

APLICAÇÃO DO BIM E DOS GÊMEOS DIGITAIS NA GESTÃO DO CICLO DE VIDA DE OAES**APPLICATION OF BIM AND DIGITAL TWINS IN OAES LIFE CYCLE MANAGEMENT****APLICACIÓN DE BIM Y GEMELOS DIGITALES EN LA GESTIÓN DEL CICLO DE VIDA DE OAES** 10.56238/revgeov16n4-043**Felipe Mantuano**

Mestrando em Engenharia Civil

Instituição: Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

E-mail: mantuanofelipe@gmail.com

Orcid: 0009-0002-6309-6727

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5953037523320436>**Glauco José de Oliveira Rodrigues**

D.Sc.

Instituição: Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

E-mail: glauco.jose.rodrigues@uerj.br

Orcid: 0009-0001-6289-7728

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5822821293050157>**José Guilherme Santos da Silva**

D.Sc.

Instituição: Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

E-mail: jgss@uerj.br

Orcid: 0000-0002-2407-2127

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4422797300106230>**RESUMO**

A crescente adoção do Building Information Modeling (BIM) no Brasil, impulsionada pelo Decreto nº 11.888, de 22 de janeiro de 2024, tem alcançado diversos segmentos da indústria da construção, incluindo as Obras de Arte Especiais (OAE). Embora as etapas de projeto e análise estrutural de pontes e viadutos sejam amplamente discutidas em fóruns técnicos e acadêmicos, suas fases de operação e manutenção ainda permanecem pouco exploradas, em grande parte devido ao ritmo lento de avanço tecnológico no setor. Essa lacuna tem contribuído para consequências graves, como colapsos estruturais e interrupções de serviço. Este estudo tem como objetivo investigar como os Gêmeos Digitais (GD) derivados de modelos baseados em BIM, podem atuar como ferramentas estratégicas para a operação e manutenção de OAEs. Com base em normas brasileiras, como a ABNT NBR 9452:2023, e nos princípios de gestão da informação definidos pela ABNT NBR ISO 19650, propõe-se uma estrutura metodológica que integra dados provenientes de sensores a ambientes digitais, permitindo o monitoramento em tempo real dos ativos. A pesquisa é sustentada por um levantamento estatístico da inoperabilidade de OAEs no Brasil, além da análise de ineficiências nos modelos atuais

de gestão e do uso de tecnologias habilitadoras, como o Autodesk Tandem. Os resultados evidenciam a necessidade urgente de digitalização na gestão de ativos de infraestrutura e propõem os Gêmeos Digitais como solução viável para aprimorar o desempenho, a segurança e a longevidade dessas estruturas.

Palavras-chave: Building Information Modeling (BIM). Obras de Arte Especiais (OAE). Gêmeo Digital (GD).

ABSTRACT

The growing adoption of Building Information Modeling (BIM) in Brazil, driven by Decree No. 11,888 of January 22, 2024, has reached various sectors of the construction industry, such as bridges and viaducts. While the design and structural analysis phases of bridges and viaducts are widely discussed in technical and academic forums, their operation and maintenance stages remain largely underexplored, primarily due to the slow pace of technological advancement in the sector. This gap has led to serious consequences, such as structural failures and service disruptions. This study aims to investigate how Digital Twins (DT), derived from BIM-based models, can serve as strategic tools for the operation and maintenance of bridges and viaducts. Based on Brazilian standards, such as ABNT NBR 9452:2023, and the information management principles defined in ABNT NBR ISO 19650, a methodological framework is proposed to integrate sensor data into digital environments, enabling real-time asset monitoring. The research is supported by a statistical survey on the inoperability of bridges and viaducts in Brazil, as well as an analysis of inefficiencies in current management models and the use of enabling technologies, such as Autodesk Tandem. The results highlight the urgent need for digitalization in infrastructure asset management and propose Digital Twins as a viable solution to enhance the performance, safety, and longevity of these structures.

Keywords: Building Information Modeling (BIM). Special Works of Art (OAE). Digital Twins (DT).

RESUMEN

La creciente adopción del Modelado de Información de Edificación (BIM) en Brasil, impulsada por el Decreto n.º 11.888 del 22 de enero de 2024, ha alcanzado diversos segmentos de la industria de la construcción, incluyendo las Obras de Arte Especiales (OAE). Si bien las etapas de diseño y análisis estructural de puentes y viaductos son ampliamente debatidas en foros técnicos y académicos, sus fases de operación y mantenimiento permanecen poco exploradas, en gran medida debido a la lentitud de los avances tecnológicos en el sector. Esta brecha ha contribuido a graves consecuencias, como colapsos estructurales e interrupciones del servicio. Este estudio busca investigar cómo los Gemelos Digitales (GD) derivados de modelos basados en BIM pueden actuar como herramientas estratégicas para la operación y el mantenimiento de las OAE. Basado en normas brasileñas, como la ABNT NBR 9452:2023, y los principios de gestión de la información definidos por la ABNT NBR ISO 19650, este estudio propone un marco metodológico que integra datos de sensores con entornos digitales, permitiendo la monitorización de activos en tiempo real. La investigación se sustenta en un estudio estadístico sobre la inoperabilidad de las OAE en Brasil, así como en un análisis de las ineficiencias de los modelos de gestión actuales y el uso de tecnologías facilitadoras, como Autodesk Tandem. Los resultados destacan la urgente necesidad de digitalización en la gestión de activos de infraestructura y proponen los Gemelos Digitales como una solución viable para mejorar el rendimiento, la seguridad y la longevidad de estas estructuras.

Palabras clave: Building Information Modeling (BIM). Obras de Arte Especiales (OAE). Gemelo Digital (GD).

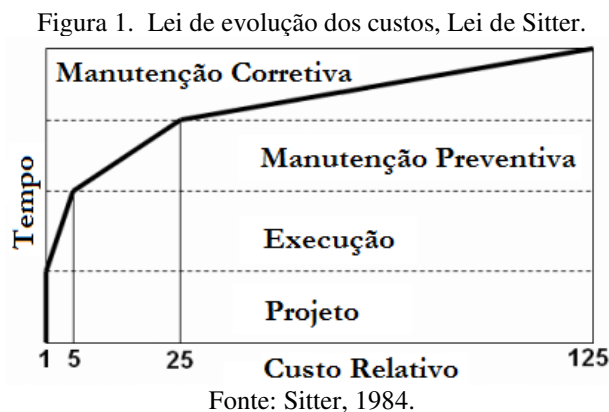


1 INTRODUÇÃO

A incerteza quanto ao número de pontes e viadutos existentes no país é o primeiro fator que contribui para a gestão deficiente dos ativos de infraestrutura rodoviária no Brasil (DNIT, 2017). Estima-se que existam cerca de 137 mil Obras de Arte Especiais (OAE), das quais 5.827 pontes federais estão sob responsabilidade do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) para fins de inspeção e manutenção. De acordo com o relatório, até maio de 2023, 727 pontes federais foram classificadas como críticas ou em mau estado de conservação, o que representa aproximadamente 12,5% do total de pontes federais no país.

Em 2023, foram elaborados apenas 49 planos de manutenção para OAEs, de um total de 1.724 sob responsabilidade das Superintendências Regionais. O sistema utilizado pelo DNIT para armazenar os dados das inspeções é o Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte Especiais (SGO). Cada OAE cadastrada passa por avaliações periódicas de sua condição física, sendo atribuída uma nota de 1 (pior condição) a 5 (melhor condição). Essa classificação tem como objetivo auxiliar na priorização das ações de manutenção. As notas 1 e 2 correspondem, respectivamente, a “obras críticas” e “obras com problemas” (DNIT, 2004).

A necessidade de priorização decorre da ausência de políticas e estratégias voltadas à preservação das OAEs. Sitter (1984) destaca a importância de ações preventivas nas fases de projeto/construção, uma vez que os custos aumentam significativamente nas fases de reparo e renovação, conforme ilustrado na Figura 1.



Um dos principais fatores que impulsionam o crescente interesse pela durabilidade do concreto é a alarmante frequência de danos causados pela corrosão das armaduras. Mehta e Monteiro (2008) destacam que nenhum material pode ser considerado intrinsecamente durável, uma vez que as microestruturas inevitavelmente evoluem ao longo do tempo devido às interações com o ambiente. O fim da vida útil de uma estrutura é alcançado quando suas propriedades, sob determinadas condições de uso, se degradam a tal ponto que sua operação contínua se torna inviável, tanto do ponto de vista econômico quanto da segurança estrutural.



Este artigo investiga como a combinação do BIM e dos Gêmeos Digitais (GD), em conformidade com a ABNT NBR 9452:2023 (ABNT, 2023) e com os padrões da série ISO 19650 (International Organization for Standardization, 2018), pode aprimorar significativamente a gestão do ciclo de vida das OAE no Brasil. Apresenta-se uma análise estatística das patologias estruturais, identificam-se lacunas nas práticas atuais e são discutidas soluções para uma gestão inteligente da infraestrutura.

2 PRESERVAÇÃO DO ATIVO

A preservação de ativos refere-se ao conjunto de ações necessárias para garantir que uma estrutura permaneça segura, funcional e em conformidade com sua concepção original ao longo de todo o seu ciclo de vida. Essas ações se iniciam com a coleta sistemática de dados sobre as condições físicas da estrutura, geralmente obtidos por meio de inspeções padronizadas (Vitório, 2006).

No Brasil, a ABNT NBR 9452:2023 (ABNT, 2023) define os requisitos técnicos e os procedimentos para a inspeção de Obras de Arte Especiais, abrangendo pontes, viadutos e passarelas em concreto, aço ou estruturas mistas. Essa norma estabelece um sistema de classificação e determina diferentes tipos de inspeção com base na frequência, finalidade e nas condições que as desencadeiam. As inspeções cadastrais são realizadas após a construção, a integração ao sistema viário ou após modificações significativas. As inspeções de rotina ocorrem anualmente, com o objetivo de avaliar o estado geral da estrutura. Já as inspeções especiais são realizadas a cada cinco anos, ou até oito anos, para uma avaliação mais detalhada. Por fim, as inspeções extraordinárias são executadas após eventos como desastres naturais ou acidentes.

Essas inspeções constituem a base para a gestão dos dados dos ativos e devem ser integradas a um processo estruturado de gestão da informação, idealmente apoiado por metodologias BIM, conforme recomendado pela ISO 19650. Isso garante que os dados de inspeção não apenas sejam coletados, mas também organizados e acessíveis durante todo o ciclo de vida do ativo, desde o projeto e a construção até a manutenção e, eventualmente, a reabilitação.

Ao centralizar e atualizar essas informações em um Ambiente Comum de Dados, torna-se possível melhorar a tomada de decisão, priorizar intervenções e reduzir os custos de manutenção. O BIM também permite a visualização em tempo real dos resultados das inspeções e auxilia no planejamento de medidas corretivas com maior precisão e agilidade.

3 CLASSIFICAÇÃO DAS OBRAS DE ARTES ESPECIAIS

A classificação das OAE é uma etapa fundamental na gestão de ativos, servindo de base para a priorização de manutenções, avaliação de riscos e planejamento de intervenções. De acordo com a norma ABNT NBR 9452:2023 (ABNT, 2023), essa classificação deve considerar três dimensões



principais: desempenho estrutural, funcional e de durabilidade. Cada uma dessas dimensões é avaliada em uma escala de 0 a 5, sendo que a nota 5 indica condição excelente e a nota 0 representa colapso total ou perda completa de funcionalidade.

A avaliação deve ser realizada por inspetores qualificados, e a classificação final deve ser validada pelo engenheiro responsável pela gestão do ativo. O Quadro 1 apresenta uma versão sintetizada dos critérios definidos pela norma.

Quadro 1. Classificação das OAEs segundo ABNT 9452/23.

Nota	Estrutural	Funcional	Durabilidade
5	Sem problemas; Defeitos irrelevantes.	Segura e completamente funcional	Sem anomalias relevantes.
4	Pouco dano, sem risco a segurança.	Desconforto mínimo. Segura	Deterioração mínima.
3	Risco monitorável, sem instabilidade.	Desconforto ao usuário. Requer atenção.	Deterioração moderada.
2	Segurança comprometida, necessário reparo.	Uso comprometido, risco a segurança.	Deterioração severa.
1	Condição crítica, risco de colapso.	Uso restritor, fechamento parcial.	Deterioração localizada acentuada.
0	Falha estrutural, colapsada.	Não funcional. Necessário interdição.	Deterioração crítica. Intervenção emergencial

Fonte: ABNT, 2023.

A classificação deve levar em consideração os componentes individuais da ponte, tais como superestrutura, mesoestrutura, infraestrutura, elementos complementares e o sistema de pista. Cada componente pode ser avaliado separadamente em relação a cada uma das três dimensões, permitindo uma priorização mais detalhada e precisa das intervenções necessárias.

Quando integrados a modelos baseados em BIM, os resultados dessas classificações podem ser armazenados, visualizados e atualizados em tempo real, criando um ambiente dinâmico de gestão digital de ativos. Essa abordagem aumenta a transparência, reduz a subjetividade das análises e facilita a geração automatizada de relatórios para órgãos públicos e concessionárias.

4 DESAFIOS PARA A MANUTENÇÃO DE OAEs

A manutenção das OAEs é marcada por desafios críticos decorrentes das diferentes fases do ciclo de vida do ativo. O principal fator que contribui para o surgimento de patologias estruturais nas obras civis brasileiras é a má execução (Souza, 1991). Estudos complementares realizados por Gnipper e Mikaldo Jr. (2007) reforçam esse achado ao quantificar as principais causas de falhas endógenas em estruturas civis: erros de projeto correspondem a 36%–49%, falhas de execução a 19%–30%, falhas de componentes a 11%–25%, e uso inadequado a 9%–11%.

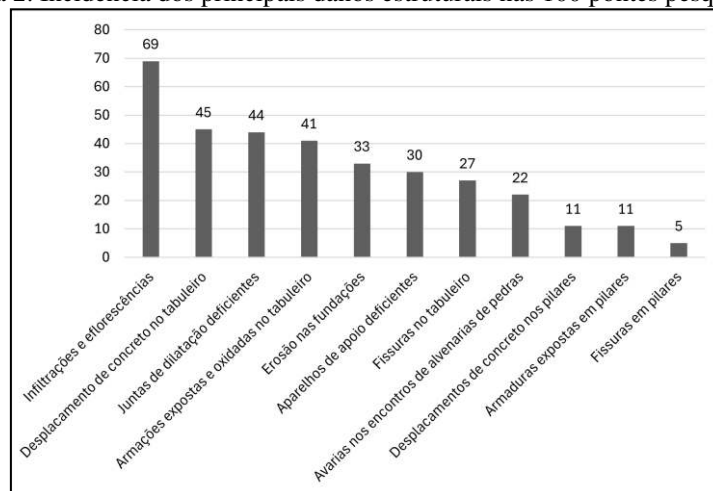


As falhas em OAEs são agravadas por projetos complexos, ambientes agressivos e elevadas exigências operacionais. Na ausência de manutenção preventiva e de dados confiáveis, a deterioração frequentemente passa despercebida até atingir um estado crítico.

Em um estudo conduzido por Vitório (2013), foram analisadas 100 pontes localizadas nos estados da região Nordeste do Brasil, com a identificação das principais ocorrências patológicas (Figura 2). O estudo apontou que a ausência de manutenção desses ativos contribuiu de forma significativa para os danos estruturais observados nas pontes avaliadas.

A classificação predominante foi de estruturas potencialmente problemáticas (38%), seguida por estruturas em mau estado de conservação (35%), estruturas sem manifestações significativas (24%) e estruturas em condição crítica, com risco potencial de colapso estrutural (3%).

Figura 2. Incidência dos principais danos estruturais nas 100 pontes pesquisadas.



Fonte: Vitório, 2013.

Nesse contexto, torna-se evidente a necessidade de novas estratégias para enfrentar os desafios identificados. A integração do BIM aos projetos de infraestrutura representa uma oportunidade transformadora. Ao garantir dados centralizados e estruturados ao longo de todo o ciclo de vida do ativo, o BIM contribui para a mitigação de inconsistências de projeto, aprimora a documentação executiva e permite o acompanhamento das condições dos componentes para o planejamento de manutenções futuras.

Quando o BIM é aliado a tecnologias como Gêmeos Digitais e monitoramento por sensores em tempo real, torna-se possível a transição de modelos de manutenção corretiva para abordagens preditivas. Essa mudança não apenas eleva a confiabilidade operacional, como também reduz os custos ao longo do ciclo de vida e os riscos aos usuários associados a falhas na infraestrutura.



5 BUILDING INFORMATION MODELING (BIM)

O conceito do BIM evoluiu consideravelmente desde sua origem. Embora o termo “BIM” ainda não estivesse estabelecido na época, Charles M. Eastman introduziu a ideia fundamental do modelo computacional dos componentes da edificação (Eastman, 1975). Com o tempo, esse conceito amadureceu e se consolidou como uma metodologia integrada que abrange a representação digital, coordenação e gestão das informações construtivas ao longo de todo o ciclo de vida.

Segundo Sacks et al. (2018) o BIM pode ser definido como um conjunto de processos e tecnologias para a criação, gestão e uso de informações estruturadas sobre um ativo construído. O sistema contempla a representação de objetos inteligentes, com dados gráficos e paramétricos, integrados dados comportamentais que permitem que os componentes reajam a regras e restrições predefinidas, assegura a consistência dos dados para que alterações em um elemento sejam refletidas em todas as vistas e documentos, e utiliza um ambiente comum de dados para manter o controle de versões, fomentar a colaboração e garantir a integridade da informação.

Em conformidade com as normas ISO 19650 (Internacional Organization for Standardization, 2018) o BIM não se limita à modelagem geométrica, mas sim à gestão da informação estruturada em todas as etapas, desde o projeto e construção até a operação e desativação. Essas normas internacionais reforçam a importância da interoperabilidade dos dados e da colaboração, especialmente em projetos de infraestrutura pública.

Os modelos BIM podem ser categorizados conforme o conceito das “dimensões BIM”, que correspondem à adição de informações específicas do projeto ao modelo 3D. As dimensões BIM incluem 3D (modelagem geométrica), 4D (tempo e sequenciamento da construção), 5D (gestão de custos), 6D (sustentabilidade e desempenho energético) e 7D (operação e manutenção).

Entre elas, a dimensão 7D é especialmente relevante para a gestão de infraestrutura, pois incorpora dados relacionados a inspeções, garantias, cronogramas de manutenção e indicadores de desempenho dos ativos. Apesar de seu valor estratégico, a dimensão 7D permanece subutilizada, sobretudo no Brasil, devido à limitada maturidade digital dos gestores de instalações e dos órgãos públicos (Bąkowski, 2017).

6 BIM NA INFRAESTRUTURA

A aplicação do BIM em projetos de infraestrutura tem ganhado relevância global, especialmente por sua capacidade de aumentar a eficiência, reduzir custos e melhorar a tomada de decisão ao longo do ciclo de vida dos ativos. Contudo, um dos principais obstáculos à sua adoção ampla, sobretudo em projetos do setor público, é a dificuldade em mensurar com precisão o retorno sobre o investimento (Dodge Data & Analytics, 2017).



O projeto Mitchell Interchange, nos Estados Unidos, demonstrou os benefícios do BIM na redução de custos e na melhoria da coordenação (USFHA, 2013). A Tabela 1 apresenta um resumo dos impactos estimados nos custos decorrentes do uso do BIM, enquanto a Figura 3 exibe uma visualização digital do projeto.

Tabela 1. Impacto do custo estimado a partir do uso da modelagem 3D.

Notificações de Problemas de Projeto	Redução estimada (%)	Custo Total (M USD)	Custo médio por revisão (\$)
Estruturas Gerais	30,50%	6,8	45,674
Saneamento / Drenagem	25,50%	5,7	85,631
Rodovias / Drenagem	11,10%	2,4	27,120
Pontes	8,00%	1,8	15,557
Barreiras Acústicas	8,00%	1,7	12,909
Muros de Contenção	7,70%	1,7	21,818
Terraplenagem	4,50%	1,5	59,220
Elétrica	2,60%	0,6	15,557
Tráfego	2,10%	0,5	18,174
Sinalização	0,10%	2,32	738
TOTAL	100%	22,32	-

Fonte: USFHA, 2013.

Figura 3. Modelo 3D, The Mitchell Interchange



Fonte: USFHA, 2013.

Os resultados evidenciam o papel transformador do BIM em infraestruturas complexas, especialmente diante de restrições orçamentárias e de cronograma. No caso das OAE, o BIM integra geometria, estrutura, cronologia e custos em um modelo digital unificado.

No Brasil, o Decreto nº 10.306/20204 (Brasil, 2020) estabelece a obrigatoriedade da adoção do BIM em obras públicas federais, alinhando-se a padrões internacionais como a ISO 19650. Além das etapas de projeto e construção, o BIM apoia a interoperabilidade, por exemplo, via formato *Industry Foundation Classes* (IFC), permitindo que os registros *As Built* sejam vinculados aos sistemas de manutenção para atualizações em tempo real, previsão de custos e planejamento de reabilitação. Assim, o BIM torna-se um ativo estratégico para a governança da infraestrutura, promovendo transparência, eficiência e decisões baseadas em dados.

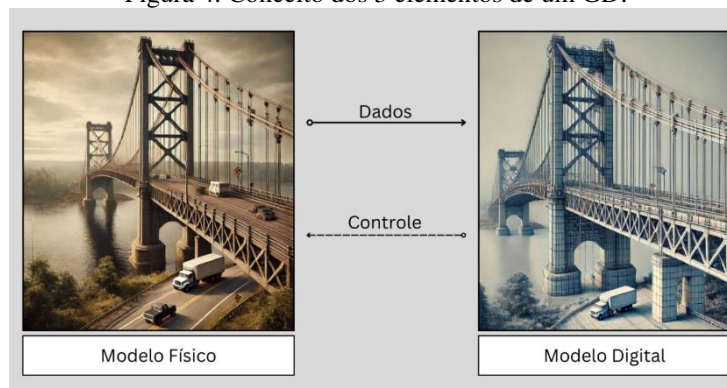


7 GÊMEOS DIGITAIS

Os Gêmeos Digitais são cada vez mais reconhecidos como ferramentas transformadoras na gestão de infraestrutura. De acordo com Parrot e Warshaw (2017), um GD pode ser definido como uma réplica virtual de um ativo ou sistema físico, construída a partir de dados cumulativos e em tempo real, capaz de simular e prever seu desempenho. Esses modelos digitais possibilitam a gestão proativa dos ativos por meio do monitoramento e análise contínuos.

Segundo Grieves (2019), um GD estabelece a conexão entre o ativo físico, seu modelo digital e os fluxos de dados entre eles (Figura 4). O objetivo final é apoiar a tomada de decisão em tempo real relativa à operação, manutenção e otimização do desempenho do ativo.

Figura 4. Conceito dos 3 elementos de um GD.



Fonte: Delgado et al., 2021.

No contexto da infraestrutura, a integração do BIM com os Gêmeos Digitais, cria uma base robusta para a gestão digital de ativos. O BIM fornece os dados estruturados, geométricos e não geométricos, necessários para a construção do correspondente digital. Contudo, o modelo BIM original, conforme projetado, não reflete a condição real da obra executada. Para a criação de um verdadeiro GD, o modelo deve ser atualizado durante o processo de comissionamento para representar a realidade *As Built*.

Esse processo, embora essencial, pode ser moroso e oneroso, especialmente em estruturas grandes ou complexas, como pontes e viadutos. Para contornar essas dificuldades, avanços recentes em tecnologias de captura da realidade, como drones e scanners a laser, têm se mostrado altamente eficazes. Essas ferramentas geram modelos densos em nuvem de pontos que servem como referência geométrica precisa para a atualização dos modelos BIM pós-construção.

Uma vez integrados a uma plataforma de GD, como o Autodesk Tandem ou ambientes similares, esses modelos permitem aos gestores de infraestrutura monitorar o comportamento estrutural por meio da integração de sensores, simular padrões de degradação, planejar manutenções preditivas com base em tendências de desempenho e centralizar documentação e dados de campo em uma única plataforma.



Além disso, a sinergia entre GDs e BIM está plenamente alinhada aos princípios da série ISO 19650 que promove fluxos estruturados de informação e interoperabilidade dos dados em todas as etapas do ciclo de vida do ativo.

À medida que os ativos de infraestrutura no Brasil envelhecem e demandam uma gestão mais eficiente, a adoção dos Gêmeos Digitais, apoiada pelas metodologias BIM, representa uma mudança estratégica do modelo reativo para modelos preditivos e preventivos de manutenção. Isso não só eleva a segurança e o desempenho, como também contribui para significativas economias de custo e maior longevidade dos ativos.

8 MONITORAÇÃO DE ESTRUTURAS DE OAE POR SENSORES

O monitoramento de pontes e viadutos é um componente essencial da gestão de ativos estruturais, permitindo a detecção precoce de anomalias e a prevenção de falhas catastróficas. Esse processo, conhecido como Monitoramento da Integridade Estrutural (*Structural Health Monitoring – SHM*), consiste em técnicas que avaliam o comportamento da estrutura sem comprometer sua integridade, baseando-se principalmente em ensaios não destrutivos e na aquisição de dados por sensores (Baleagas et al., 2010)

A efetividade do SHM aumenta significativamente quando integrado aos GDs. Dados em tempo real obtidos por sensores de campo podem ser alimentados diretamente no ambiente digital, possibilitando o acompanhamento contínuo do desempenho, diagnósticos preditivos e alertas automatizados. Essa sinergia aprimora a tomada de decisão e prioriza as intervenções com base nas condições estruturais reais.

Dentre os sensores mais utilizados em aplicações para OAE, destacam-se os sensores que monitoram deformação, vibração, temperatura e umidade, corrosão galvânica (Figura 5) e sensores ópticos de fibra, todos apoiando a manutenção proativa.

Figura 5. Sensor Galvânico.



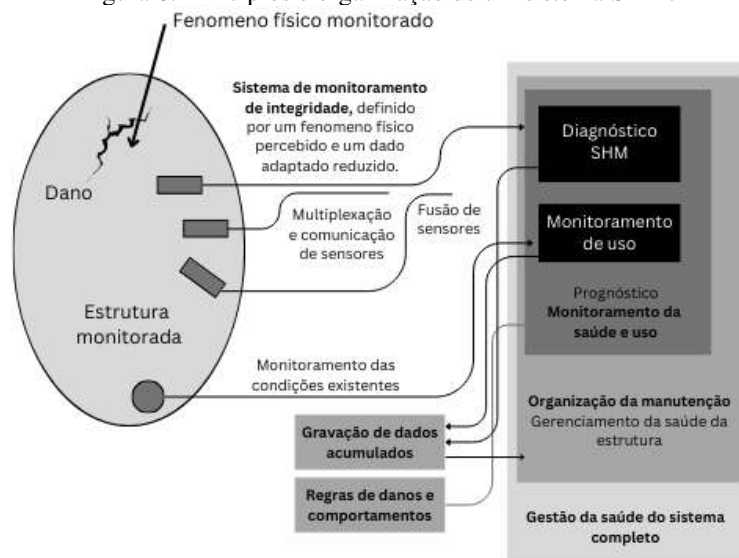
Fonte: Araújo et al., 2013.

A metodologia de SHM envolve mais do que a simples instalação de sensores. Ela engloba um sistema estruturado de aquisição e transmissão de dados, processamento analítico (incluindo modelos estatísticos e inteligência artificial), suporte à decisão e integração do feedback no planejamento de manutenção (Grieves, 2019). A Figura 6 ilustra a arquitetura básica de um sistema SHM, no qual sensores, unidades de processamento e *softwares* de gestão estão interligados para apoiar a análise e visualização em tempo real.

No contexto do BIM e dos Gêmeos Digitais, a integração dos dados de SHM com modelos 3D possibilita a gestão de ativos baseada nas condições reais. As equipes podem visualizar os dados dos sensores, simular processos de deterioração e planejar ações diretamente no modelo digital. O sistema permite a detecção precoce de anomalias, reduz o número de intervenções não planejadas, apoia a priorização de recursos com base nas condições dos ativos e oferece documentação de longo prazo para planejamento e auditoria.

Como parte de uma estratégia nacional de infraestrutura, a incorporação do SHM em Gêmeos Digitais baseados em BIM representa uma mudança de paradigma da manutenção reativa para a preditiva, conforme recomendam normas contemporâneas e roteiros de transformação digital para obras públicas. Um diagrama do ciclo de vida da concepção de um GD é sugerido na Figura 7.

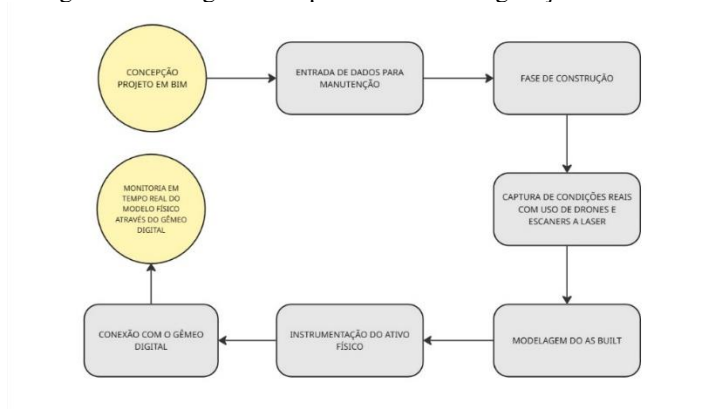
Figura 6. Princípios e organização de um sistema SHM.



Fonte: Baleagas et al., 2010.



Figura 7. Fluxograma do processo de configuração de um GD



Fonte: Elaboração própria.

9 O AUTODESK TANDEM

Entre os avanços mais recentes nas tecnologias de GDs para a indústria de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), destaca-se o Autodesk Tandem como uma plataforma abrangente projetada para conectar os modelos de projeto baseados em BIM aos ambientes de operação de instalações.

O Autodesk Tandem possibilita a criação de um GD conectado ao aproveitar dados das fases de projeto e construção, enriquecendo o modelo com metadados operacionais e informações em tempo real provenientes de sensores. A ferramenta está alinhada à dimensão 7D do BIM, com foco no desempenho dos ativos, manutenção e otimização do ciclo de vida.

O sistema integra dados de projeto originados do Autodesk Revit ou modelos baseados em IFC, sistemas operacionais incluindo redes de sensores e infraestrutura de Internet das Coisas (IoT), cronogramas de manutenção e inventários de ativos, além de ferramentas de visualização como dashboards, mapas de calor e indicadores em tempo real. Entre suas funcionalidades principais destacam-se a visualização de dados operacionais por meio de gráficos, KPIs e mapas de calor para exibir variações de temperatura, tensões e anomalias de vibração nos elementos estruturais. A interoperabilidade com padrões abertos é outro ponto forte, pois o Tandem suporta o formato IFC e integra-se às ferramentas Autodesk, garantindo continuidade dos dados e conformidade com as normas ISO 16739 (International Organization for Standardization, 2024) e ISO 19650, também oferece integração de sensores via IoT, permitindo a coleta de dados em tempo real dos ativos físicos para suporte ao monitoramento de status, alertas de manutenção e previsão de desempenho. Além disso, o Tandem dispõe de gestão de inventário de ativos, na qual elementos BIM são transformados em ativos digitais com atributos como números de série, garantias e datas de inspeção.

O fluxo do processo inicia-se com o projeto e construção do ativo utilizando BIM, seguido pela modelagem *As Built*, geralmente por meio de varredura a laser ou fotogrametria por drone, e pela instrumentação da estrutura física. Uma vez configurado o GD, o Tandem torna-se um ambiente dinâmico para operação e manutenção contínuas, conforme ilustrado no diagrama do ciclo de vida do



GD (Figura 7). Para projetos de pontes e viadutos, isso possibilita aos gestores de infraestrutura o monitoramento em tempo real da integridade dos componentes críticos, permitindo a detecção tempestiva de problemas. As intervenções podem ser planejadas com base em limites predefinidos de sensores e tendências de deterioração observadas. Os usuários podem acessar instantaneamente a documentação digital, seja no local da obra ou remotamente, garantindo maior eficiência operacional. Além disso, a plataforma assegura a rastreabilidade histórica de todos os eventos relacionados aos ativos, apoiando a tomada de decisão informada e o cumprimento normativo.

No contexto brasileiro, especialmente com o impulso federal para a adoção do BIM estabelecido pelo Decreto nº 11.888/2024, soluções como o Autodesk Tandem configuram-se como aliados poderosos para reduzir a lacuna entre a entrega dos projetos e a gestão de infraestrutura de longo prazo.

10 CONCLUSÕES

A crescente complexidade e o envelhecimento dos ativos de infraestrutura no Brasil, especialmente pontes e viadutos, evidenciam a necessidade urgente de estratégias de manutenção mais inteligentes, integradas e proativas. Este estudo demonstra que o uso combinado do BIM e dos Gêmeos Digitais fornece uma base robusta para a melhoria da operação, monitoramento e gestão das OAE. Ao aplicar os princípios do BIM e alinhar-se à norma ISO 19650 para gestão estruturada da informação, torna-se possível centralizar os dados de projeto, construção e inspeção ao longo de todo o ciclo de vida do ativo. A integração com dados de sensores em tempo real, por meio do paradigma do Gêmeo Digital, possibilita a transição da manutenção tradicionalmente reativa para uma abordagem mais preditiva e baseada na condição, em conformidade com as melhores práticas internacionais.

O número alarmante de OAE em condição crítica no Brasil, evidenciado pelos dados das inspeções federais, reforça as limitações dos modelos atuais de gestão de ativos, frequentemente fragmentados, atrasados e carentes de interoperabilidade. Este trabalho propõe uma alternativa clara, apresentando ferramentas como o Autodesk Tandem, que permite a visualização em tempo real da integridade estrutural, suporta o inventário automatizado dos ativos digitais, facilita a comunicação entre sistemas físicos e ambientes digitais e possibilita o planejamento baseado em dados para intervenções e inspeções.

A metodologia discutida neste artigo está também diretamente alinhada aos objetivos do Decreto nº 11.888/2024 e o Decreto nº 10.306/2020 que estabelece a obrigatoriedade do uso do BIM em obras públicas. Assim, o *framework* proposto oferece não apenas benefícios técnicos, mas também relevância política, contribuindo para uma transformação digital mais ampla na governança da infraestrutura.



Por fim, este estudo destaca a necessidade de capacitação técnica nas agências públicas e concessionárias para apoiar a efetiva implementação das soluções BIM e GD. Pesquisas futuras devem explorar análises de custo-benefício das implantações de gêmeos digitais em infraestrutura, bem como o desenvolvimento de protocolos nacionais para a digitalização de ativos, especialmente para as redes rodoviárias e de pontes.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho expressam sua gratidão pelo apoio financeiro concedido pelas agências brasileiras de fomento à pesquisa: CAPES, CNPq e FAPERJ.



REFERÊNCIAS

ARAÚJO, A. et al. Monitoramento da corrosão em estruturas de concreto: sensor de umidade, de taxa de corrosão e de fibra óptica. São Paulo/SP, Brasil (2013).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9452:2023 - Inspeção de pontes, viadutos e passarelas – Procedimento. Rio de Janeiro/RJ, Brasil (2023).

BAKOWSKI, J. Analytical tools for functional assessment of architectural layouts. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Gdańsk, Poland (2017).

BALAGEAS, D.; FRITZEN, C.; GÜEMES, A. Structural health monitoring. John Wiley & Sons, United States (2010).

BRASIL. Decreto nº 10.306, de 2 de abril de 2020. Dispõe sobre a utilização do Building Information Modelling - BIM na execução direta ou indireta de obras e serviços de engenharia realizadas pelos órgãos e pelas entidades da administração pública federal. Diário Oficial da União: seção 1. Brasília/DF, Brasil (2020).

BRASIL. Decreto nº 11.888, de 22 de janeiro de 2024. Dispõe sobre a Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling no Brasil – Estratégia BIM BR e institui o Comitê Gestor da Estratégia do Building Information Modelling – BIM BR. Diário Oficial da União: seção 1. Brasília/DF, Brasil (2024).

DELGADO, J.; OYEDELE, L. Digital Twins for the built environment: learning from conceptual and process models in manufacturing. *Advanced Engineering Informatics*, v. 49, p. 101332. Bristol, UK (2021).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Base de Dados das OAE - BDOAE. Brasília/DF, Brasil (2017).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Norma DNIT 010/2004 – PRO: Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido – Procedimento. Rio de Janeiro, Brasil (2004).

DODGE DATA & ANALYTICS; DELOITTE. The business value of BIM for infrastructure: how building information modeling is transforming design and construction to achieve greater industry productivity. Bedford, UK (2017).

EASTMAN, C. The Use of Computers Instead of Drawings in Building Design. *AIA Journal*, v. 63. United States (1975).

GNIPPER, S.; MIKALDO, J. Patologias frequentes em sistemas prediais hidráulicosanitários e de gás combustível decorrentes de falhas no processo de produção do projeto. Curitiba/PR, Brasil (2007).

GRIEVES, M. Virtually intelligent product systems: Digital and physical twins. Florida, United States (2019).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 16739-1:2024 – Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries – Part 1: Data schema. Geneva, Switzerland (2024).



INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 19650 – Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) - Information management using building information modelling. Geneva, Switzerland (2018).

MEHTA, P.; MONTEIRO, P. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. Tradutor: Paulo Helene et al. 3.ed. IBRACON, São Paulo/SP, Brasil (2008).

PARROT, A; WARSHAW, L. Industry 4.0 and the digital twin: Manufacturing meets its match. A Deloitte series on Industry 4.0, digital manufacturing enterprises, and digital supply networks, p. 1-17. United States (2017).

SACKS, R. et al. BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers. United States (2018).

SITTER, W. Costs for service life optimization. The Law of fives. In: International CEB-RILEM workshop on durability of concrete structures. Copenhagen, Denmark (1984).

U.S. FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Understanding the Benefits of 3D Modeling in Construction: The Wisconsin Case Study 3D Engineered Models for Construction. Washington/DC, United States (2019).

VITÓRIO, J. Vistorias, Conservação e Gestão de Pontes e Viadutos de Concreto. Anais do 48º congresso brasileiro do concreto. Recife/PB, Brasil (2006).

VITÓRIO, J.; BARROS, R. Análise dos danos estruturais e das condições de estabilidade de 100 pontes rodoviárias no Brasil. Anais do 3º Congresso Nacional Sobre Segurança e Conservação de Pontes. Porto, Portugal (2013).

