

GÊMEOS DIGITAIS DE PONTES: TENDÊNCIAS, FUNCIONALIDADES E DESAFIOS

Paola Gorkos¹, Paula Manica Lazzari², Luiz Carlos Pinto da Silva Filho³

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil / Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) / gorkosp@gmail.com

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC-UFRGS) / paula.manica@ufrgs.br

³ Universidade Federal do Rio Grande do Sul / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil / Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) / lcarlos66@gmail.com

Resumo

Este artigo explora o estado-da-arte da aplicação de Gêmeos Digitais (*Digital Twins* - DTs) em pontes, destacando as principais tendências de uso, funcionalidades necessárias para atingir a maturidade da tecnologia e os desafios associados à sua implementação. Por meio de uma revisão bibliográfica sistemática, o estudo elencou 12 aplicações que se configuram como principais tendências, que vão desde a modelagem 3D até detecção automatizada de danos, que prometem melhorar a gestão e operação de pontes ao longo de todo o ciclo de vida. Além disso, foram identificadas 12 funcionalidades essenciais que os DT devem possuir para atingir um alto nível de maturidade, permitindo ampla gama de aplicações. No entanto, o artigo também evidencia alguns desafios associados à implementação plena de DT de pontes, como os altos custos de implementação, a complexidade dos modelos numéricos e a necessidade de interoperabilidade entre sistemas. Outro ponto crítico é a necessidade de uma abordagem multidisciplinar e uma mudança cultural nas organizações para a adoção de DTs. O estudo conclui que, apesar dos desafios, os Gêmeos Digitais têm o potencial de revolucionar a gestão de pontes, desde que sejam aplicados de maneira estratégica. A pesquisa futura deve focar em superar esses desafios e promover soluções que facilitem a implementação em larga escala, contribuindo para a sustentabilidade e resiliência dessas infraestruturas.

Palavras-chave

Gêmeos Digitais; Pontes; Inovação; *Structural Health Monitoring*; *Bridge Information Modeling*.

1. Introdução

O mundo tem experimentado um foco crescente em inovação, desenvolvimento e aprimoramento dos processos nas mais diversas áreas, com a expectativa de que modelos e soluções mais ágeis sejam adotados para o desenvolvimento de funcionalidades e novas formas de oportunidades de gestão e operação. Além disso, a colaboração mais próxima entre empresas, universidades e instituições de pesquisa tem sido incentivada. Essa abordagem colaborativa visa o desenvolvimento de parcerias inovadoras e a incorporação de soluções tecnológicas para as mais diversas aplicações.

Dentre as inovações e tecnologias emergentes, os Gêmeos Digitais (*Digital Twins* – DT) têm se destacado, figurando entre as dez principais tecnologias que viabilizam a transformação digital, superando dificuldades de gestão e trazendo significativas melhorias de processos. Sua implementação é estudada em setores como robótica, manufatura, energia, mineração, agricultura e logística, abrangendo tanto os transportes terrestres, como ferroviários e aéreos (JASIŃSKI; ŁAZIŃSKI; PIOTROWSKI, 2023).

Nesse contexto, verifica-se que essa tecnologia tem o potencial de revolucionar a operação e a manutenção e podem auxiliar substancialmente no gerenciamento, inspeção e avaliação do comportamento de pontes e viadutos. Além disso, como menciona Nhamage (2023), a avaliação do comportamento estrutural usando ou auxiliada por DT tem sido foco de pesquisas atuais e é uma tendência em rápido crescimento, que está obviamente associada à era da Indústria 4.0 (digitalização).

A aplicação de DT na infraestrutura de transporte proporciona um sistema integrado que permite o monitoramento em tempo real de vários fluxos de dados, facilitando a tomada de decisões sobre o gerenciamento de tráfego e a manutenção das estruturas. Isso resulta em uma melhor coordenação e eficiência no gerenciamento de ativos, ao mesmo tempo em que possibilita uma resposta mais rápida a eventuais problemas, garantindo a segurança e a funcionalidade das pontes e obras de infraestrutura (COSTIN; ADIBFAR; BRIDGE, 2024). O Monitoramento da Integridade Estrutural (*Structural Health Monitoring* - SHM) também se beneficia amplamente da tecnologia de DT, pois permite acompanhar o status operacional em tempo real. Sensores instalados nas estruturas e conectados a modelos numéricos geram dados que são utilizados para avaliar condições e emitir alertas sobre possíveis falhas, proporcionando maior segurança (QIN; REN; GUO, 2023).

Por meio da integração de tecnologias de ponta como *Big Data*, Internet das Coisas, Sistemas Ciber-Físicos, Inteligência Artificial (IA), Aprendizado de Máquina (*Machine Learning* - ML) Computação em Nuvem, BIM/BrIM (*Bridge Information Modeling*), *Drones* e *Laser Scanning*, os engenheiros têm a capacidade de construir réplicas digitais abrangentes de pontes, que não apenas podem fornecer observações em tempo real, análises preditivas e capacidades aprimoradas de tomada de decisão, mas também capacitar os gerentes de pontes com uma compreensão mais profunda de seu comportamento, desempenho e resiliência diante de condições ambientais dinâmicas e demandas operacionais (MOUSAVI *et al.*, 2024).

Diante desse contexto apresentado, este artigo tem como objetivo a compreensão do estado-da-arte da aplicação de DT em pontes, com foco nas aplicações que se configuram como tendências na literatura; funcionalidades necessárias para atingir a maturidade do tema e; os desafios associados à implementação e utilização dessa tecnologia voltada para o gerenciamento de pontes. Para atingir esses objetivos, o presente estudo conduziu uma revisão bibliográfica sistemática e formulou questões de pesquisa. A metodologia utilizada é detalhada no Capítulo 2. Os resultados da revisão, incluindo o *background*, que expõe outras revisões sobre o tema, e as respostas sobre as questões de pesquisa elaboradas, estão apresentados no Capítulo 3. Por fim, o Capítulo 4 apresenta as conclusões e considerações finais.

2. Metodologia

A revisão sistemática de literatura foi conduzida nas bases de dados *ScienceDirect*, *Scopus*, *Web of Science*, *IEEE Xplore*, *Taylor e Francis*, *Sage Journals* e *Google Scholar*. As palavras-chave definidas como critérios de busca, destinados apenas aos títulos dos artigos, foram atribuídas com a seguinte lógica: (“*Digital Twin*” OR “*Digital Twins*”) AND (“*Bridge*” OR “*Bridges*”). A busca foi voltada para publicações em inglês e foram selecionados apenas artigos publicados em jornais e revistas revisadas por pares. Um total de 164 artigos foram identificados com esses critérios. Destes, foram identificados 91 artigos duplicados. Esse resultado reflete a grande quantidade de bases consultadas, que em muitos casos se sobrepõem.

A etapa seguinte envolveu a exclusão de alguns artigos: artigos que o título abordava expressões como “*bridge the gap*” ou “*bridge between*” ou artigos que referiam “*bridge*” como meio de interlocução, comunicação ou interoperabilidade para sistemas de gêmeos digitais de outras áreas de aplicação. Além disso, foi excluído um artigo que tratava da etapa pré-constructiva de elemento pré-fabricados de pontes. Assim, a base de literatura dessa pesquisa foi de 49 artigos, que foram analisados em sua completude.

Para alcançar os objetivos pretendidos nesse estudo, algumas perguntas nortearam a análise dos artigos. São elas: Q1: *Quais são as principais aplicações e tendências dos gêmeos digitais em pontes?* Q2: *Quais são as principais funcionalidades que essa tecnologia deve ter para atingir maturidade da aplicação em pontes?* Q3: *Quais são os principais desafios associados à implantação de DT em pontes?*

3. Resultados da Revisão

Neste capítulo são apresentados os resultados da revisão sistemática conduzida, que respondem as perguntas mencionadas acima. Além disso, apresenta-se o *background*, que aborda outros artigos de revisão bibliográfica publicados sobre o tema.

3.1. Background

Dentre os artigos analisados, foram encontrados 6 trabalhos de revisão de literatura a respeito de gêmeos digitais de pontes. Esses estudos mostram a crescente importância dos gêmeos digitais no gerenciamento e manutenção de pontes, com ênfase em seu potencial para melhorar a eficiência operacional e preditiva. A revisão de Saback *et al.* (2022) destaca que muitos modelos digitais não têm sido categorizados pela literatura como DT, e que poucos estudos de gêmeos digitais de pontes abrangem todo o ciclo de vida. Já Jiménez Rios *et al.* (2023) ampliam essa discussão e afirmam que a implantação de gêmeos digitais em pontes ainda é incompleta na prática real e que as tecnologias apresentam diversos desafios à implantação, mas elas têm grande potencial para se tornar uma força extremamente positiva de mudança na indústria de arquitetura, engenharia e construção.

Estudos como os de Costin, Adibfar e Bridge (2024) e Hosamo e Hosamo (2022) demonstram o potencial dos DT para integração, análise e tomada de decisão otimizada em relação à manutenção. Por fim, pesquisas mais recentes, como as de Mousavi *et al.* (2024) e Yang *et al.* (2024) sublinham a necessidade de avançar na inclusão de sistemas de suporte à decisão e IA nas implementações de DTs, ampliando o foco além da fase de operação e manutenção para abranger todo o ciclo de vida das pontes.

As contribuições desses estudos sugerem que a transformação digital na engenharia de pontes ainda enfrenta barreiras significativas, mas possui um enorme potencial de otimização quando bem implementada.

3.2. Aplicações e tendências (Q1)

Além dos 6 artigos que tratam de revisões de literatura, outros 43 artigos discorrem sobre estudos de caso realizados em pontes reais ou em protótipos de grande escala. A análise desses artigos permitiu a sua classificação em alguns temas centrais, identificados nesse trabalho como *tendências*. Essas aplicações demonstram quais são as áreas emergentes nos estudos, e são apresentadas na Tabela 1. É importante ressaltar que muitos dos estudos não se enquadram apenas em uma categoria/tendência, pois muitas vezes focam em situações aplicadas, que podem ser entendidas como uma associação de tendências.

A maioria dos estudos se concentra na (1) *Deteção de Danos Estruturais* e no (2) *Monitoramento da Integridade Estrutural (SHM)*, tornando-os mais automáticos e precisos, por meio de tecnologias como aprendizado de máquina, IA, Redes Neurais e Modelos Bayesianos, utilizando dados de sensores instalados nas pontes. Os resultados reportados pelos trabalhos demonstram o grande potencial de melhorar drasticamente a manutenção de pontes, prolongando a vida útil das estruturas e reduzindo os custos com intervenções e reparos. Como exemplo, cita-se a publicação de Armijo e Zamora-Sánchez (2024), que desenvolveram uma solução de baixo custo para monitoramento de pontes ferroviárias para detectar anomalias estruturais em tempo real. A abordagem híbrida de computação de ponta em nuvem permitiu a detecção de danos com 99,9% de precisão. Outro trabalho, desenvolvido por Teng *et al.* (2023) explora o uso de DT para gerar numericamente amostras de danos estruturais, permitindo que redes neurais convolucionais sejam treinadas para identificar danos em pontes reais com uma precisão de até 97,3%. Outra tecnologia foi apontada por Zhu *et al.* (2024) que propõem um método de diagnóstico automático para deformações, utilizando laser. O método alcançou uma precisão milimétrica, aumentando a eficiência do processo de diagnóstico em 90%.

Tabela 1 – Tendências de aplicação e os respectivos estudos.

Aplicação	Estudos
(1) Detecção de Danos Estruturais	Al-Hijazeen <i>et al.</i> (2023), Armijo e Zamora-Sánchez (2024), Ghahari <i>et al.</i> (2022), Hielscher <i>et al.</i> (2023), Huang <i>et al.</i> (2024), Kang, Chung e Hong (2021), Teng <i>et al.</i> (2023), Titscher <i>et al.</i> (2023) e Zhu <i>et al.</i> (2024).
(2) SHM	Hagen e Andersen (2024), Lai <i>et al.</i> (2024) e Qin, Ren e Guo (2023).
(3) BMS	Mohammadi <i>et al.</i> (2023) e Tita <i>et al.</i> (2023).
(4) Manutenção	Gao <i>et al.</i> (2023), Jeon <i>et al.</i> (2024), Kaewunruen <i>et al.</i> (2021), Nicoletti <i>et al.</i> (2023) e Shim <i>et al.</i> (2019).
(5) Ciclo de Vida	Guo e Fang (2024), Honghong <i>et al.</i> (2023) e Kaewunruen <i>et al.</i> (2023).
(6) Sísmica	Lin <i>et al.</i> (2021; 2023), Rojas-Mercedes, Erazo e Di Sarno (2022) e Yoon <i>et al.</i> (2022).
(7) Vento	Li <i>et al.</i> (2024) e Zhang <i>et al.</i> (2024).
(8) Tráfego e Carregamento	Chacón <i>et al.</i> (2024), Dan, Ying e Ge (2022), Jasiński, Laziński e Piotrowski (2023) e Zhao <i>et al.</i> (2022).
(9) Fadiga	Jiang <i>et al.</i> (2021a, 2021b, 2023), Nhamage (2023), Nhamage <i>et al.</i> (2023) e Yu, Li e Ou (2022).
(10) Nuvem de pontos e modelagem 3D	Hu <i>et al.</i> (2023a; 2023b), Lu e Brilakis (2019; 2020) e Mafipour, Vilgertshofer e Borrmann (2023) e Mohammadi <i>et al.</i> (2021).

O estudo de Lai *et al.* (2024) propõe um método de SHM de pontes baseado em DT e ensaios não destrutivos, utilizando modelagem 3D, elementos finitos e algoritmos de IA. Aplicado à ponte suspensa Huai River Highway Bridge (China), o método permite monitoramento em tempo real, de modo que alguns sensores físicos são instalados na estrutura, e outros “sensores virtuais” são criados para monitorar pontos de interesse, a partir da resposta estrutural da ponte como um todo.

Outro exemplo que merece destaque foi o reportado por Hagen e Andersen (2024), que demonstram a aplicação de DT no monitoramento da ponte Stava, em uma importante rodovia na Noruega, na qual ocorreu um dano/incidente em uma peça estrutural, que foi detectada pelos sensores e pelo sistema de monitoramento. A abordagem proativa foi crucial para evitar danos maiores, potencialmente catastróficos. A Figura 1 mostra o sinal dos acelerômetros antes e durante o incidente e a Figura 2, o modelo de elementos finitos utilizado para descrever o comportamento da ponte após o incidente, que danificou uma das peças estruturais da ponte.

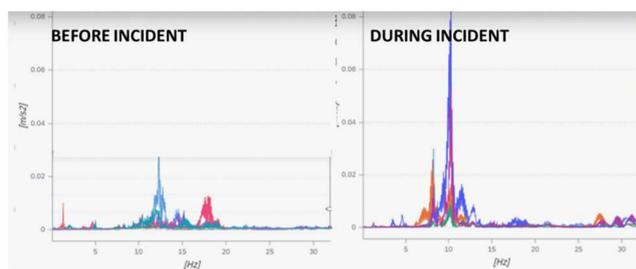


Figura 1 - Sinal dos sensores antes e durante o incidente (Hagen e Andersen, 2024).

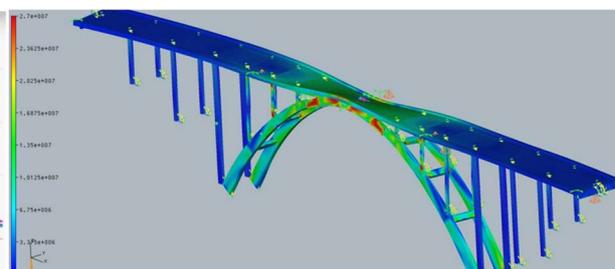


Figura 2 - Modelo do comportamento da ponte após o incidente (Hagen e Andersen, 2024)

A associação de DT a (3) *Sistemas de Gerenciamento de Pontes (Bridge Management Systems - BMS)* tem mostrado grande potencial para otimizar a gestão, monitoramento, operação e manutenção de pontes. Essa tendência é marcada por estudos que visam facilitar a tomada de decisão, englobando uma série de atividades-chave associadas, como modelos 3D iterativos, BrIM, informações de inspeções, monitoramento, operação, tráfego e manutenção, facilitando assim o gerenciamento de ativos. Um exemplo dessa aplicação é o apresentado por Mohammadi *et al.* (2023), cuja modelagem do DT foi feita a partir de nuvem de pontos de *Laser Scanning*, e está apresentada na Figura 3.

Estudos focados na (4) *Manutenção* mostram que esse tópico apresenta uma aplicação promissora, permitindo avaliar as condições estruturais, a eficiência das decisões de manutenção, a vulnerabilidade das pontes, dentre outros. Esses estudos introduzem alguns conceitos de manutenção, como a preditiva, prescritiva, baseada em condições e baseada em risco, que podem ser plenamente satisfeitas com o uso de DT. Esses tipos de manutenção se contrapõem às manutenções tradicionais, que costumam ser efetuadas apenas baseadas em critérios de tempo, ou seja, manutenções periódicas. A Figura 4 mostra o conceito de um DT voltado para manutenção, proposto por Shim *et al.* (2019). Diversos autores concordam sobre a necessidade de os DT abrangerem todo o (5) *Ciclo de Vida* das pontes, e apontam que essa avaliação e o gerenciamento holístico são características que diferenciam os gêmeos digitais do BIM. De fato, muitos autores entendem que os DT são uma evolução natural do BIM, pois integram modelos, avaliações, simulações e uma série de dados relacionados ao ambiente e ao entorno, como o tráfego, sensores, sistemas inteligentes e BMS. Ainda pode ser citado que os dados dos sensores têm o potencial de atualizar as informações e *status* das pontes, de forma a refletir com mais precisão as condições atuais e as tendências futuras relacionadas ao comportamento dessas obras em todo o ciclo de vida. Outras características relacionadas ao ciclo de vida também aparecem de forma relacionada, como o estudo de Kaewunruen *et al.* (2023), que abordou a sustentabilidade, resiliência, avaliação do ciclo de vida e a análise de emissão de gases do efeito estufa.

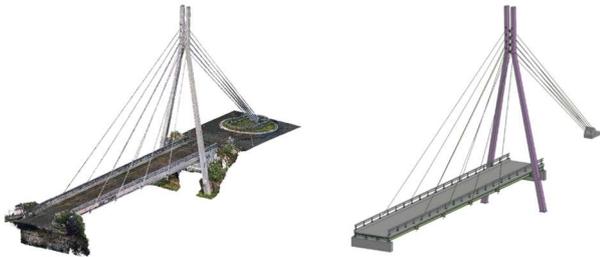


Figura 3 - Construção do modelo 3D de Mohammadi *et al.* (2023) a partir de nuvem de pontos de *Laser Scanning*.

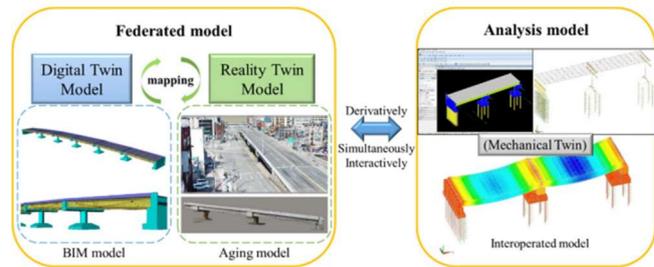


Figura 4 - Conceito de um DT voltado para manutenção de pontes, conforme Shim *et al.* (2019)

A análise de condições relacionadas à (6) *Sísmica* também é uma aplicação emergente de DT em pontes identificada pela literatura. Exemplos dessa aplicação foram os estudados por Lin *et al.* (2021; 2023), propondo um método de avaliação de fragilidade sísmica para pontes estaiadas de longo vão, utilizando gêmeos digitais e modelos de elementos finitos lineares e não lineares para prever mecanismos de colapso durante terremotos, oferecendo uma visão da acumulação de danos ao longo do tempo.

Outros estudos recentes exploram o uso de gêmeos digitais para simular, prever e analisar o efeito de (7) *Vento* e vibrações induzidas por vórtice em pontes de longo vão. Para essas análises, autores como Li *et al.* (2024) integraram simulações em túnel de vento, dados de monitoramento, análise de elementos finitos, melhorando a avaliação da ação do vento nas estruturas, principalmente de pontes estaiadas.

Na literatura foram encontrados alguns trabalhos focados na análise de (8) *Tráfego e Carregamento*, que além de auxiliar no gerenciamento das infraestruturas, também são valiosos para a calibração de gêmeos digitais de pontes existentes. Um exemplo interessante é o estudo de Zhao *et al.* (2022), que propuseram um método para desenvolver DT de pontes rodoviárias diretamente a partir de medições em campo sob carregamento de tráfego aleatório. Outro estudo, realizado por Jasiński, Laziński e Piotrowski (2023) destacaram a importância dos testes de carga na criação de gêmeos digitais, validando e melhorando a precisão de modelos estruturais.

A simulação de condições e previsão de vida útil de (9) *Fadiga* também aparecem como uma aplicação e tendência. Diversos estudos têm abordado o uso de gêmeos digitais no gerenciamento da fadiga em pontes de aço ou mistas, propondo diferentes modelos e *frameworks*.

Outra área de aplicação emergente consiste na automatização do processo de captura de (10) *Nuvem de Pontos e Modelagem 3D*, diminuindo a intervenção humana e tornando a implementação de gêmeos digitais mais rápida e eficiente. Mohammadi *et al.* (2021) desenvolveram uma metodologia para avaliar e comparar a qualidade das nuvens de pontos geradas por fotogrametria e *Laser Scanning*. Essa pesquisa mostrou que a tecnologia de *laser* oferece maior densidade e precisão dos pontos. No entanto, os autores ainda destacam que a fotogrametria com uso de *drones* é uma alternativa mais acessível e rápida, especialmente para áreas de difícil acesso, embora apresente nuvens de pontos de menor qualidade. Outros estudos mais recentes focam na geração automática de modelos 3D paramétricos de pontes, ajustando as nuvens de pontos a sólidos com formas conhecidas como retângulos, cubóides e cilindros. Os estudos de Lu e Brilakis (2019; 2020), como exemplo, apresentam um método para automatizar a criação de modelos geométricos de tabuleiros de pontes, a partir de nuvem de pontos, reduzindo o tempo de modelagem em 95% quando comparado a métodos manuais.

3.3. Funcionalidades de DTs em pontes (Q2)

Com base na revisão de literatura realizada, este estudo propõe 12 tópicos que representam as funcionalidades dos gêmeos digitais para pontes, que caracterizam a sua implementação plena e madura (Fig. 5). A formulação desses tópicos foi inspirada nos artigos de Dan, Ying e Ge (2022), Gao *et al.* (2023), Honghong *et al.* (2023), Jiménez Rios, Plevris e Nogal (2023) e Mousavi *et al.* (2024).



Figura 5 – Funcionalidades dos DT para plena implementação em pontes.

A (1) *Representação Virtual e a Visualização* de DT de pontes são feitas por meio de *softwares* e tecnologias como BrIM e/ou Elementos Finitos, permitindo análises detalhadas e simulações precisas do desempenho da estrutura. A (2) *Integração* desses modelos em um Ambiente Comum de Dados facilita a avaliação completa da condição da ponte, promovendo a colaboração entre as partes interessadas. Isso permite o (3) *Compartilhamento* eficaz de informações e a cooperação e coordenação entre os envolvidos em decisões de gerenciamento. Além disso, o DT proporciona a (4) *Simulação e Previsão* de diferentes cenários, treinando algoritmos para detectar danos e prever a vida útil das pontes.

A (5) *Tomada de Decisão* se torna mais eficiente e sustentável com o uso de dados atuais e preditivos, permitindo recomendações precisas para estratégias de manutenção. O DT deve acompanhar todas as fases do (6) *Ciclo de Vida* da ponte, garantindo o armazenamento e a análise das informações relevantes para otimizar sua gestão e longevidade. A (7) *Conectividade e Sincronização* bidirecional

entre a ponte real e sua réplica virtual garantem atualizações em (8) *Tempo real* (ou quase real), permitindo ajustes contínuos no modelo digital. O *feedback* entre a réplica e a ponte física facilita uma tomada de decisão rápida e precisa.

A (9) *Computação em Nuvem* proporciona escalabilidade e flexibilidade no gerenciamento de dados do DT, enquanto a (10) *Integração de Sensores* monitora condições ambientais e a resposta da estrutura, ajustando o modelo virtual conforme necessário. O DT passa por (11) *Atualização* continuamente com os dados de sensores, sendo refinado para refletir o estado atual da ponte e melhorar a precisão das previsões. Esse sistema de autoevolução assegura que o modelo virtual esteja sempre sincronizado com a realidade, facilitando respostas rápidas a mudanças estruturais.

Por fim, um DT maduro incorpora um sistema de (12) *Alerta e Monitoramento* baseado em comparações entre as respostas medidas e calculadas, ajudando a detectar danos antecipadamente e minimizar riscos. Isso permite uma resposta rápida em casos de emergências, promovendo a segurança da estrutura e dos usuários.

3.4. Desafios associados (Q3)

A partir da literatura analisada, os autores identificaram 10 tipos de desafios que são associados à implementação plena de gêmeos digitais e, portanto, se caracterizam como lacunas ou limitações tecnológicas, que podem ser utilizadas como referências para o direcionamento de pesquisas futuras sobre o tema. Esses tópicos foram escritos com base nos trabalhos de Chacón *et al.* (2024), Costin, Adibfar e Bridge (2024), Gao *et al.* (2023), Jeon *et al.* (2024), Kang *et al.* (2021), Lu e Brilakis (2019), Mousavi *et al.* (2024), Nhamage (2023), Titscher *et al.* (2023) e Yang, Zhu e Cai (2024). São eles:

1) *Esforços, custos e complexidade*: Embora os DT possam otimizar o gerenciamento de infraestrutura, seu uso em larga escala ainda é inviável devido aos altos custos. Além disso, a modelagem 3D requer ajustes manuais complexos para refletir com precisão as geometrias das pontes.

2) *Modelos numéricos e incertezas*: Os DTs requerem ajustes contínuos para se alinhar à realidade, já que as suposições iniciais podem simplificar excessivamente a simulação do comportamento das pontes. O Método dos Elementos Finitos, por exemplo, depende de dados reais, e incertezas na coleta precisam ser propagadas para garantir decisões precisas.

3) *Padronização e interoperabilidade*: Diferentes definições e classificações na literatura dificultam a criação de uma plataforma digital integrada e comprometem a interoperabilidade entre sistemas. Padronizar formatos de dados e criar *pipelines* que integrem diversas fontes são essenciais para a eficiência dos gêmeos digitais.

4) *Volume e segurança de dados*: A grande quantidade de dados coletados representa desafios de armazenamento e processamento, exigindo soluções de *Big Data*, por exemplo. A troca de dados entre sistemas demanda mecanismos de segurança robustos para proteger as informações.

5) *Transmissão dos dados e sincronização*: A transmissão de dados de sensores em locais remotos pode ser comprometida por falhas de comunicação, e a sincronização em tempo real entre o gêmeo digital e a estrutura física continua sendo um desafio devido à limitações tecnológicas.

6) *Sensores e calibração*: Sensores são essenciais para alimentar o gêmeo digital, mas precisam ser calibrados corretamente para garantir que os dados capturados representem com precisão as condições reais da estrutura.

7) *Softwares*: A falta de uma plataforma unificada para integrar módulos de gêmeos digitais é uma limitação. *Softwares* de código fechado limitam a interoperabilidade, enquanto os de código aberto oferecem mais flexibilidade, mas são mais complexos de usar e personalizar.

8) *Conhecimento*: A criação de gêmeos digitais de pontes exige conhecimento multidisciplinar, abrangendo não só a engenharia estrutural, mas também áreas como a ciência da computação e telecomunicações, por exemplo, o que pode dificultar a sua implementação.

9) *Cultura, capacitação e prontidão tecnológica*: A adoção de gêmeos digitais requer mudanças organizacionais, com engenheiros e gestores precisando se adaptar a novas tecnologias, o que pode enfrentar resistência cultural e exigir capacitação.

10) *Manutenção*: Gêmeos digitais ainda não estão totalmente alinhados com os padrões regionais e nacionais de manutenção, sendo essencial que sigam essas diretrizes para garantir sua eficácia na gestão de pontes.

4. Conclusões

Este artigo explorou o estado-da-arte da aplicação de Gêmeos Digitais (DT) em pontes, revelando as tendências de aplicação, funcionalidades e desafios relacionados ao uso dessa tecnologia em obras de infraestrutura. A revisão sistemática realizada apontou que os DT oferecem uma abordagem promissora para melhorar a eficiência das atividades de gestão e operação de pontes.

As 12 principais aplicações de DT identificadas na literatura se mostram como tendências que vão desde a modelagem 3D automatizada até a detecção de danos com tecnologias de ponta. Estas tecnologias fornecem aos engenheiros e gestores ferramentas robustas para superar dificuldades de gestão e trazer significativas melhorias de processos relacionados às pontes em todo o seu ciclo de vida.

Com base nos textos encontrados na literatura, este artigo relacionou 12 funcionalidades que um DT deve ter para atingir um alto nível de maturidade, permitindo ampla gama de aplicações. No entanto, a implementação plena de DTs enfrenta desafios significativos, como os altos custos iniciais, a complexidade de modelos numéricos, a interoperabilidade de sistemas, dentre outros. Além disso, há uma necessidade urgente de desenvolver conhecimento multidisciplinar e criar uma cultura organizacional que abrace as novas tecnologias associadas aos gêmeos digitais.

Em suma, este estudo destaca que, apesar dos desafios, os Gêmeos Digitais têm o potencial de revolucionar o gerenciamento de pontes, desde que sejam desenvolvidos e aplicados de maneira estratégica e sustentada. A criação de *frameworks* integrados, o alinhamento com padrões nacionais e regionais de manutenção, e a contínua evolução dos modelos preditivos permitirão que as pontes se tornem infraestruturas inteligentes, otimizando a gestão e sua operação ao longo de todo o ciclo de vida. A pesquisa futura deve focar em superar os desafios identificados, buscando soluções que facilitem a implementação em larga escala e promovam a sustentabilidade e resiliência dessas obras.

Referências

AL-HIJAZEEN, A. Z. O. et al. Implementation of digital twin and support vector machine in structural health monitoring of bridges. *Archives of Civil Engineering* Polska Akademia Nauk, , 2023.

ARMIJO, A.; ZAMORA-SÁNCHEZ, D. Integration of Railway Bridge Structural Health Monitoring into the Internet of Things with a Digital Twin: A Case Study. *Sensors*, v. 24, n. 7, 1 abr. 2024.

CHACÓN, R. et al. Digital twinning during load tests of railway bridges - case study: the high-speed railway network, Extremadura, Spain. *Structure and Infrastructure Engineering*, v. 20, n. 7–8, p. 1105–1119, 2024.

COSTIN, A.; ADIBFAR, A.; BRIDGE, J. Digital Twin Framework for Bridge Structural Health Monitoring Utilizing Existing Technologies: New Paradigm for Enhanced Management, Operation, and Maintenance. *Transportation Research Record*, v. 2678, n. 6, p. 1095–1106, 1 jun. 2024.

DAN, D.; YING, Y.; GE, L. Digital Twin System of Bridges Group Based on Machine Vision Fusion Monitoring of Bridge Traffic Load. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 23, n. 11, p. 22190–22205, 1 nov. 2022.

GAO, Y. et al. AIoT-informed digital twin communication for bridge maintenance. *Automation in Construction*, v. 150, 1 jun. 2023.

GHAHARI, F. et al. Bridge Digital Twinning Using an Output-Only Bayesian Model Updating Method and Recorded Seismic Measurements. *Sensors*, v. 22, n. 3, 1 fev. 2022.

GUO, X. Y.; FANG, S. E. Digital twin based lifecycle modeling and state evaluation of cable-stayed bridges. *Engineering with Computers*, v. 40, n. 2, p. 885–899, 1 abr. 2024.

HAGEN, A.; ANDERSEN, T. M. Asset management, condition monitoring and Digital Twins: damage detection and virtual inspection on a reinforced concrete bridge. *Structure and Infrastructure Engineering*, v. 20, n. 7–8, p. 1242–1273, 2024.

HIELSCHER, T. et al. A neural network based digital twin model for the structural health monitoring of reinforced concrete bridges. *Structures*, v. 57, 1 nov. 2023.

HONGHONG, S. et al. Digital twin enhanced BIM to shape full life cycle digital transformation for bridge engineering. *Automation in Construction* Elsevier B.V., , 1 mar. 2023.

HOSAMO, H. H.; HOSAMO, M. H. Digital Twin Technology for Bridge Maintenance using 3D Laser Scanning: A Review. *Advances in Civil Engineering* Hindawi Limited, , 2022.

HU, G. et al. Fast and Accurate Generation Method of Geometric Digital Twin Model of RC Bridge with Box Chambers Based on Terrestrial Laser Scanning. *Remote Sensing*, v. 15, n. 18, 1 set. 2023a.

HU, K. et al. Semi-automated Generation of Geometric Digital Twin for Bridge Based on Terrestrial Laser Scanning Data. *Advances in Civil Engineering*, v. 2023, 2023b.

HUANG, Z. et al. Damage identification of truss bridges based on feature transferable digital twins. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, v. 233, 30 jun. 2024.

JASIŃSKI, M.; ŁAZIŃSKI, P.; PIOTROWSKI, D. The Concept of Creating Digital Twins of Bridges Using Load Tests. *Sensors*, v. 23, n. 17, 1 set. 2023.

JEON, C. H. et al. Prescriptive maintenance of prestressed concrete bridges considering digital twin and key performance indicator. *Engineering Structures* Elsevier Ltd, , 1 mar. 2024.

JIANG, F. et al. An Architecture of Lifecycle Fatigue Management of Steel Bridges Driven by Digital Twin. *Structural Monitoring and Maintenance*, v. 8, n. 2, p. 187–201, 2021a.

JIANG, F. et al. Digital Twin-driven framework for fatigue life prediction of steel bridges using a probabilistic multiscale model: Application to segmental orthotropic steel deck specimen. *Engineering Structures*, v. 241, 15 ago. 2021b.

JIANG, F. et al. Digital Twin-driven framework for fatigue lifecycle management of steel bridges. *Structure and Infrastructure Engineering*, v. 19, n. 12, p. 1826–1846, 2023.

JIMÉNEZ RIOS, A.; PLEVRIS, V.; NOGAL, M. Bridge management through digital twin-based anomaly detection systems: A systematic review. *Frontiers in Built Environment* Frontiers Media S.A., , 2023.

KAEWUNRUEN, S. et al. Digital twin aided vulnerability assessment and risk-based maintenance planning of bridge infrastructures exposed to extreme conditions. *Sustainability (Switzerland)*, v. 13, n. 4, p. 1–19, 2 fev. 2021.

KAEWUNRUEN, S. et al. Digital Twins for Managing Railway Bridge Maintenance, Resilience, and Climate Change Adaptation. *Sensors*, v. 23, n. 1, 1 jan. 2023.

KANG, J. S.; CHUNG, K.; HONG, E. J. Multimedia knowledge-based bridge health monitoring using digital twin. *Multimedia Tools and Applications*, v. 80, n. 26–27, p. 34609–34624, 1 nov. 2021.

LAI, X. et al. Digital twin-based non-destructive testing for structural health monitoring of bridges. *Nondestructive Testing and Evaluation*, v. 39, n. 1, p. 57–74, 2024.

LI, H. Y. et al. Establishment and application of a digital twin for vortex-induced vibration of a bridge deck section. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, v. 18, n. 1, 2024.

LIN, K. et al. Digital twin-based collapse fragility assessment of a long-span cable-stayed bridge under strong earthquakes. *Automation in Construction*, v. 123, 1 mar. 2021.

LU, R.; BRILAKIS, I. A benchmarked framework for geometric digital twinning of slab and beam-and-slab bridges. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Smart Infrastructure and Construction*, v. 172, n. 1, p. 3–18, 20 maio 2020.

LU, R.; BRILAKIS, I. Digital twinning of existing reinforced concrete bridges from labelled point clusters. *Automation in Construction*, v. 105, 1 set. 2019.

MAFIPOUR, M. S.; VILGERTSHOFER, S.; BORRMANN, A. Automated geometric digital twinning of bridges from segmented point clouds by parametric prototype models. *Automation in Construction*, v. 156, 1 dez. 2023.

MOHAMMADI, M. et al. Integration of TLS-derived Bridge Information Modeling (BrIM) with a Decision Support System (DSS) for digital twinning and asset management of bridge infrastructures. *Computers in Industry*, v. 147, 1 maio 2023.

MOHAMMADI, M. et al. Quality evaluation of digital twins generated based on uav photogrammetry and tls: Bridge case study. *Remote Sensing*, v. 13, n. 17, 1 set. 2021.

MOUSAVI, V. et al. Evolution of Digital Twin Frameworks in Bridge Management: Review and Future Directions. *Remote Sensing Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*, , 1 jun. 2024.

NHAMAGE, I. A. et al. Performing Fatigue State Characterization in Railway Steel Bridges Using Digital Twin Models. *Applied Sciences (Switzerland)*, v. 13, n. 11, 1 jun. 2023.

NHAMAGE, S. A. Development of BIM-Based Digital Twin Model for Fatigue Assessment in Metallic Railway Bridges. *U.Porto Journal of Engineering*, v. 9, n. 5, p. 12–23, 24 nov. 2023.

NICOLETTI, V. et al. Operational Modal Analysis as a Support for the Development of Digital Twin Models of Bridges. *Infrastructures*, v. 8, n. 2, 1 fev. 2023.

QIN, L. F.; REN, W. X.; GUO, C. R. A Physics-Data Hybrid Framework to Develop Bridge Digital Twin Model in Structural Health Monitoring. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, v. 23, n. 16–18, 1 nov. 2023.

ROJAS-MERCEDES, N.; ERAZO, K.; DI SARNO, L. Seismic fragility curves for a concrete bridge using structural health monitoring and digital twins. *Earthquake and Structures*, v. 22, n. 5, p. 503–515, 1 maio 2022.

SABACK, V. et al. Asset Management of Existing Concrete Bridges Using Digital Twins and BIM: a State-of-the-Art Literature Review. *Nordic Concrete Research*, v. 66, n. 1, p. 91–111, 1 jul. 2022.

SHIM, C. S. et al. Development of a bridge maintenance system for prestressed concrete bridges using 3D digital twin model. *Structure and Infrastructure Engineering*, v. 15, n. 10, p. 1319–1332, 3 out. 2019.

TENG, S. et al. Structural damage detection based on transfer learning strategy using digital twins of bridges. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 191, 15 maio 2023.

TITA, E. E. et al. Development and Application of Digital Twin–BIM Technology for Bridge Management. *Applied Sciences (Switzerland)*, v. 13, n. 13, 1 jul. 2023.

TITSCHER, T. et al. Bayesian model calibration and damage detection for a digital twin of a bridge demonstrator. *Engineering Reports*, v. 5, n. 11, 1 nov. 2023.

YANG, Y.; ZHU, Y.; CAI, C. S. Research progress and prospect of digital twin in bridge engineering. *Advances in Structural Engineering* SAGE Publications Inc., , 1 jan. 2024.

YOON, S. et al. Seismic fragility analysis of deteriorated bridge structures employing a UAV inspection-based updated digital twin. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, v. 65, n. 12, 1 dez. 2022.

YU, S.; LI, D.; OU, J. Digital twin-based structure health hybrid monitoring and fatigue evaluation of orthotropic steel deck in cable-stayed bridge. *Structural Control and Health Monitoring*, v. 29, n. 8, 1 ago. 2022.

ZHANG, G. Q. et al. Simulation and prediction of vortex-induced vibration of a long suspension bridge using SHM-based digital twin technology. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 247, 1 abr. 2024.

ZHAO, H. et al. Developing Digital Twins to Characterize Bridge Behavior Using Measurements Taken under Random Traffic. *Journal of Bridge Engineering*, v. 27, n. 1, jan. 2022.

ZHU, J. et al. Feature-constrained automatic geometric deformation analysis method of bridge models toward digital twin. *International Journal of Digital Earth*, v. 17, n. 1, 2024.