

Digital Twins em redes ferroviárias e rodoviárias – Uma revisão sistemática da literatura

<https://doi.org/10.21814/uminho.ed.32.49>

**João Vieira^{1,2}, Hugo Patrício²,
Nuno Almeida¹, João Morgado², João P. Martins³**

¹ Universidade de Lisboa – Instituto Superior Técnico;
ORCID 0000-0001-6309-329X (J.V.); ORCID 0000-0001-7024-2679 (N.A.)

² Infraestruturas de Portugal, Almada; ORCID 0000-0002-6519-7137 (H.P.);
ORCID 0000-0002-5794-8236 (J.M.)

³ CONSTRUCT-GEQUALTEC – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto;
ORCID 0000-0001-9878-3792 (J.P.M.)

Resumo

O conceito do *Digital Twin* (DT), embora não seja recente, tem recebido atenção crescente ao longo da última década, em particular no setor da Indústria. Esta tendência é acompanhada pelas tecnologias digitais, em particular da Indústria 4.0, que alcançaram avanços e aplicações significativos em organizações gestoras de ativos físicos. Os gestores de ativos destas organizações são confrontados com uma oportunidade de superar os desafios relacionados com a gestão de dados e de incrementar o valor gerado a partir dos ativos. Os sistemas e redes de infraestruturas ferroviárias e rodoviárias não são exceção e, pelo facto de prestarem um serviço essencial no transporte de pessoas e bens, existe um valor considerável por extrair através da digitalização e da inovação das atividades de gestão de ativos. Este estudo procura resumir o estado atual da aplicação do DT nas redes de infraestruturas ferroviárias e rodoviárias, como resultado da revisão sistemática da literatura segundo a metodologia PRISMA. Este artigo apresenta e analisa os principais resultados da revisão bibliográfica e fornece uma visão geral sobre o estado atual da investigação sobre DT no setor das redes ferroviária e rodoviária.

1. Introdução

Transformação digital nas redes ferroviária e rodoviária

As redes ferroviárias e rodoviárias constituem dois subsectores da rede global de transportes [1], abrangem um vasto leque de ativos (muitos são comuns a outros setores, como a energia e os edifícios) e requerem múltiplas áreas de especialização. Estas redes são responsáveis por mais de 63% do transporte de mercadorias e quase 90% do transporte de passageiros dentro da União Europeia [2]. Além de uma procura crescente, estas redes de transporte enfrentam outros desafios, como um considerável défice acumulado de investimento e o envelhecimento contínuo das infraestruturas [1,3–8].

A gestão destas infraestruturas críticas requer ferramentas que permitam avaliar e equilibrar o seu custo, risco e desempenho [9], com base em dados concretos que apoiem a tomada de decisão na gestão de ativos [5,10]. Nesse sentido, o setor das infraestruturas tem vindo a adotar tecnologias inovadoras, muitas já utilizadas e validadas noutros setores, como o dos edifícios [10]. Neste contexto, a Indústria 4.0 surgiu como uma nova revolução industrial [11], disponibilizando um conjunto de novas abordagens e ferramentas com vista ao aumento da eficiência dos processos industriais.

Digital Twin

Apesar de não ser um conceito recente, o *Digital Twin* (DT) constitui uma das abordagens estimuladas pela Indústria 4.0 e que tem atraído interesse crescente por parte da indústria e da comunidade científica [12–16]. A experiência de aplicação do DT vem principalmente da indústria e do setor aeroespacial [17–21], com poucos exemplos de aplicação nas infraestruturas [19,21]. Apesar de a origem do conceito do DT estar bem documentada e ter um consenso generalizado na literatura, o mesmo parece não ocorrer com a sua definição [15,22–24]. Como vários autores discutiram, o DT tem sido interpretado de várias formas, dependendo de cada autor e até do setor em que é estudado [25–27].

Enquanto alguns autores defendem que uma representação digital de um ativo ou de um sistema de ativos é suficiente para constituir um DT [5,28–31], outros defendem que um DT é muito mais do que uma representação digital [16,32–37]. Enquanto alguns autores afirmam que o DT é uma tecnologia [4,18,36–40], outros afirmam que é uma abordagem ou um processo, em vez de um produto ou uma tecnologia [15,41]. Enquanto alguns autores utilizam indistintamente os termos “BIM” e “DT” [39,42], para outros estes são dois termos distintos [15,24,43,44].

Para clarificar as diferenças entre aplicações de DT, alguns autores propuseram classificações para o DT. Segundo a classificação de [25] – uma das mais populares – existem três tipos de DT – “*digital model*”, “*digital shadow*” e “*digital twin*” – dependendo

do nível de automação da transferência de dados entre os ativos físico e virtual. Ainda assim, não só o “*digital twin*” é classificado como um tipo de DT, o que já potencia equívocos, mas também aumenta a dispersão de vocabulário em torno do conceito do DT. Os termos “*digital model*” e “*digital shadow*”, por exemplo, são usados simultaneamente para tipos [25] e componentes do DT [11]. Numa revisão da literatura sobre o DT, Liu et al. [22] reportaram que mais de metade dos artigos incidiam sobre “*digital models*” ou “*digital shadows*”, embora os seus autores afirmassem ter estudado DTs. Alguns autores também reportaram que aplicações de DTs “verdadeiros” são raras [15] e que, portanto, a revisão sistemática sobre DT é complexa [22].

Adicionalmente, os vendedores e fornecedores de software também contribuem para os equívocos existentes em torno do DT, ao vender DTs como produtos e tecnologias [34]. Face a este cenário, alguns autores [15,16] concluem que o DT é atualmente uma “palavra da moda”.

2. Metodologia

2.1. Definição do DT em redes ferroviária e rodoviária

Face às circunstâncias anteriormente apresentadas, o primeiro desafio deste estudo consiste em filtrar os estudos relevantes sobre o DT nas redes ferroviárias e rodoviárias. Os autores consideram que uma proposta para a definição do DT é benéfica para estabelecer um critério de elegibilidade, permitindo conduzir a revisão da literatura e filtrar os artigos revelantes.

Assim, um DT para as redes ferroviária e rodoviária é considerado como uma representação digital de um ativo ou sistema de ativos físicos e o seu contexto operacional, integrando uma conexão de dados em tempo-real com o ativo/sistema físico e outras ferramentas e fontes (tais como modelos físicos, análise de dados, capacidades de simulação e previsão), usados para gerar perceções alinhadas com o propósito pré-definido e, em última análise, apoiar os processos de tomada de decisão na gestão de ativos físicos.

2.2. Protocolo de revisão da literatura

A revisão da literatura seguiu a estrutura da metodologia PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) [46]. A revisão sistemática inicia-se com uma fase de identificação, seguida da triagem, elegibilidade e seleção final dos artigos a serem incluídos na análise de conteúdo. Este processo encontra-se ilustrado na Figura 1.

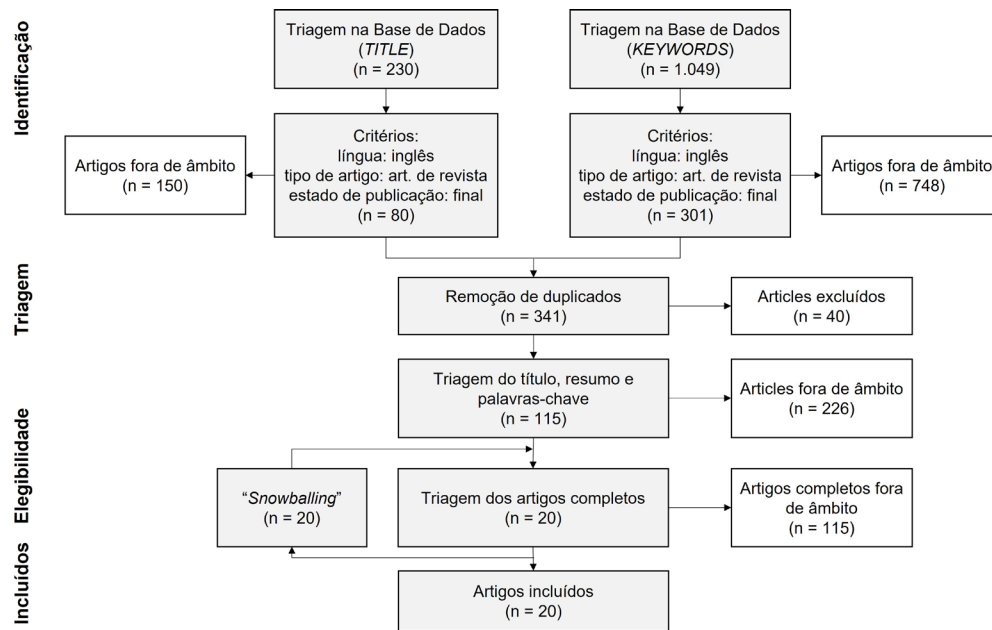


Figura 1
Fluxograma da metodologia PRISMA (adaptado de [46]).

2.3. Critérios de elegibilidade e pesquisa

Foram definidos 3 critérios de elegibilidade para os artigos a incluir na pesquisa: língua de publicação em inglês; artigos só de revista; e artigos em estado final de publicação. Esta opção foi tomada de modo a abranger a maioria das publicações candidatas à revisão e garantir um maior nível de qualidade dos artigos selecionados.

Os dados utilizados para a pesquisa provêm da base de dados "Scopus". A cadeia de palavras-chave utilizada para a pesquisa no motor de busca é a seguinte:

"TITLE/KEY(("digital twin*" OR "as-is BIM" OR "virtual twin" OR "cyber*physical system*" OR "digital representation" OR "virtual representation" OR "digital counterpart" OR "digital replica") AND ("rail*" OR "road*" OR "transport*" OR "asset management" OR "infrastructure" OR "track" OR "drainage" OR "culvert" OR "platform" OR "bridge" OR "tunnel" OR "overpass" OR "underpass" OR "retaining wall" OR "level crossing" OR "superstructure" OR "switches and crossings" OR "turnout" OR "access way" OR "signalling" OR "telecommunication" OR "electrical plant" OR "electric power" OR "*station" OR "catenary" OR "pavement" OR "highway" OR "traffic sign" OR "lighting" OR "toll" OR "building" OR "embankment" OR "escape ramp" OR "runaway*ramp" OR "automatic train protection") AND NOT ("manufactur*")) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE,"j")) AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE,"final")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE,"ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE,"English"))".

Além do termo "digital twin", foram também adicionadas outras palavras-chave que frequentemente aparecem em substituição do DT, tal como identificado por alguns autores [19,25,47–50]. Relativamente ao âmbito, os autores decidiram focar-se nos ativos físicos, construídos, duráveis e imóveis [51] relacionados com as redes ferroviária e rodoviária. Além disso, optou-se por excluir a palavra-chave "manufact*" pelo

facto de o setor industrial dominar a literatura sobre o DT. As limitações inseridas (ver “LIMIT-TO”) traduzem os critérios de elegibilidade enunciados. A pesquisa pelo título e pelas palavras-chave gerou uma lista de 341 artigos, que exclui os artigos em duplicado (ver Figura 1).

2.4. Seleção dos estudos

Numa segunda fase de seleção, analisou-se o título, resumo e palavras-chave dos 341 artigos recolhidos da pesquisa, tendo sido excluídos os artigos fora do âmbito da ferrovia e rodovia, centrados na indústria ou sem resumo disponível. Foram rejeitados 226 artigos, principalmente por se encontrarem fora do âmbito definido e por se focarem no setor industrial. Os artigos dentro do âmbito foram classificados em função das infraestruturas abrangidas (Figura 2).

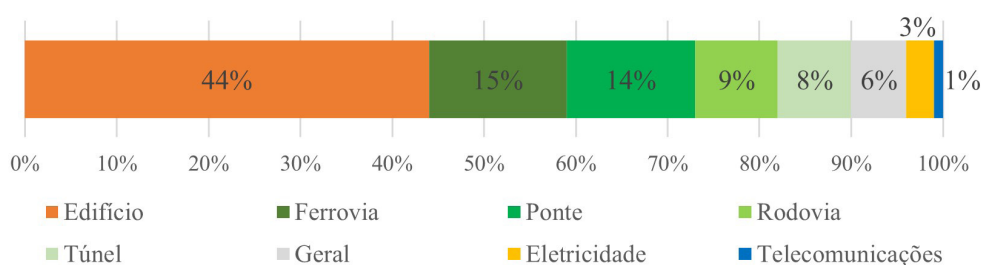


Figura 2
Artigos dentro do âmbito por tipo de infraestrutura.

Os resultados indicam que cerca 44% dos artigos classificados como dentro do âmbito se enquadram no setor dos edifícios, revelando que estas infraestruturas (residenciais, escolares, de escritórios, de comércio, etc.) dominam os estudos sobre o DT dentro do âmbito de pesquisa. Esta conclusão é validada por outras publicações, que indicam que o setor dos edifícios tem recebido atenção especial quando comparado com outras infraestruturas [10,24,39,45]. Apesar de os edifícios fazerem parte do portefólio de infraestruturas do setor ferroviário e rodoviário, os autores optaram por excluí-los da fase seguinte de revisão, por forma a focar-se nas restantes infraestruturas, que estão mais próximas do foco das redes ferroviária e rodoviária e para as quais menos atenção tem sido dada pela literatura científica.

Numa fase seguinte, os 115 artigos foram lidos na totalidade. Neste processo foram eliminados os artigos sem o respetivo documento disponível e os artigos centrados em abordagens fora do DT, ainda que os seus autores as descrevessem como tal. Este último tipo de artigos (com foco no BIM, extração de nuvens de pontos ou modelos de elementos finitos) teve uma representação significativa ao longo da revisão, o que não satisfaz a definição mais consensual do DT e valida as conclusões de outros estudos [15,19,22]. Foi ainda incluída uma fase de “snowballing”, dedicada à revisão de artigos de revista relevantes e referenciados pelos anteriores.

A lista final é formada por 20 artigos dentro do âmbito do estudo.

3. Resultados

3.1. Publicações por ano e nacionalidade

A análise dos 20 artigos selecionados indica que 95% dos artigos foram publicados nos últimos 4 anos e que o número de publicações anuais tem crescido continuamente, a pelo menos 100% ao ano (Figura 3a). Esta observação corrobora a ideia do DT enquanto uma tendência e com crescente interesse por parte da academia. Os resultados também mostram que não existe uma revista que domine o número de estudos sobre o DT em redes ferroviárias e rodoviárias.

Os artigos têm autoria de 17 diferentes nacionalidades, como mostra a Figura 3b. O número total de artigos por nacionalidade é de 27, uma vez que alguns artigos resultaram da colaboração entre autores de diferentes nacionalidades. Os resultados indicam que, embora os Estados Unidos da América seja a nação mais representada (com 4 dos 27 resultados), não existe um país predominante em termos do número de publicações sobre o DT neste âmbito.

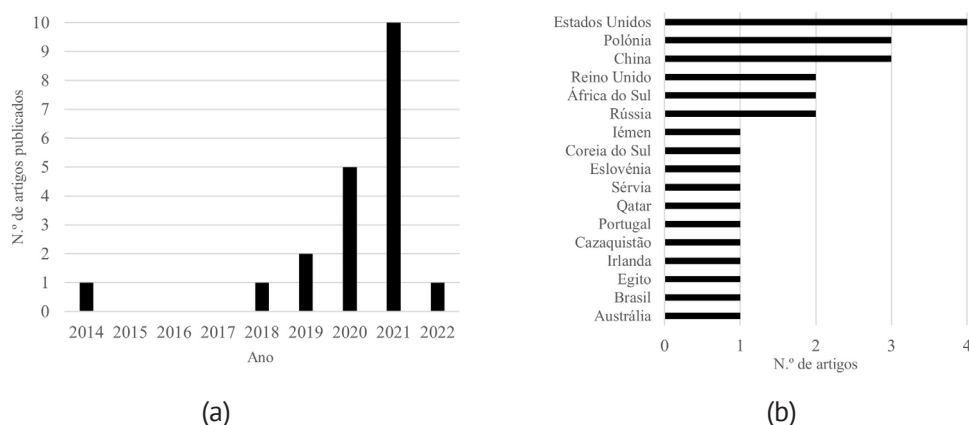


Figura 3
Número de artigos publicados por ano (a) e por nacionalidade (b).

3.2. Áreas temáticas

A Figura 4 apresenta a distribuição dos artigos pelas áreas temáticas sugeridas pelo motor de busca "Scopus". Mais uma vez, cada artigo pode abranger mais do que uma área temática, o que justifica que o número de resultados (45) seja superior ao número de artigos (20). O gráfico mostra que 46% dos resultados se relaciona com as áreas da Engenharia e das Ciências Computacionais, enquanto os restantes 54% se dispersam pelas restantes 12 áreas temáticas.

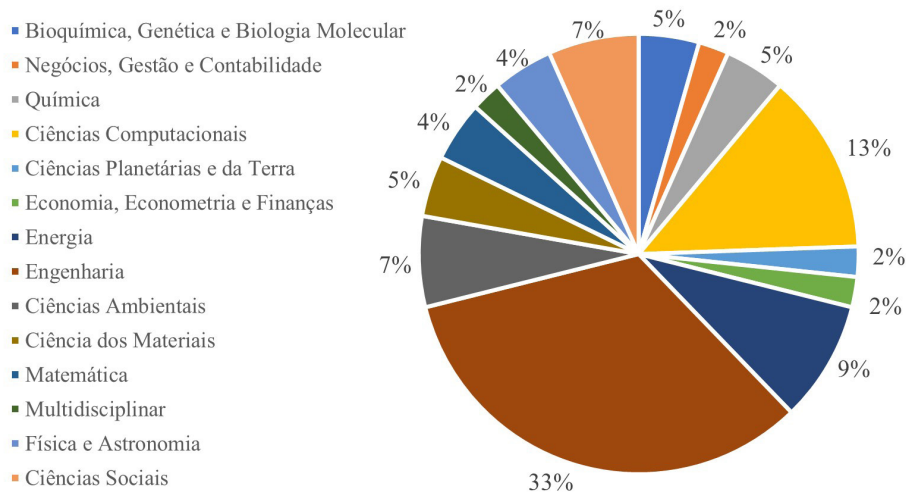


Figura 4
Resultados por área temática.

3.3. Tipos de artigo e redes de infraestruturas

A Figura 5 apresenta os tipos de artigo e redes de infraestruturas abrangidos pelos 20 artigos selecionados. 55% dos artigos consistem em aplicações práticas do DT (11) e 25% dos artigos são de carácter exploratório (4) ou são revisões da literatura (1). Como esperado, a maioria dos resultados (68%) concentra-se especificamente nas redes ferroviária e rodoviária (15). Estas duas redes encontram-se representadas por quase o mesmo número de resultados (7 e 8, respetivamente), o que exclui a predominância de uma rede neste âmbito de pesquisa. 28% dos resultados (4) relacionam-se com os setores da energia e das telecomunicações, o que é justificado pela variedade de disciplinas e setores de atividade envolvidos na gestão de infraestruturas ferroviárias e rodoviárias, como introduzido no capítulo 1. É importante também salientar que 14% dos resultados (3) não possuem um setor ou rede especificamente atribuídos. Estes artigos possuem normalmente um carácter genérico e exploratório sobre o DT ou mencionam muito brevemente as redes ferroviárias e rodoviárias.

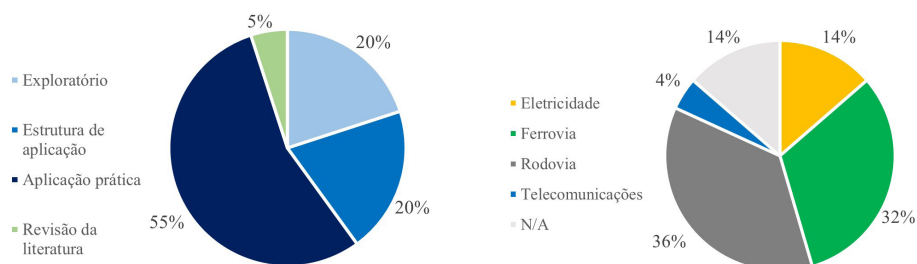


Figura 5
Resultados por tipo de artigo (a) e rede (b).

(a)

(b)

3.4. Atividades do ciclo de vida da gestão de ativos

De acordo com [52], existem 11 temas que constituem as atividades do ciclo de vida da gestão de ativos, incluídos na denominada *Asset Management Landscape*. A Figura 6 apresenta o número de resultados a partir dos 15 artigos classificados como “Estrutura de Aplicação” ou “Aplicação Prática”, por cada uma das 11 atividades do ciclo de vida.

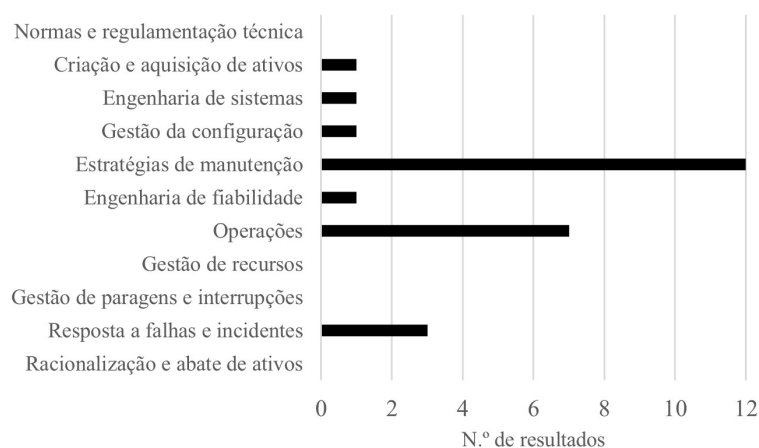


Figura 6
Resultados por atividades do ciclo de vida da gestão de ativos.

Os resultados indicam que existe uma clara predominância das atividades de operação e manutenção nos artigos selecionados. Dos 14 artigos elegíveis, existem 19 referências a impactos nas atividades de manutenção ou de operação (73% do total). Existem também 3 artigos que discutem impactos na resposta a falhas ou incidentes (12%). A primeira e a última fases do ciclo de vida (aquisição e alienação) apresentam poucas referências, o que contrasta fortemente com as fases de operação e manutenção. Esta conclusão corrobora os resultados apresentados por outros autores [12,15,19,26,53–55] e a ideia de que um DT, pela sua definição, gera valor principalmente durante as fases de operação e manutenção de ativos construídos.

4. Conclusões

Este artigo confirma a escassez de estudos publicados sobre o DT em redes de infraestruturas ferroviárias e rodoviárias, ainda que o seu potencial de aplicação neste setor seja evidente. Dado que as redes ferroviária e rodoviária providenciam um serviço crítico para a sociedade e enfrentam desafios constantes (aumento da procura, défice acumulado de investimento, dispersão territorial, grande variedade de classes de ativos, entre outros), a aplicação do DT poderia ajudar na resposta a alguns destes desafios através do aumento da qualidade e da eficiência da informação e, em última análise, da qualidade das decisões na gestão de ativos.

Os resultados da revisão bibliográfica mostram que a literatura sobre o DT nas redes ferroviária e rodoviária é recente e que tem aumentado nos últimos anos. Mostrou-se

também que a maior parte dos estudos enquadram-se nas áreas da engenharia e das ciências computacionais. Os artigos analisados abrangem diversas nacionalidades de autores e setores de atividade, como a ferrovia, a rodovia, o setor elétrico e as telecomunicações. Concluiu-se ainda que os contributos do DT são mais evidentes durante as fases de operação e manutenção, o que corrobora as conclusões de estudos anteriores sobre este tema.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por: Financiamento Base – UIDB/04708/2020 da Unidade de Investigação CONSTRUCT – Instituto de I&D em Estruturas e Construções – financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC); Infraestruturas de Portugal, S.A. e pelo programa Shift2Rail JU/H2020, financiado pelo contrato n.º 01012456 (IN2TRACK-3).

Referências

- [1] OECD. *Transport Bridging Divides*. OECD Urban Studies, OECD Publishing, Paris, 2020. doi: 10.1787/55ae1fd8-en
- [2] EU. *Statistical Pocketbook 2020 – EU transport in figures*. European Union, 2020. doi: 10.2832/919583
- [3] OECD. *OECD Regional Outlook 2019: Leveraging Megatrends for Cities and Rural Areas*. OECD Publishing, Paris, 2019, doi: 10.1787/9789264312838-en
- [4] C. Shim, S. Dang, S. Lon, C. Jeon, “Development of a bridge maintenance system for prestressed concrete bridges using 3D digital twin model”, *Struct. Infrastruct. Eng.*, Vol. 15(10), pp. 1319-1332, 2019. doi: 10.1080/15732479.2019.1620789
- [5] S. Ye, X. Lai, I. Bartoli, A.E. Aktan, “Technology for condition and performance evaluation of highway bridges”, *J. Civ. Struct. Health Monit.*, Vol. 10, pp. 573–594, 2020. doi: 10.1007/s13349-020-00403-6
- [6] ARTBA. *Bridge Conditions Report*. American Road & Transportation Builders Association, 2020.
- [7] CIRC. *Monitoring the State of Canada’s Core Public Infrastructure: The Canadian Infrastructure Report Card*, 2019.
- [8] S. Kaewunruen, J. Sresakoolchai, W. Ma, O. Phil-Ebosie, “Digital Twin Aided Vulnerability Assessment and Risk-Based Maintenance Planning of Bridge Infrastructures Exposed to Extreme Conditions”, *Sustainability*, Vol. 13(4), 2051, 2021. doi: 10.3390/su13042051
- [9] ISO 55000, “ISO 55000:2014 - Asset management – Overview, principles and terminology”, International Organization for Standardization (ISO), 2014.

- [10] Costin, A.; Adibfar, A.; Hu, H.; Chen, S. Building Information Modeling (BIM) for transportation infrastructure – Literature review, applications, challenges, and recommendations. *Autom. Constr.* 2018, Vol. 94, pp. 257-281. doi: 10.1016/j.autcon.2018.07.001
- [11] A. Saad, S. Faddel, O. Mohammed, “IoT-Based Digital Twin for Energy Cyber-Physical Systems: Design and Implementation”, *Energies*, Vol. 13(18), 4762, 2020. doi: 10.3390/en13184762
- [12] D. Jones, C. Snider, A. Nassehi, J. Yon, B. Hicks, “Characterising the Digital Twin: A systematic literature review”, *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, Vol. 29, Part A, pp. 36-52, 2020. doi: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002
- [13] F. Tao, H. Zhang, A. Liu, A.Y.C. Nee, “Digital Twin in Industry: State-of-the-Art”, *IEEE Trans. Industr. Inform.*, Vol. 15(4), pp. 2405-2415, 2019. doi: 10.1109/TII.2018.2873186
- [14] K.Y.H.bLim, P. Zheng, C.-H. Chen, “A state-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives”, *J. Intell. Manuf.*, Vol. 31, pp. 1313-1337, 2020. doi: 10.1007/s10845-019-01512-w
- [15] M. Callcut, J.-P. Cerceau Agliozzo, L. Varga, L. McMillan, “Digital Twins in Civil Infrastructure Systems”, *Sustainability*, Vol. 13(20), 11549, 2021. doi: 10.3390/su132011549
- [16] J.C. Camposano, K. Smolander, T. Ruippo, “Seven Metaphors to Understand Digital Twins of Built Assets”, *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 27167-27181, 2021. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3058009
- [17] A.R. Al-Ali, R. Gupta, T. Zaman Batool, T. Landolsi, F. Aloul, A. Al Nabulsi, “Digital Twin Conceptual Model within the Context of Internet of Things”, *Future Internet*, Vol. 12(10), 163, 2020. doi: 10.3390/fi12100163
- [18] Z. Liu, G. Shi, A. Zhang, C. Huang, “Intelligent Tensioning Method for Prestressed Cables Based on Digital Twins and Artificial Intelligence”, *Sensors*, Vol. 20(24), 7006, 2020. doi: 10.3390/s20247006
- [18] K. Lamb, “Principle-based digital twins: a scoping review”, Centre for Digital Built Britain, 2019. doi: 10.17863/CAM.47094
- [20] F. Jiang, Y. Ding, Y. Song, F. Geng, Z. Wang, “An architecture of lifecycle fatigue management of steel bridges driven by Digital Twin”, *Struct. Monit. Maint.*, Vol. 8(2), pp. 187-201, 2021. doi: 10.12989/smm.2021.8.2.187
- [21] D. Broo, J. Schooling, “A Framework for Using Data as an Engineering Tool for Sustainable Cyber-Physical Systems”, *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 22876-22882, 2021. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3055652

- [22] M. Liu, S. Fang, H. Dong, C. Xu, “Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications”, *J. Manuf. Syst.*, Vol. 58, Part B, pp. 346-361, 2021 doi: 10.1016/j.jmsy.2020.06.017
- [23] A. Kochan, “Digital Twin Concept of the ECTS application”, *J. Transp. Eng.*, Vol. 131, pp. 87-98, 2020. doi: 10.5604/01.3001.0014.8199
- [24] L. Chen, X. Xie, Q. Lu, A.K. Parlikad, M. Pitt, J. Yang, “Gemini Principles-Based Digital Twin Maturity Model for Asset Management”, *Sustainability*, Vol. 13(15), 8224, 2021. doi: 10.3390/su13158224
- [25] W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, W. Sihn, “Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification”, *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 51(11), pp. 1016-1022, 2018. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474
- [26] M. Macchi, I. Roda, E. Negri, L. Fumagalli, “Exploring the role of Digital Twin for Asset Lifecycle Management”, *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 51(11), pp. 790-795, 2018. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.415
- [27] E. Negri, L. Fumagalli, M. Macchi, “A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems”, *Procedia Manuf.*, Vol. 11, pp. 939-948, 2017. doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.198
- [28] T. Machl, A. Donaubauer, T.H. Kolbe, “Planning Agricultural Core Road Networks based on a Digital Twin of the Cultivated Landscape”, *J. Digit. Landsc. Archit.*, Vol. 4-2019, pp. 316-327, 2019. doi: 10.14627/537663034
- [29] M. Mohammadi, M. Rashidi, V. Mousavi, A. Karami, Y. Yu, B. Samali, “Quality Evaluation of Digital Twins Generated Based on UAV Photogrammetry and TLS: Bridge Case Study”, *Remote Sens.*, Vol. 13(17), 3499, 2021. doi: 10.3390/rs13173499
- [30] M.V. Shevlyugin, A.A. Korolev, A.O. Korolev, I.A. Aleksandrov, “A Digital Model of a Traction Substation with Two Types of Current”, *Russ. Electr. Eng.*, Vol. 89, pp. 540–545, 2018. doi: 10.3103/S1068371218090134
- [31] M. F. Ariyachandra, I. Brilakis, “Detection of Railway Masts in Air-Borne LiDAR Data”, *J. Constr. Eng. Manag.* Vol. 146(9), 2020. doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001894
- [32] M. Shafto, M. Conroy, R. Doyle, E. Glaessgen, C. Kemp, J. LeMoigne, L. Wang, *Technology Area 11: Modeling, Simulation, Information Technology and Processing Roadmap*. NASA Office of Chief Technologist, Washington, U.S.A., 2010.
- [33] A. Kampczyk, K. Dybeł, “The Fundamental Approach of the Digital Twin Application in Railway Turnouts with Innovative Monitoring of Weather Conditions”, *Sensors*, Vol. 21(17), 5757, 2021. doi: 10.3390/s21175757

- [34] R. Lu, I.K. Brilakis, "Digital twinning of existing reinforced concrete bridges from labelled point clusters", *Autom. Constr.*, Vol. 105, 102837, 2019. doi: 10.1016/J.AUTCON.2019.102837
- [35] C.E.B. López, "Real-time event-based platform for the development of digital twin applications", *J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 116, pp. 835-845, 2021. doi: 10.1007/s00170-021-07490-9
- [36] G. Yu, S. Zhang, M. Hu, Y. Wang, "Prediction of Highway Tunnel Pavement Performance Based on Digital Twin and Multiple Time Series Stacking", *Adv. Civ. Eng.*, pp. 1-21, 2020. doi: 10.1155/2020/8824135
- [37] O.E. Marai, T. Taleb, J. Song, "Roads Infrastructure Digital Twin: A Step Toward Smarter Cities Realization", *IEEE Netw.*, Vol. 35(2), pp. 136-143, 2021. doi: 10.1109/MNET.011.2000398
- [38] R. Sahal, S.H. Alsamhi, K.N. Brown, D. O'Shea, C. McCarthy, M. Guizani, "Blockchain-Empowered Digital Twins Collaboration: Smart Transportation Use Case", *Machines*, Vol. 9(9), 193, 2021. doi: 10.3390/machines9090193
- [39] S. Kaewunruen, S. Peng, O. Phil-Ebosie, "Digital Twin Aided Sustainability and Vulnerability Audit for Subway Stations", *Sustainability*, Vol. 12(9), 7873, 2020. doi: 10.3390/su12197873
- [40] G.B. Ozturk, "Digital Twin Research in the AECO-FM Industry", *J. Build. Eng.*, Vol. 40(11), 102730, 2021. doi: 10.1016/j.jobbe.2021.102730
- [41] B. Sousa, M. Arieiro, V. Pereira, J. Correia, N. Lourenço, T. Cruz, "ELEGANT: Security of Critical Infrastructures With Digital Twins", *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 107574-107588, 2021. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3100708
- [42] J. Heaton, A.K. Parlikad, J.M. Schooling, "Design and development of BIM models to support operations and maintenance", *Comput. Ind.*, Vol. 111, pp. 172-186, 2019. doi: 10.1016/J.COMPIND.2019.08.001
- [43] G. Yu, Y. Wang, Z. Mao, M. Hu, V. Sugumaran, Y.K. Wang, "A digital twin-based decision analysis framework for operation and maintenance of tunnels", *Tunn. Undergr. Space Technol.*, Vol. 116, 104125, 2021. doi: 10.1016/j.tust.2021.104125
- [44] C. Boje, A. Guerriero, S. Kubicki, Y. Rezgui, "Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research", *Autom. Constr.*, Vol. 114, 103179, 2020. doi: 10.1016/j.autcon.2020.103179
- [45] S. Meža, A. Mauko Pranjić, R. Vežočnik, I. Osmokrović, S. Lenart, "Digital Twins and Road Construction Using Secondary Raw Materials", *J. Adv. Transp.*, pp. 1-12, 2021. doi: 10.1155/2021/8833058

- [46] A. Liberati, D. Altman, J. Tetzlaff, C. Mulrow, P. Gøtzsche, J. Ioannidis, M. Clarke, P. Devereaux, J. Kleijnen, D. Moher, “The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate healthcare interventions: Explanation and elaboration”, *BMJ*, 339:b2700, 2009. doi: 10.1136/bmj.b2700
- [47] J. Vatn, *Industry 4.0 and real-time synchronization of operation and maintenance*. In Safety and Reliability – Safe Societies in a Changing World, 1st ed.; Haugen et al. (Eds); Publisher: Taylor & Francis Group, London, pp. 681-686, 2018.
- [48] C. Zhuang, J. Liu, H. Xiong, “Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor”, *J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 96, pp. 1149-1163, 2018. doi: 10.1007/s00170-018-1617-6
- [49] A. Fuller, Z. Fan, C. Day, C. Barlow, “Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research”, *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 108952-108971, 2020. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2998358
- [50] CDBB, *Digital Twin Toolkit - Developing the business case for your digital twin*. Centre for Digital Built Britain, 2021.
- [51] J. Dieter, “Asset Management: Impact and Opportunity”, XXI Congreso Internacional de Mantenimiento y Gestión de Activos – CIMGA 2019. Bogotá, 5th of April, 2019.
- [52] GFMAM, *The Asset Management Landscape*. 2nd ed.. Publisher: The Global Forum on Maintenance and Asset Management, 2014. ISBN 978-0-9871799-2-0
- [53] J. Kim, S.-A. Kim, “Lifespan Prediction Technique for Digital Twin-Based Noise Barrier Tunnels”, *Sustainability*, Vol. 12(7), 2940, 2020. doi: 10.3390/su12072940
- [54] J. Vieira, J. Clara, H. Patrício, N. Almeida, J.P. Martins, “Digital twins in asset management: potential application use cases in rail and road infrastructures”, Springer, Proceedings of the 15th World Congress on Engineering Asset Management (in press).
- [55] Q. Lu, A. K. Parlikad, P. Woodall, X. Xie, Z. Liang, E. Konstantinou, J. Heaton, J. Schooling, “Developing a dynamic digital twin at building and city levels: A case study of the West Cambridge campus”, *J. Manag. Eng.*, Vol. 36(3), 2019. doi: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000763