text	Alphanumeric	Odelouca
	InstrumentName	text	Alphanumeric	BA5-1
	RingName	text	Alphanumeric	R1
	InstLocationX		Numeric	2222222.25
	InstLocationY		Numeric	2222222.25
	RingLevel	m	Numeric	20
	MeasurementDate		Alphanumeric	1900-12-31T23:59:59
	InstallationDate		Alphanumeric	1900-12-31T23:59:59
Settlement	mm	Numeric	200	

A atividade D estabelece a conexão entre a base de dados e o modelo BIM *As-is* e a ferramenta de análise de dados, *Microsoft Power BI*. Essa conexão foi estabelecida por meio da linguagem de programação visual.

A visualização dos dados no modelo BIM é feita por meio de um objeto cilíndrico, desenhado na posição de cada um dos anéis. Para isso, foi criado um objeto BIM conforme mostra a Figura 3. A altura dos cilindros corresponde ao valor do deslocamento vertical, e a escala de cores também fornece uma imagem prévia do mesmo parâmetro.

Nessa atividade também é estabelecida a conexão da base de dados com a ferramenta de análise. A aplicação desse tipo de ferramenta na indústria da construção civil tem sido cada vez mais utilizada, devido à necessidade de processamento e análise dos dados produzidos, principalmente com a integração entre as técnicas de BIM, IoT e Data Mining (DM) [22].

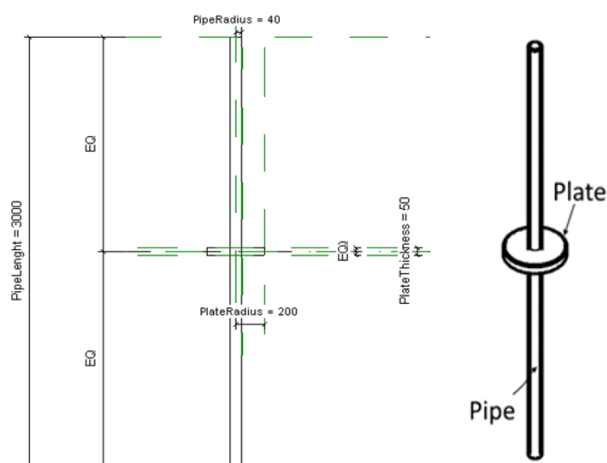


Figura 2
Informação geométrica integrante em objeto BIM baterias de assentamento.

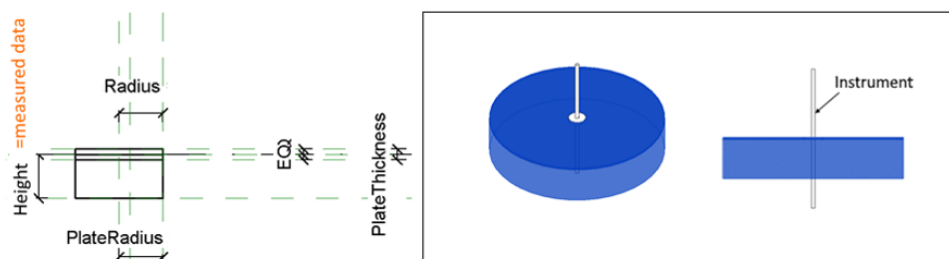


Figura 3
Visualização dos resultados em objeto BIM.

3. caso de estudo: Barragem Odelouca

A barragem de Odelouca é uma barragem de aterro localizada, no barlavento algarvio, a norte de Silves, na Ribeira de Odelouca, o principal afluente do rio Arade. A barragem é utilizada para abastecimento de água à zona barlavento e tem o coroamento à cota 106 m e uma altura máxima acima da fundação de 76 m. O coroamento tem

11 m de largura e cerca de 415 m de comprimento, com dois trechos retos conectados por um trecho curvo. Os instrumentos instalados no corpo da barragem são: marcas de superfície, baterias de assentamento, inclinômetros e piezômetros.

Os instrumentos da barragem de Odelouca, como na maioria das barragens do mundo, não estão equipados para efetuar transmissão de dados em tempo real. Frequentemente, as medições dos dados de observação, ainda são realizadas em formulários de papel, que posteriormente são digitalizados e enviados ao responsável técnico pela avaliação da segurança. No caso da barragem de Odelouca, existe uma folha de cálculo em Excel diferente para cada um dos instrumentos, o que dificulta uma análise integrada dos resultados, sendo a análise realizada essencialmente bidimensional e individualizada para cada instrumento. Na maioria dos casos, a análise é realizada em cada uma das seções transversais definidas no plano de observação. A integração global dos dados fica a cargo do técnico responsável que tem que se socorrer da sua capacidade de abstração para perceção global. Diante do exposto, é interessante concentrar os dados da instrumentação numa base de dados integrada e visualizar os resultados de forma integrada e tridimensional. Além disso, algumas ferramentas de análise de dados permitem uma avaliação diferenciada dos dados, com base em modelos estatísticos de correlação de informações e de dados.

Este trabalho apresenta um exemplo de aplicação da conexão entre diferentes ferramentas a fim de integrar informações, concentrá-la em base de dados integrada e visualizar de forma diferenciada, seja através da visualização tridimensional ou até mesmo em uma ferramenta de análise de dados. De acordo com o fluxo de trabalho mostrado na Figura 1, o processo começa com a definição da geometria tridimensional. A geometria desenvolvida neste projeto foi simplificada e limitada aos maciços estabilizadores, núcleo e sistema de drenagem interna. A Figura 4 mostra uma visão do modelo tridimensional criado.

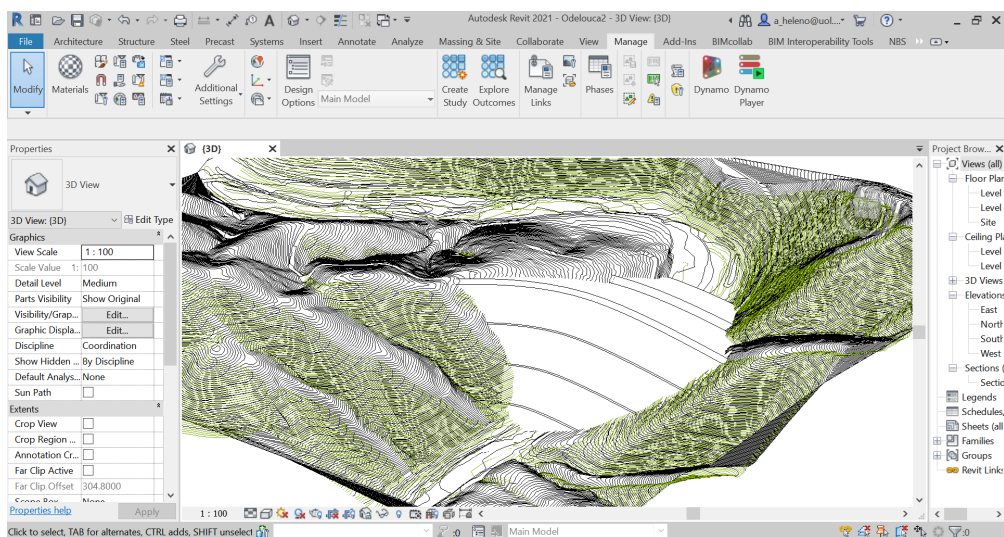


Figura 4
Modelo BIM geometria da barragem.

A partir da criação da base de dados relacional com todas as medições e informações dos instrumentos referentes às baterias de assentamento, foi possível estabelecer uma conexão com o modelo BIM. Esta conexão permitiu o desenho automático da posição dos instrumentos, dos resultados da observação e de informações adicionais para cada instrumento. A Figura 5 (a) mostra a visualização 3D dos dados de instrumentação no modelo BIM. Também foi possível estabelecer a conexão da base de dados com ferramentas de análise, facilitando a sua análise integrada, conforme mostra a Figura 5 (b).

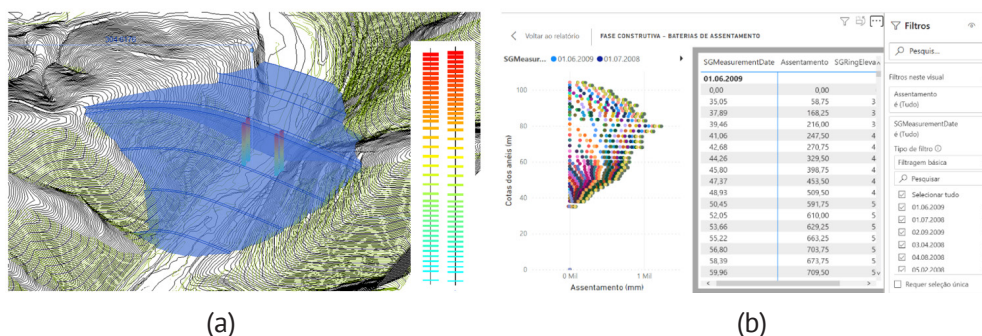


Figura 5
Visualização dos dados de instrumentação
(a) modelo BIM (b) ferramenta de análise de dados.

4. Considerações finais

O trabalho desenvolvido pretendeu implementar, explorar e demonstrar algumas aplicações potenciais de modelos BIM para barragens de aterro existentes, com foco na análise de dados de instrumentação durante a fase de operação. As principais conclusões podem ser resumidas nos seguintes pontos:

Foi estabelecida a conexão entre a base de dados e o modelo BIM, de forma a garantir a indexação da informação ao modelo da barragem (geometria, instrumentação e informações do equipamento).

Verificou-se que existem recursos para realizar a visualização no modelo BIM, sendo uma ferramenta promissora. No entanto, são ainda necessários aprofundamentos adicionais na visualização integrada dos dados, sendo para isso necessário o desenvolvimento de códigos mais avançados para visualização ou mesmo para análise de dados. Neste sentido, torna-se eficiente a sua integração com ferramentas existentes que permitam a análise e visualização dos dados, sendo esta uma das possibilidades testadas ao longo deste trabalho, que mostrou que a ligação entre a base de dados e as ferramentas de análise também é possível.

A aplicação dos processos desenvolvidos à barragem de Odelouca, mostrou que a utilização do modelo BIM é promissora, embora o exemplo apresentado seja simplificado e restrito a apenas um tipo de instrumento.

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 Engenharia Estrutural (ISISE), sob a referência UIDB / 04029/2020.

As atividades foram desenvolvidas dentro do programa European Master in Building Information Modelling (BIM A+) em parceria do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Referências

- [1] J. M. F. Lopes, “BIM Application in the Evaluation of Airport Infrastructures”, 2017.
- [2] Y. C. Sari, C. A. Wahyuningrum, and N. C. Kresnanto, “Building Information Modelling (BIM) for Dams-Literature Review and Future Needs”, *J. Civ. Eng. Forum*, vol. 6, no. 1, pp. 61-68, 2020, doi: 10.22146/jcef.51519.
- [3] L. P. B. Fernandes, “An integrated model for simulation of construction phasing of arch concrete dams”, 2015.
- [4] W. Shou, J. Wang, X. Wang, and H. Y. Chong, “A Comparative Review of Building Information Modelling Implementation in Building and Infrastructure Industries”, *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 22, no. 2, pp. 291-308, 2015, doi: 10.1007/s11831-014-9125-9.
- [5] H. F. Liu, C. Ren, Z. T. Zheng, Y. J. Liang, and X. J. Lu, “Study of a gray genetic BP neural network model in fault monitoring and a diagnosis system for dam safety”, *ISPRS Int. J. Geo-Information*, vol. 7, no. 1, 2018, doi: 10.3390/ijgi7010004.
- [6] J. E. Evans, S. D. Mackey, J. F. Gottgens, and W. M. Gill, “Lessons from a dam failure”, *Ohio J. Sci.*, vol. 100, no. 5, pp. 121–131, 2000.
- [7] S. A. N. VALLEJO, “Hydraulic engineering failure of large dams”, p. 110, 2016.
- [8] M. Foster, R. Fell, and M. Spannagle, “The statistics of embankment dam failures and accidents”, *Can. Geotech. J.*, vol. 37, no. 5, pp. 1000-1024, 2000, doi: 10.1139/t00-030.
- [9] A. Nasrat, A.-A. Nadhir, K. S. Varoujan, and L. Jan, “Dam Safety Problems Related to Seepage”, *Res. Gate*, vol. 10, no. 6, pp. 191–239, 2020, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/342329857_Dam_Safety_Problems_Related_to_Seepage.
- [10] L. Clarkson and D. Williams, “Critical review of tailings dam monitoring best practice”, *Int. J. Mining, Reclam. Environ.*, vol. 34, no. 2, pp. 119-148, 2020, doi: 10.1080/17480930.2019.1625172.

- [11] R. Fell, P. MacGregor, and D. Stapledon, *Geotechnical engineering of embankment dams*. Rotterdam: A.A. Balkema, 1992.
- [12] T. C. Fusaro, “Estabelecimento Estatístico de Valores de Controle para a Instrumentação de Barragens de Terra: Estudo de Caso das Barragens de Emborcação e Piau”, 2007.
- [13] M. B. Trbulci, “Interoperability framework for BIM-FM based on a relational database”, Universidade do Minho, 2020.
- [14] E. Seghezzi *et al.*, “Towards an occupancy-oriented digital twin for facility management: Test campaign and sensors assessment”, *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 7, 2021, doi: 10.3390/app11073108.
- [15] K. 2011 Eastman, C.M, Teicholz, P.Sacks, R. and Liston, *A Guide to Building Information Modelling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. 2018.
- [16] A. B. A. Altohami, N. A. Haron, A. H. Ales@Alias, and T. H. Law, “Investigating approaches of integrating BIM, IoT, and facility management for renovating existing buildings: A review”, *Sustain.*, vol. 13, no. 7, 2021, doi: 10.3390/su13073930.
- [17] Z. Pourzolfaghar, P. McDonnell, and M. Helfert, “Barriers to Benefit from Integration of Building Information with Live Data from IOT Devices during the Facility Management Phase”, *CITA BIM Gather.*, no. November, p. 5, 2017, [Online]. Available: http://doras.dcu.ie/22126/1/Barriers_to_Benefit_from_Integration-14-Sep-17.pdf.
- [18] M. Valinejadshoubi, O. Moselhi, A. Bagchi, and A. Salem, “Development of an IoT and BIM-based automated alert system for thermal comfort monitoring in buildings”, *Sustain. Cities Soc.*, vol. 66, 2021, doi: 10.1016/j.scs.2020.102602.
- [19] S. L. M. Correa and E. T. Santos, *BIM Support in the Tendering Phase of Infrastructure Projects*, vol. 98. Springer International Publishing, 2021.
- [20] A. Heleno, M. Azenha, and L. Caldeira, “BIM for information management in structural safety control of embankment dams BIM for information management in structural safety control of embankment dams”, 2021.
- [21] NBS Enterprises Ltd, “NBS BIM Object Standard Version 2.1”, no. March, pp. 1-41, 2019.
- [22] Y. Pan and L. Zhang, “A BIM-data mining integrated digital twin framework for advanced project management”, *Autom. Constr.*, vol. 124, no. January, p. 103564, 2021, doi: 10.1016/j.autcon.2021.103564.