Indústria 5.0: Oportunidades e Desafios para Arquitetura e Construção

13º Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção e 4º Simpósio Brasileiro de Tecnologia da Informação e Comunicação na Construção

ARACAJU-SE | 08 a 10 de Novembro

[1] Aplicação de Gêmeos Digitais em um ambiente BIM de monitoramento de estruturas de edificações

Application of Digital Twins in a BIM environment for monitoring building structures

Gabriel Andrade de Souza Galvão
Instituto Militar de Engenharia | Rio de Janeiro, Rio de Janeiro | gabriel.galvao@ime.eb.br

Hiury Gandara de Toledo Castro
Instituto Militar de Engenharia | Rio de Janeiro, Rio de Janeiro | gandara.hiury@ime.eb.br

Bruno Rafael de Britto Costa
Instituto Militar de Engenharia | Rio de Janeiro, Rio de Janeiro | britto.bruno@ime.eb.br

Giuseppe Miceli Junior
Instituto Militar de Engenharia | Rio de Janeiro, Rio de Janeiro | giuseppe.pged@ime.eb.br

Paulo César Pellanda
Instituto Militar de Engenharia | Rio de Janeiro, Rio de Janeiro | pcpellanda@ieee.org

RESUMO

Gêmeo digital é a representação virtual de um ambiente ou de um ativo físico. Não se restringe a um modelo geométrico tradicional, mas é uma referência de dados que podem ser utilizados durante todo o ciclo de vida de um ativo. Gêmeos digitais não se restringem a um conjunto de dados estáticos, pois se comunicam com suas contrapartes físicas, compartilham informações, utilizando tecnologias como Inteligência Artificial (IA) e *Internet of Things* (IoT). Este trabalho tem por objetivo, através de uma pesquisa bibliográfica com caráter exploratório, analisar a relação entre Gêmeo Digital e uma estrutura modelada em *Building Information Modeling* (BIM), por meio de uma aplicação de monitoramento de estruturas. Foi proposta uma aplicação do Gêmeo Digital em conjunto com o BIM, instalando um sensor de distância acoplado a uma placa micro controladora (Arduino), funcionando como um servidor remoto para armazenamento de dados, capaz de se comunicar em tempo real com o software BIM e o gêmeo digital da estrutura. O exemplo mostra o amplo campo de aplicação e as possibilidades que a combinação entre sensores e tecnologia oferece para a monitoramento de estruturas e sua vida útil, capaz de gerar informação estratégica para o monitoramento, controle e gerenciamento das estruturas.

Palavras-chave: Gêmeo Digital. *Building Information Modeling* (BIM). Monitoramento de estruturas. Arduino.

ABSTRACT

Digital twins are the virtual representation of an environment or a physical asset. It is not restricted to a traditional geometric model but is a data reference that can be used throughout the entire lifecycle of an asset. Digital twins are not restricted to a static dataset, as they communicate with their physical counterparts, store information, utilize technologies such as Artificial Intelligence (AI) and Internet of Things (IoT). This work aims, through exploratory bibliographical research, to analyze the relationship between the Digital Twin and a structure modeled in Building Information Modeling (BIM), through a structure monitoring application. An application of the Digital Twin was proposed in conjunction with BIM, installing a distance sensor coupled to a micro controller board (Arduino), functioning as a remote server for data storage, capable of communicating in real time with the BIM software and the digital twin of the structure. The example shows the broad field of application and the possibilities that the combination of sensors and technology offers for monitoring structures and their service life, capable of generating strategic information for monitoring, controlling and managing structures.

Keywords: *Digital Twin. Building Information Modeling. Monitoring structures. Arduino.*

[1]GALVÃO, G. A. de S.; CASTRO, H. G. de T.; COSTA, B. R. de B.; MICELI JUNIOR, G.; PELLANDA, P. C. Aplicação de Gêmeos Digitais em um Ambiente BIM de monitoramento de estruturas de edificações. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO, 4., 2023, Aracaju. **Anais** [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2023.

1 INTRODUÇÃO

Building Information Modeling (BIM) é uma metodologia construtiva de modelagem geométrica relativamente nova, onde seu principal objetivo é promover a integração, colaboração, comunicação e uma troca de informações mais efetivas. O BIM possibilita a observação do processo de construção do modelo digital, contendo geometria e informações precisas, que tem se desenvolvido rapidamente nos últimos anos e tem sido amplamente utilizada em muitos projetos de construção, e a prática provou que seu uso pode trazer muitos benefícios, aumentando produtividade e reduzindo custos e desperdícios (CRUZ *et al.*, 2022; CALIXTO *et al.*, 2022).

O *Digital Twin* representa uma mudança significativa no planejamento de projetos da indústria de construção, uma vez que permite a apresentação de edificações de maneira dinâmica no ambiente virtual. Permite que modificações nas estruturas possam ser simuladas e testadas antes que sejam aplicadas, como também prevê os impactos no entorno dessas eventuais mudanças.

O conceito do *Digital Twin* é útil para projetos de estruturas, pois apresenta o espaço físico com seus respectivos ativos, como um modelo virtual, com a possibilidade de inserção do usuário e monitoramento de dados em tempo real (CORREA, 2019).

A utilização do BIM na estrutura construída pode se beneficiar da aplicação da tecnologia *Digital Twin* para obter *feedback* em tempo real para atualizar tempestivamente o modelo de informação. O *Digital Twin* utiliza os dados que são acessíveis e relevantes para o modelo utilizado, os quais podem ser obtidos por meio de dispositivos conectados à *Internet of Things* (IoT). Os dados extraídos de sensores colocados nas estruturas das edificações podem coletar informações como, por exemplo: umidade, qualidade do ar, flambagem, tração, deslocamento, entre outros, com a finalidade de simular e prever possíveis interferências na edificação. (MACHADO; RUSCHEL, 2019).

O *Digital Twin* pode ser fundamental para o monitoramento de estruturas, podendo simular cenários imprevistos, de modo a evitar a ocorrência de acidentes e facilitar a detecção de ineficiências, o que pode evitar o acontecimento de potenciais catástrofes. Como a tecnologia *Digital Twin* possibilita a constante evolução do gêmeo digital com os dados recebidos do gêmeo físico, é possível realizar previsões em resposta às mudanças das condições de contorno em tempo real (FOLADOR, 2022).

A tecnologia do *Digital Twin* pode proporcionar a utilização de todo o potencial do ambiente BIM, por meio da conexão de dados e processos com o gerenciamento de informações bidirecional em tempo real (LEITE, 2022).

Diante do contexto apresentado, este trabalho tem por finalidade apresentar um projeto exploratório acerca do uso da tecnologia *Digital Twin* em ambiente BIM para estruturas de edificações. O trabalho é iniciado com esta introdução, a seguir é apresentada a metodologia e posteriormente é feita a fundamentação a respeito do BIM e do *Digital Twin*. Por fim, é descrito um exemplo de aplicação da tecnologia *Digital Twin* em um ambiente BIM para estruturas.

2 METODOLOGIA

A metodologia adotada para a realização deste artigo se consiste em uma pesquisa da literatura com caráter exploratório, descritivo e explicativo, com a finalidade de conceituar as grandes áreas tratadas no escopo da pesquisa e então buscar meios de integração delas. Para a concretização foram realizadas pesquisas e leituras de artigos encontrados em bases de dados (*Scopus*, *Web of Science* e *Engineering Village*).

O objetivo da pesquisa foi a fundamentação conceitual dos temas BIM e *Digital Twin*, encontrando as familiaridades dos temas, buscando maneiras e meios de integrá-los para uma utilização real de monitoramento de estruturas. No presente trabalho, será discutida a possibilidade de monitoramento de estruturas por sensores de baixo custo de investimento, por meio de uma adaptação do artigo de Scianna *et al.* (2022), analisando uma estrutura em tempo real conectado ao seu gêmeo digital através de um sistema de sensores conectados à *Internet of Things* (IoT). O uso de um programa RDBMS (*Relational Database Management System*) associado a um modelo BIM permite monitoramento em tempo real do comportamento da estrutura.

3 FUNDAMENTAÇÃO CONCEITUAL

A fundamentação conceitual teve como objetivo descrever e conceituar todas as grandes áreas desenvolvidas e utilizadas no artigo, sendo divididas nas seções *Building Information Modeling* (BIM), e *Digital Twin*.

3.1 *Building Information Modeling* (BIM)

O conceito BIM foi inicialmente desenvolvido por Charles M. Eastman, em 1975, onde em seus documentos, mesmo ainda não tendo a nomenclatura de "*Building Information Modeling*", o autor tratava o assunto como "*product model*", que informalmente traduzido para português, seria a "informação do modelo" (EASTMAN, 1975).

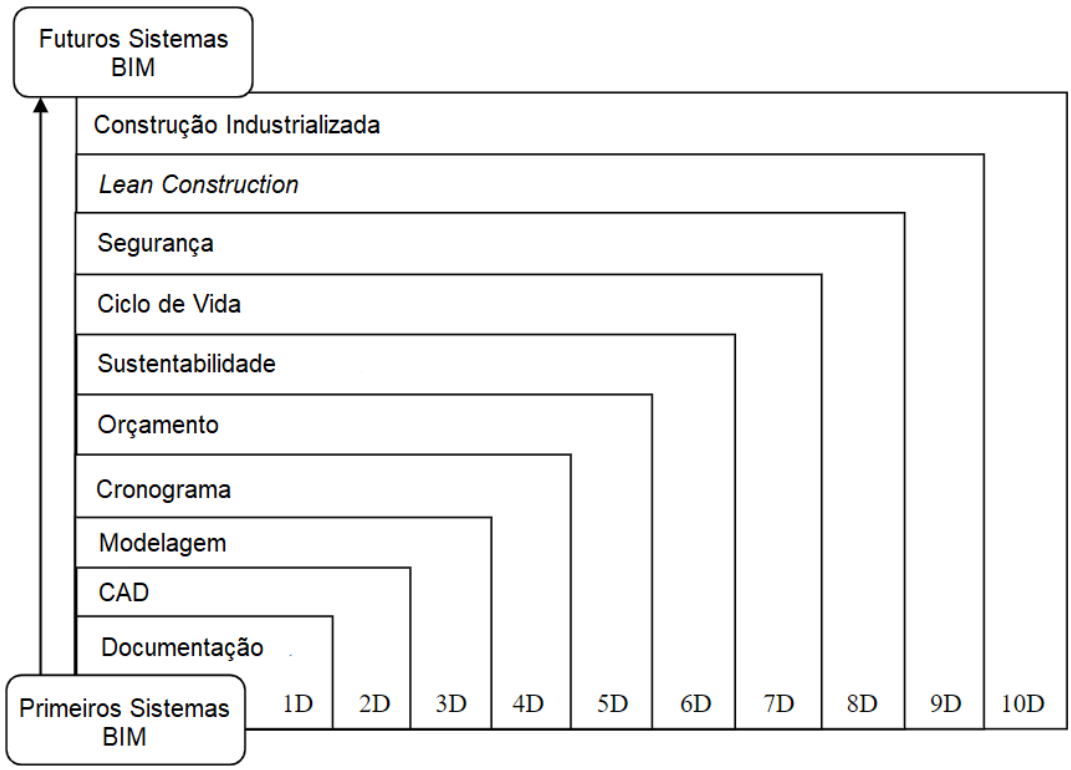
O primeiro artigo desenvolvido com o termo atualmente consagrado, BIM, veio a ser publicado somente em 1992, ocasião em que já era apontado o poder do trabalho colaborativo dentro do BIM. Ao decorrer da abordagem verificaram que, ao exemplo de um prédio, cada colaborador do projeto poderia ficar responsável por uma área de modelagem, aumentando assim sua produtividade (VAN NEDERVEEN; TOLMAN, 1992).

Succar, em 2009, definiu o BIM como se fosse um conjunto de 3 áreas distintas, que combinadas supriria todas as necessidades BIM, sendo as áreas: processos, tecnologias e pessoas. Por conseguinte, em 2012, apresentou os passos que conduzem as etapas do BIM, dividindo os em 5: Pré-BIM, Modelagem; Colaboração; Integração; e Pós-BIM (SUCCAR, 2009; SUCCAR; SHER; WILLIAMS, 2012).

Miceli Junior (2019, p. 43), descreve o BIM, como algo que "[...] representa o estado da arte do processo construtivo de edificações, uma revolução tão grande comparável com a que ocorreu na mudança do projeto em papel para o projeto feito em software CAD (*Computer Aided Design*)".

Ershadi *et al.* (2021), por outro lado, revela que o BIM atualmente está subdivido em 10 dimensões, mostradas na Figura 1 abaixo, de acordo com cada aplicabilidade. É mencionado ainda que as dimensões 1D a 7D, estão em bibliografias desde os anos 2000, porém, as dimensões 8D a 10D, como precisam de uma maior elaboração e desenvolvimento, ainda não estão sendo utilizadas, apenas há menções às mesmas.

Figura 1: Dimensões BIM



Fonte: Adaptado de (ERSHADI *et al.*, 2021).

O BIM 7D é a dimensão voltada à Gestão e Manutenção e/ou Ciclo de Vida, o que significa ao BIM uma integração adicional com os sistemas utilizados na fase de operação do ativo. Esta dimensão é uma das menos utilizadas atualmente, já que o processo construtivo, por parte da construtora, muitas vezes para na fase da entrega do ativo, ficando de responsabilidade do cliente a manutenção e operação, o qual não possui conhecimento específico para tal ato (BĄKOWSKI, 2017).

O uso do BIM 7D normalmente é o processo mais longo e único na construção, já que garante que tudo (estruturas, instalações, vedações, entre outros) no projeto permaneça em suas melhores condições desde a data de entrega do modelo até o dia em que a estrutura é demolida, sendo responsável não só pela gestão da edificação em si, mas também pela qualidade de vida do usuário na utilização da mesma (PIASECKIENĖ, 2022).

Apesar das diversas dimensões serem catalogadas, muitos autores e estudiosos não defendem essas nomenclaturas, já que o BIM possui diversas funções ainda não desenvolvidas e/ou descobertas, fazendo com que essas divisões um dia não façam mais sentido. Cite-se como exemplo a *Penn State University* (PSU), que listou os 25 principais Usos do BIM, divididos em 4 fases: Planejamento; Projeto; Construção; e Operação, sendo que a fase operacional abrigaria a área da gestão, controle e manutenção dos ativos (PSU, 2011).

Entretanto, Succar *et al.* (2016) listou mais possíveis aplicações do BIM, denominando-as como Usos do BIM, onde classificou em dois tipos: Usos Gerais e Usos Específicos. Atualmente, na última versão da tabela de usos do modelo (v. 1.26:2019) foram listados 128 Usos, sendo 52 Usos Gerais e 76 Usos Específicos (BIMe, 2019).

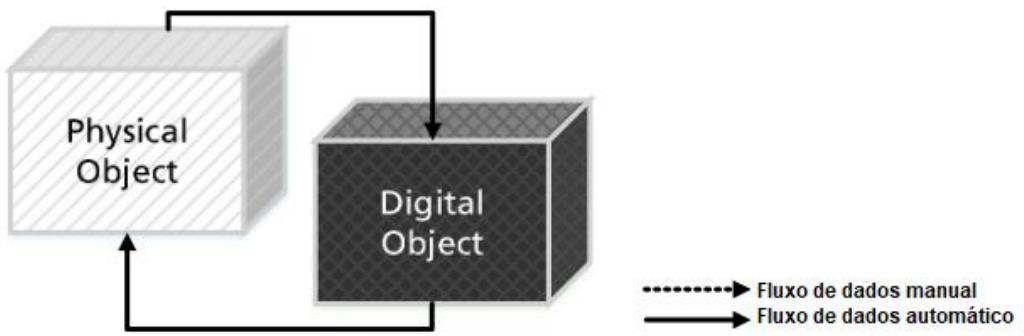
3.2 *Digital Twin* (DT)

O conceito de *Digital Twin*, ou se traduzido, gêmeo digital, foi inicialmente criado por Michael Grieves no ano de 2002 em uma apresentação à sua universidade (Universidade de Michigan), com o objetivo da formação de um centro de gerenciamento de ciclo de vida do produto. Posteriormente, em 2016, Grieves publicou um artigo no qual tinha como objetivo central definir o real conceito de *Digital Twin*, que segundo o autor, é "[...] um conjunto de construções de informação virtual que descreve completamente um produto manufaturado físico potencial ou real, do nível microatômico ao nível macrogeométrico." (GRIEVES, 2016, p. 2).

A primeira aplicação oficial do *Digital Twin* foi realizada em 2012 pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) em veículos da própria NASA e da Força Aérea Americana, com o principal objetivo de realizar simulações para verificar a saúde do veículo, histórico de dados e de manutenção, permitir níveis de segurança e confiabilidade. Glaessgen e Stargel (2012, p. 7), então, nesse estudo, definiram o *Digital Twin* como sendo uma "[...] simulação multifísica, multiescala, probabilística e de ultrafidelidade que reflete, em tempo hábil, o estado de um gêmeo correspondente baseado nos dados históricos, dados do sensor em tempo real e modelo físico."

Negri *et al.* (2017), definiram o *Digital Twin* como um modelo virtual e automatizado, que é capaz de realizar simulações de várias finalidades, utilizando-se da sincronização em tempo real de dados de campo. *Li et al.* (2022) complementaram que o *Digital Twin* cria um modelo virtual de uma entidade física, sendo capaz de interagir e integrar o modelo físico com informações, estabelecendo a confiabilidade dessas informações. Como é mostrado na Figura 2 adaptada de Kritzinger *et al.* (2018).

Figura 2: Fluxo de dados entre objetos



Fonte: Adaptado de (KRITZINGER *et al.*, 2018).

Digital Twin é uma maneira de alcançar uma construção inteligente, com a capacidade de fornecer um prévio diagnóstico de falhas e de simular impactos e interrupções em tempo real. Suas propriedades são o hiper-realismo, a computabilidade, a controlabilidade e a previsibilidade (IVANOV, 2020; XU *et al.*, 2019).

O conceito da Industria 4.0, que muitos estudiosos consideram como sendo a quarta revolução industrial, está em um momento de grande difusão, e para Tao *et al.* (2019), o *Digital Twin* é um dos conceitos mais promissores com relação a esta revolução, já que possui a alta capacidade de integrar-se com espaços cibernéticos e físicos. Já Maddikunta *et al.* (2022), acredita que a Indústria 5.0, ainda em desenvolvimento, será a próxima revolução industrial, e seu objetivo é integrar a capacidade criadora humana com a colaboração eficiente, inteligente e precisa de máquinas, para a obtenção de soluções eficientes, para isso, o DT será um grande aliado, já que estimula a interação entre real *x* virtual.

4 MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS EM EDIFICAÇÕES

O projeto estrutural – fundações, pilares, vigas e laje – é um dos principais projetos de toda a modelagem, se não o principal, ele é responsável por manter a edificação de pé, se caso não for bem executado e manutenido pode gerar diversas complicações no futuro, e por isso o monitoramento frequente das estruturas é importante para que se assegure o adequado desempenho delas em todo o ciclo de vida da edificação. A modelagem, a análise e a otimização estrutural são conceitos centrais no projeto estrutural e o desempenho de uma estrutura está relacionado a muitas variantes como deficiência no processo de projeto, execução, escoramento, utilização e causas naturais do ambiente em que ela se insere (LOPES *et al.*, 2021).

O campo de monitoramento de estruturas na indústria AECO (Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação) tornou-se cada vez mais importante e necessário considerando alguns eventos calamitosos factuais (SCIANNA *et al.*, 2022). Xu e Chen (2008) explicam que o dano estrutural ocorre quando há a modificação dos parâmetros estruturais (resistência, geometria, rigidez etc.) que podem comprometer o desempenho estrutural seja no Estado Limite de Serviço e Estado Último. São necessários trabalhos contínuos de manutenção como reforço e recuperação para garantir a segurança das estruturas durante sua vida útil, desta forma, as inspeções visuais têm sido a principal técnica de monitoramento de edifícios no mercado de Engenharia diagnóstica, porém esse método é útil apenas para estruturas simples e não para composições estruturais mais complexas.

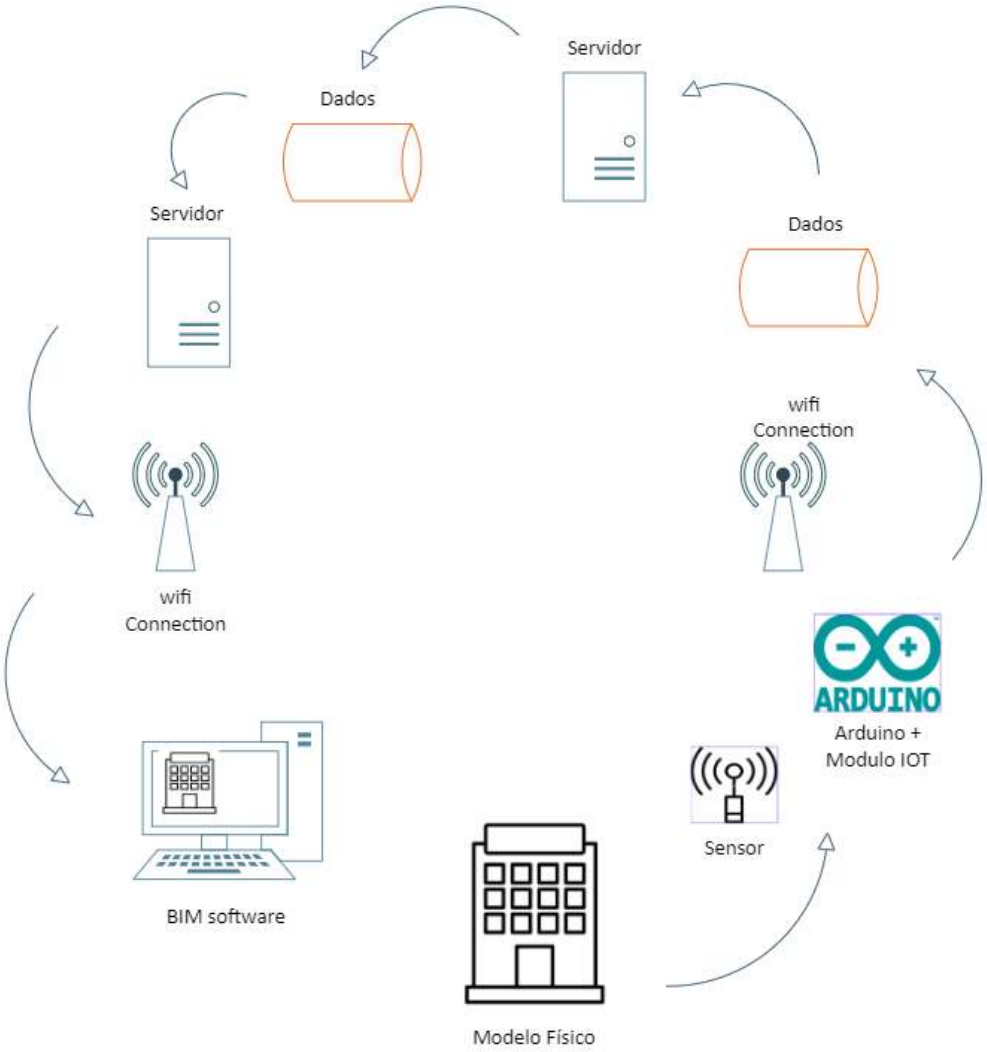
Neste cenário, Ferreira (2020) citou que o processo automático para monitoramento do comportamento estrutural de uma edificação, denominada *Structural Health Monitoring* (SHM), é uma técnica que nas últimas décadas abriu um leque de novas áreas de pesquisas em diferentes ramos da Engenharia. O método consiste em um sistema de monitoramento por sensores *in loco* de forma não destrutiva que permite o controle em tempo real do estado da estrutura considerada através da medição de parâmetros físico-mecânicos.

A disseminação da tecnologia BIM permitiu o emprego no monitoramento de dados de estruturas, conectando os *outputs* de dados dos sensores *in loco* e sua análise remota de dados. Scianna *et al.* (2022) citam que a integração do software BIM e da tecnologia de banco de dados de forma paramétrica permitem ao usuário a análise das estruturas, garantindo o alerta visual e o monitoramento da gestão das informações da estrutura. A recente aplicação de gêmeos digitais (modelo físico em tempo real conectado com sua representação virtual 3D por meio de um fluxo automático de dados) para estruturas contribuiu para fornecer feedback útil para tomada de decisão eficaz em riscos estruturais.

5 INTEGRAÇÃO ENTRE BIM E IOT PARA MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS

O sistema SHM já mencionado anteriormente, permite o monitoramento em tempo real da deflexão central de uma estrutura em relação ao seu eixo. Para isso, o sistema é composto por um sensor de distância localizado na face inferior da viga, uma placa micro controladora (Arduino UNO), um módulo de transmissão Wi-Fi para Arduino, um servidor remoto para armazenamento dos dados adquiridos pelo sensor, software BIM e um gêmeo digital da estrutura monitorada, por meio do qual o estado de deformação do feixe em tempo real pode ser mostrado como um alerta. O esquema está evidenciado na Figura 3.

Figura 3: Modelo de aplicação



Fonte: Autores, 2023.

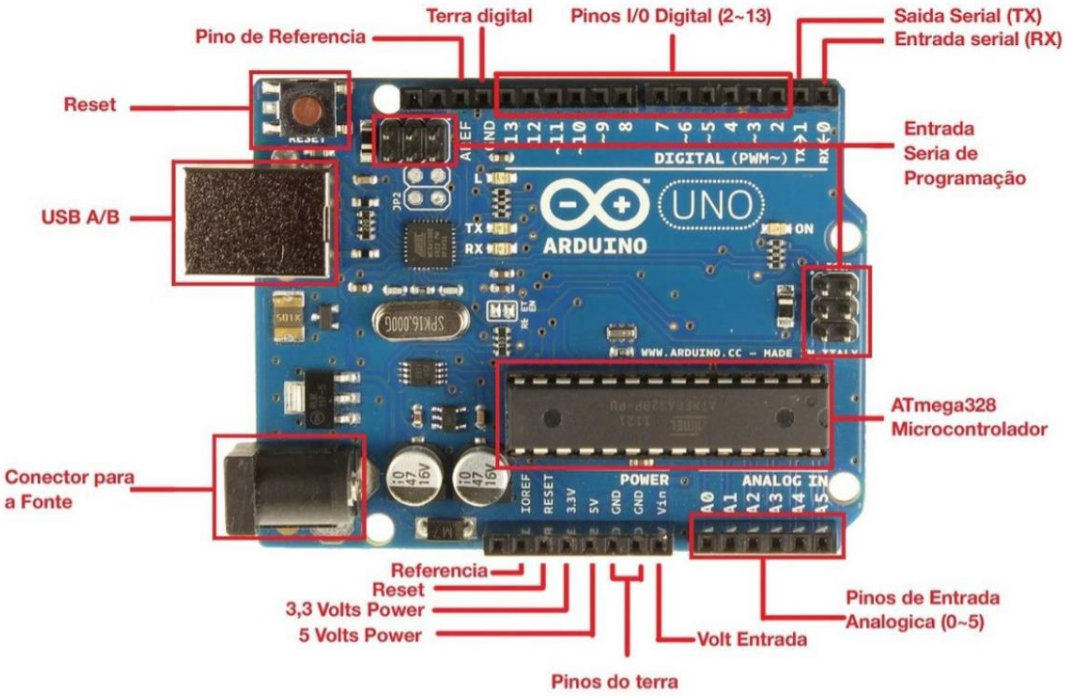
As medições feitas pelo sensor são enviadas para um servidor e carregadas, através de um código aberto PHP (*Hypertext Preprocessor*) intuitivo e com custo baixo, em um banco de dados criado no MySQL que é uma gerenciadora de dados. O software BIM, para o caso do artigo referência para este artigo, foi o Autodesk Revit programado por meio de sua API no Dynamo que é uma ferramenta de programação visual da própria Autodesk para evitar qualquer problema de interoperabilidade, para coletar automaticamente os dados inseridos no banco de dados, carregando as informações em um parâmetro do modelo 3D. (SCIANNA *et al.*, 2022).

A comunicação dos dados do sensor ao servidor de banco de dados é feita através da plataforma de *hardware* Arduino, à qual podem ser conectados sensores de diversos tipos, tanto analógicos quanto digitais, e módulos de comunicação Wi-Fi ou GPRS.

O Arduino, mostrado na Figura 4, segundo o *website* da própria plataforma, ele:

> [...] projeta, fabrica e oferece suporte a dispositivos e softwares eletrônicos, permitindo que pessoas em todo o mundo acessem facilmente tecnologias avançadas que interagem com o mundo físico. Nossos produtos são diretos, simples e poderosos, prontos para satisfazer as necessidades dos usuários, de estudantes a fabricantes e até desenvolvedores profissionais (ARDUINO, 2021).

Figura 4: Arduino

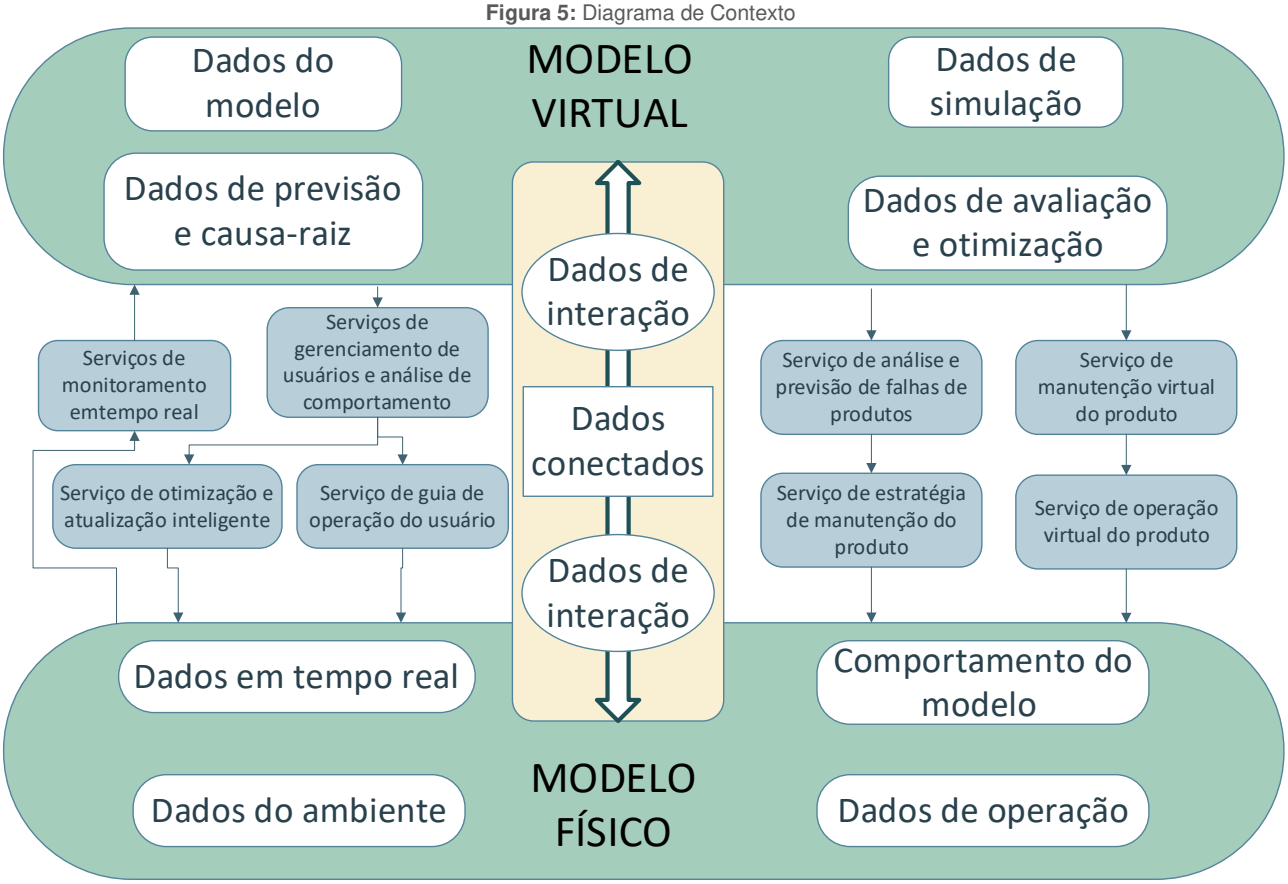


Fonte: (TECHSUL, 2022).

O esboço do diagrama de contexto do sistema é mostrado na Figura 5 a seguir, que descreve visualmente o escopo do modelo, mostrando um sistema de negócios (um processo, equipamentos, sistema computacional) mostrando a relação entre o modelo físico e o modelo virtual.

O escopo baseia-se em que o modelo físico (estrutura) instrumentado com o conjunto sensor + Arduino + modulo de transmissão envia dados em tempo real da deflexão da estrutura, propriedades mecânicas, temperatura do ambiente, comportamento da deflexão no tempo ao modelo virtual no software paramétrico escolhido, desta forma o usuário do software BIM assim como o Administrador conseguem ter previsibilidade por meio simulações do comportamento da estrutura e assim realizar uma manutenção preditiva através da identificação da causa raiz.

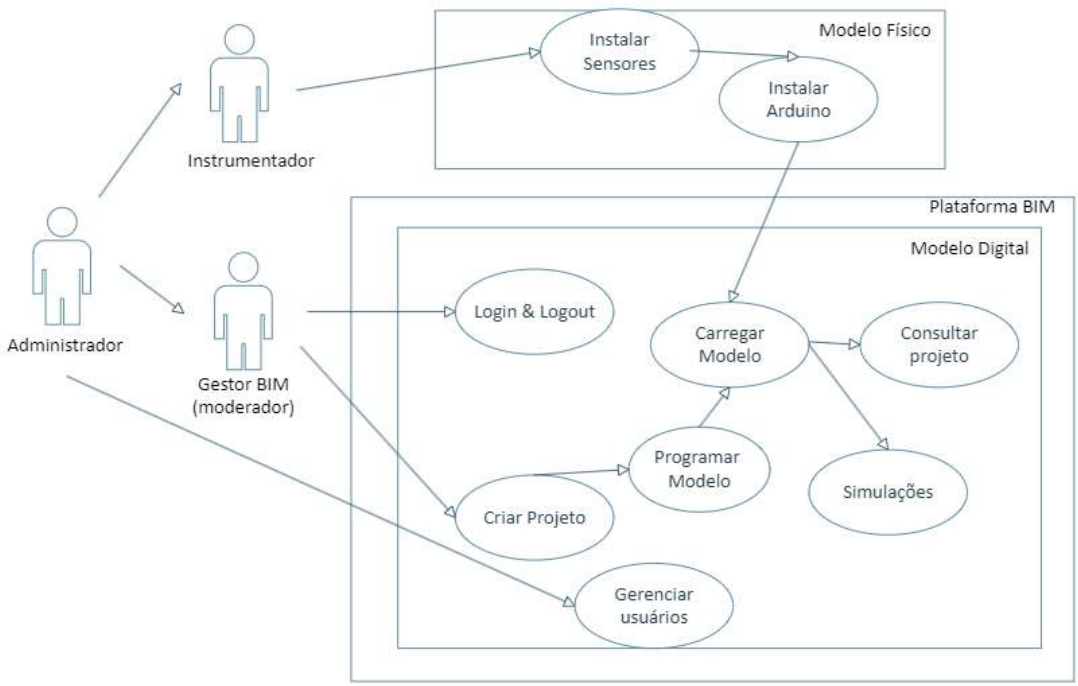
Figura 5: Diagrama de Contexto



Fonte: Autores, 2023.

Para este artigo, o diagrama de caso de uso em UML que demonstra a interação do usuário com o sistema, é mostrado na Figura 6. O diagrama ilustra as três principais partes interessadas do processo: um instrumentador que realiza a instalação do conjunto junto aos servidores e consequentemente ao software BIM. O gestor BIM, que modela e programa o modelo com as informações fornecidas pelo banco de dados dos servidores. O administrador do sistema, que gerencia os recursos dentro do projeto.

Figura 6: Diagrama de Caso de Uso

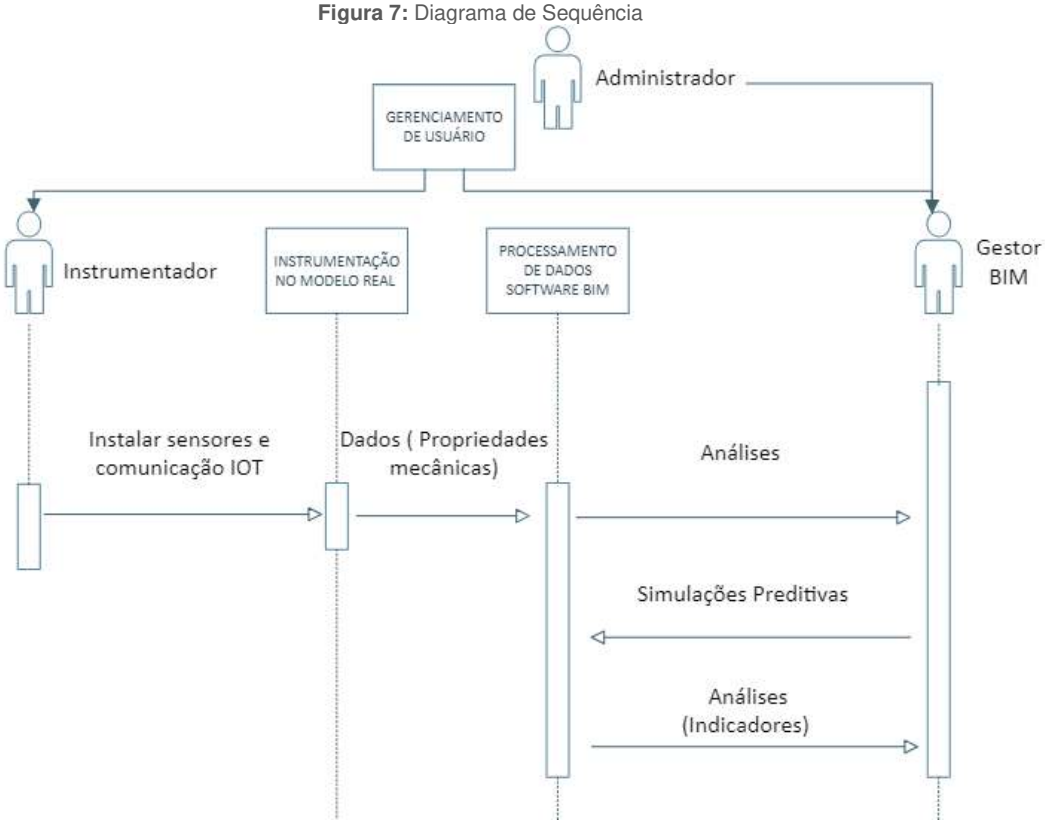


Fonte: Autores, 2023.

O diagrama de sequência em UML demonstra o processo de interações entre objetos de um cenário, dando ordenação temporal em que as informações são trocadas dentro de um sistema, exemplificado na Figura 7.

Os *inputs* e *outputs* ocorrem dentro de 3 grandes atividades: o gerenciamento de usuário; a instrumentação no modelo real; e o processamento de dados do software BIM. Os sensores e comunicação em IoT são instalados no modelo real (físico), tendo como *outputs* dados de deflexão, propriedades mecânicas e temperatura servindo como *input* ao software BIM, desta forma o Gestor BIM extrai análises, indicadores e realiza simulações para tomada de decisão do Administrador junto aos clientes.

Figura 7: Diagrama de Sequência



Fonte: Autores, 2023.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O exemplo de aplicação da tecnologia *Digital Twin* no ambiente BIM destaca o amplo campo de aplicação e as enormes possibilidades que a combinação entre sensores e tecnologia oferece para a monitoramento de estruturas e sua vida útil. Uma simples medida de distância, aplicada à linha central intradorso de uma viga e conectada *online* à representação BIM virtual do modelo, torna-se uma informação estratégica para o monitoramento, controle e gerenciamento das estruturas.

O *Digital Twin* possibilita simulações em diferentes cenários e avaliações de riscos associados às decisões de engenharia como também financeiros para proprietários dos negócios, fornece subsídios e informações mais confiáveis para os *stakeholders* dos projetos, auxilia a gestão e a manutenção das estruturas e facilita a elaboração de estratégias de longo prazo.

A tecnologia *Digital Twin* em ambiente BIM pode ser peça fundamental para a construção das cidades do futuro. Pode auxiliar não apenas no monitoramento em tempo real de estruturas, mas também fornecer subsídios relevantes para a tomada de decisões relativas ao planejamento urbano.

Espera-se que, em breve, a tecnologia *Digital Twin* possa ser aplicada de maneira integrada ao processo BIM, com a finalidade de proporcionar melhores percepções em um ambiente. O valor das informações obtidas por meio dessa integração vai além de um projeto único. Os dados capturados podem ser alimentados nas fases de concepção, planejamento de design de novos projetos, com a utilização do aprendizado de dados para melhoria contínua dos sistemas e desenvolvimento de novos sistemas como o próprio metaverso.

7 AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e do Instituto Militar de Engenharia (IME).

REFERÊNCIAS

ARDUINO, *online*. 2021. About Arduino. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/about>. Acesso em: 18 abr. 2023.

BĄKOWSKI, J. Analytical Tools for Functional Assessment of Architectural Layouts. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, 2017.

BIMe. Model Uses List. **BIMe Initiative**. 2019. Australia, v. 1.26.

CALIXTO, C. L.; MICELI JUNIOR, G.; PELLANDA, P. C. Fluxo de Trabalho Automatizado para Otimização Multiobjetivo de Vigas de Concreto Armado. **Gestão & Tecnologia de Projetos**. São Carlos, v17, n2, 2022.

CORREA, L. A. MÉTODO PARA FORMULAÇÃO DE PACOTES DE TRABALHO PARA OBRAS REPETITIVAS COM O USO DO BIM 4D. 95 p. Dissertação (Mestrado) – **Pós-Graduação em Engenharia Civil**, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2019.

CRUZ, R. B. A.; SANTOS, E. R.; AZEVEDO, G. A. N. BIM & Avaliação Pós-ocupação: proposta de integração a partir das recomendações da NBR ISO 19650. In: **ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, 19., 2022, Canela. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. 1-12.

EASTMAN, C. The Use of Computers Instead of Drawings in Building Design. **AIA Journal**, v. 63, jan. 1975.

ERSHADI, M. *et al.* Implementation of Building Information Modelling in infrastructure construction projects: a study of dimensions and strategies. **International Journal of Information Systems and Project Management**, v. 9, n. 4, p. 43–59, 2021.

FERREIRA, A. 2020. SHM (Structural Health Monitoring) na Indústria 4.0. Disponível em: <https://kotengenharia.com.br/shm-structural-health-monitoring-na-industria-4-0/> Acesso em: 18 abr. 2023.

FOLADOR, B. M. Potenciais aplicações de tecnologias da Construção 4.0 em sistemas construtivos modulares em estrutura de aço. 77 p. Trabalho de Conclusão de Curso II (Graduação) – **Graduação em Engenharia Civil**, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2022.

GLAESSGEN, E. H.; STARGEL, D. S. The *Digital Twin* Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. Em: **53RD AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC STRUCTURES, STRUCTURAL DYNAMICS AND MATERIALS CONFERENCE - SPECIAL SESSION ON THE *DIGITAL TWIN***. Honolulu, HI: 16 abr. 2012.

GRIEVES, M. Origins of the digital twin concept. **Florida Institute of Technology**, v. 8, 2016.

IVANOV, D. Predicting the impacts of epidemic outbreaks on global supply chains: A simulation-based analysis on the coronavirus outbreak (COVID-19/SARS-CoV-2) case. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 136, p. 101922, 1 abr. 2020.

KRITZINGER, W. *et al. Digital Twin* in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine, **16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM** 2018. v. 51, n. 11, p. 1016–1022, 1 jan. 2018.

LEITE, G. E. V. Estudo do impacto da quarta revolução industrial na cadeia produtiva da indústria da construção civil no Agreste Pernambucano. 95 p. Dissertação (Mestrado) – **Pós-Graduação em Engenharia de Produção**, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2022.

LI, L.; LEI, B.; MAO, C. *Digital Twin* in smart manufacturing. **Journal of Industrial Information Integration**, v. 26, p. 100289, mar. 2022.

LOPES, L. dos R.; MICELI JUNIOR, G.; PELLANDA, P. C. Fluxo de trabalho digital para otimização de projetos estruturais paramétricos. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO**, 3., 2021, Uberlândia. Anais [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2021. p. 1-14.

MACHADO, F. A.; RUSCHEL, R. C. Implementação de solução BIM/IoT para suporte à gestão de energia da edificação. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO**, 2., 2019, Campinas, SP. Anais[...]. Porto Alegre: ANTAC, 2019.

MADDIKUNTA, P. K. R. *et al.* Industry 5.0: A survey on enabling technologies and potential applications. **Journal of Industrial Information Integration**, v. 26, mar. 2022.

MICELI JUNIOR, G. Modelagem de Informação da Construção para Gestão de Projetos de Obra de Infraestrutura de Defesa. 263 p. Tese (Doutorado) – **Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Defesa**, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2019.

NEGRI, E.; FUMAGALLI, L.; MACCHI, M. A Review of the Roles of *Digital Twin* in CPS-based Production Systems. **Procedia Manufacturing**, v. 11, p. 939–948, 2017.

PIASECKIENĖ, G. Dimensions of BIM in literature: Review and analysis. **Mokslas–Lietuvos ateitis/Science–Future of Lithuania**, v. 14, 2022.

PSU. Pennsylvania State University. Project Execution Planning Guide. **Pennsylvania State University**, 2011. v. 2.1.

SCIANNA, A.; GAGLIO, G. F.; LA GUARDIA, M. Structure monitoring with BIM and IoT: The case study of a bridge beam model. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 11, n. 3, p. 173, 2022.

SUCCAR, B. Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. **Automation in Construction**, v. 18, n. 3, p. 357–375, maio 2009.

SUCCAR, B.; SHER, W.; WILLIAMS, A. Measuring BIM performance: Five metrics. **Architectural Engineering and Design Management**, v. 8, n. 2, p. 120–142, maio 2012.

SUCCAR, B., SALEEB, N., SHER, W. Model Uses: Foundations for a Modular Requirements Clarification Language, **Australasian Universities Building Education (AUBEA2016)**, Cairns, Australia, July 6-8, 2016.

TAO, F. *et al. Digital Twin* in Industry: State-of-the-Art. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 15, n. 4, p. 2405–2415, abr. 2019.

TECHSUL, *online*. 2022. Arduino UNO. Disponível em: <https://techsuleletronicos.com.br/product/arduino-uno-com-atmega328-r3/>. Acesso em: 18 abr. 2023.

VAN NEDERVEEN, G. A.; TOLMAN, F. P. Modelling multiple views on buildings. **Automation in Construction**, v. 1, n. 3, p. 215–224, dez. 1992.

XU, Y. *et al.* A Digital-Twin-Assisted Fault Diagnosis Using Deep Transfer Learning. **IEEE Access**, v. 7, p. 19990–19999, 2019.

XU, Y. L.; CHEN, B. Integrated vibration control and health monitoring of building structures using semi-active friction dampers: Part I – Methodology. **Engineering Structures**, v. 30, n. 7, p. 1789-1801, 2008.

ZOTERO. **Zotero | Your personal research assistant**. Disponível em: <https://www.zotero.org/>. Acesso em: 18 abr. 2023.