

Ensaio não destrutivo, digitalização e gêmeos digitais em edifícios históricos: uma revisão sistemática

Non-destructive testing, digitization, and digital twins in historic buildings: a systematic review

Ensayos no destructivos, digitalización y gemelos digitales en edificios históricos: una revisión sistemática

Júlia Amâncio Fonseca* 

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais; Departamento de Engenharia Civil; Programa de pós-graduação em Engenharia Civil. Belo Horizonte (MG), Brasil. juliafonsecan@gmail.com

Rachel Jardim Martini Santos 

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais; Departamento de Engenharia Civil; Programa de pós-graduação em Engenharia Civil. Belo Horizonte (MG), Brasil.

Rogério Cabral de Azevedo 

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais; Departamento de Engenharia Civil; Programa de pós-graduação em Engenharia Civil. Belo Horizonte (MG), Brasil.

* Autor correspondente.

CRediT

Contribuição de autoria: Análise: FONSECA, J. A.; SANTOS, R. J. M.; DE AZEVEDO, R. C.; Concepção; Metodologia: FONSECA, J. A.; DE AZEVEDO, R. C.; Validação; Visualização: SANTOS, R. J. M.; DE AZEVEDO, R. C.; Redação - revisão e edição: FONSECA, J. A.; Supervisão: SANTOS, R. J. M.; Curadoria de dados; Coleta de dados; Software; Redação – rascunho original: FONSECA, J. A.

Conflitos de interesse: Os autores certificam que não há conflito de interesse.

Financiamento: Não possui.

Aprovação de ética: Os autores certificam que não houve necessidade de aprovação de Comitê de Ética.

Uso de IA: Os autores certificam que não houve uso de inteligência artificial na elaboração do trabalho

Editores responsáveis: Daniel Sant'Ana (Editor-Chefe); Vanda Alice Zanoni (Editora Associada); Pedro G. Cardoso (Assistente editorial).

Resumo

A preservação do patrimônio construído é uma prática essencial, pois esses bens reúnem valores históricos, culturais e técnicos cuja degradação ou perda compromete, de forma irreversível, a memória coletiva. As edificações de interesse histórico exigem inspeções e monitoramentos constantes que, em muitos casos, não devem causar alterações ou danos em sua estrutura. Diante disso, este artigo busca investigar técnicas para acompanhamento da saúde de edificações de interesse histórico. Para isto, empregou-se o método Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA), que orientou a seleção e a análise dos artigos científicos, permitindo a elaboração de uma revisão sistemática de literatura (RSL) de forma estruturada. O enfoque da pesquisa foi nos ensaios não destrutivos e nas técnicas de digitalização e criação de gêmeos digitais, que se relacionam diretamente aos estudos de caracterização e documentação do patrimônio construído. Os resultados revelaram que a inspeção visual, o Ground Penetrating Radar (GPR) e a Termografia Infravermelha (IRT) são amplamente utilizados para a caracterização de edifícios históricos. A digitalização para a criação de gêmeos digitais no patrimônio construído vem sendo realizada por meio de fotografias, fotogrametria e varredura a laser móvel, com o intuito de monitorar processos de deterioração, entre outras contribuições para a área da conservação.

Palavras-chave: Ensaio não destrutivo; Monitoramento; Patrimônio construído; PRISMA; Revisão sistemática.

Abstract

The preservation of built heritage is an essential practice, as these assets embody historical, cultural, and technical values whose degradation or loss irreversibly compromises collective memory. Buildings of historical interest require continuous inspections and monitoring that, in many cases, must not cause alterations or damage to their structure. In this context, this article aims to investigate techniques for monitoring the structural health of buildings of historical interest. To this end, the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) method was employed, guiding the selection and analysis of scientific articles and enabling the development of a structured systematic literature review (SLR). The research focused on non-destructive testing methods and on digitization techniques and digital twin creation, which are directly related to studies on the characterization and documentation of built heritage. The results revealed that visual inspection, Ground Penetrating Radar (GPR), and Infrared Thermography (IRT) are widely used for the characterization of historic buildings. Digitization for the creation of digital twins in built heritage has been carried out through photography, photogrammetry, and mobile laser scanning, with the aim of monitoring deterioration processes, among other contributions to the field of conservation.

Key-words: Non-destructive testing; Monitoring; Built heritage; PRISMA; Systematic review.

Resumen

La preservación del patrimonio construido es una práctica esencial, ya que estos bienes reúnen valores históricos, culturales y técnicos cuya degradación o pérdida compromete de manera irreversible la memoria colectiva. Las edificaciones de interés histórico requieren inspecciones y monitoreos constantes que, en muchos casos, no deben causar alteraciones ni daños en su estructura. En este contexto, el presente artículo tiene como objetivo investigar técnicas para el seguimiento del estado de conservación de edificaciones de interés histórico. Para ello, se empleó el método Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA), que orientó la selección y el análisis de los artículos científicos, permitiendo la elaboración de una revisión sistemática de la literatura (RSL) de forma estructurada. La investigación se centró en los ensayos no destructivos y en las técnicas de digitalización y creación de gemelos digitales, que se relacionan directamente con los estudios de caracterización y documentación del patrimonio construido. Los resultados revelaron que la inspección visual, el Ground Penetrating Radar (GPR) y la Termografía Infrarroja (IRT) son ampliamente utilizados para la caracterización de edificios históricos. La digitalización para la creación de gemelos digitales en el patrimonio construido se ha realizado mediante fotografías, fotogrametría y escaneo láser móvil, con el objetivo de monitorear los procesos de deterioro, entre otras contribuciones al campo de la conservación.

Palabras-clave: Ensayos no destructivos; Monitoreo; Patrimonio construido; PRISMA; Revisión sistemática.

1 Introdução

O patrimônio cultural material representa um conjunto de bens de valor histórico e construtivo, cuja preservação é associada à memória e à identidade. No cenário atual, as construções históricas são expostas a diversos fatores ambientais e estruturais que dificultam a manutenção da vida útil, como o intemperismo, eventos sísmicos e o envelhecimento natural. Em vista da degradação que ocorre nos edifícios de interesse históricos e a necessidade de manutenção ao longo do tempo, identificar os desgastes e ter meios para orientar intervenções é fundamental (Novais et al., 2024; Chik et al., 2024).

Estudos indicam que, na presente década, a degradação das edificações de interesse histórico tem sido influenciada pela poluição atmosférica e pelas mudanças climáticas, além do surgimento de manifestações patológicas ao longo do envelhecimento. As mudanças climáticas apresentam novos desafios à proteção e à conservação do patrimônio construído, especialmente em áreas urbanas, onde seus efeitos tendem a ser intensificados (Garrido et al., 2020; Sardella et al., 2020; Ricciardi et al., 2021).

Arelada a isto, a digitalização do patrimônio construído tem sido entendida como uma estratégia de documentação, análise e gestão de edificações de interesse histórico. As técnicas não destrutivas de aquisição de dados, como o scanner a laser e a fotogrametria, permitem a reprodução do patrimônio construído, tornando-o acessível a pessoas em diferentes partes do mundo. Embora a digitalização apresente desafios por envolver uma multidisciplinaridade, ela viabiliza a acessibilidade e a produção de bancos de dados sobre o patrimônio histórico, contribuindo para projetos de restauro destas edificações (Vieira et al., 2023).

No âmbito da preservação do patrimônio construído, o conceito de gêmeos digitais, apresentado como modelos digitais, é entendido como uma representação tridimensional baseada na modelagem da informação de edificações de interesse histórico (3D-HBIM). Esse modelo permite demonstrar o estado das edificações de interesse histórico, de modo detalhado e em tempo real. Os gêmeos digitais são utilizados para capturar e representar virtualmente dados físicos que possuem significados culturais e contribuem para a conservação preventiva, por meio de simulações, em vista dos dados de Monitoramento de Saúde Estrutural – MSE (Jouan; Hallot, 2020; Lucchi, 2023; Galiano-Garrigós et al., 2024).

Diante do cenário de uso de ferramentas digitais integradas, que incluem sistemas de monitoramento e gêmeos digitais, aplicado ao patrimônio construído, esta pesquisa tem por objetivos (i) investigar como o uso de ensaios não destrutivos auxiliam na preservação de edificações de interesse histórico e (ii) apresentar quais contribuições as técnicas de digitalização ou gêmeos digitais oferecem às construções históricas. Para atingir os objetivos propostos, o método de revisão sistemática Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses (PRISMA) foi adotado. As descobertas podem auxiliar pesquisadores no conhecimento de técnicas de aquisição de dados para edificações de interesse histórico.

2 Materiais e Métodos – Revisão Sistemática de Literatura

Para a Revisão Sistemática de Literatura (RSL), adotou-se o método *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA), amplamente reconhecido por

sua transparência, reprodutibilidade e rigor metodológico. O protocolo PRISMA tem sido empregado em estudos recentes na área da Engenharia Civil e do ambiente construído (Costa; Lima, 2023; Noeme et al., 2023; Marcondes; Luiz Rutz Silva, 2022; Page et al., 2022), especialmente em revisões que envolvem múltiplas técnicas e abordagens metodológicas.

O processo metodológico seguiu as diretrizes estabelecidas pelo PRISMA 2020, estruturando-se nas etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos. A aplicação dessas etapas permitiu assegurar a seleção criteriosa de artigos científicos alinhados aos objetivos da pesquisa, reduzindo vieses e garantindo a rastreabilidade do processo de revisão.

Neste estudo, foram definidos dois enfoques de pesquisa, cada um associado a um objetivo específico e às respectivas perguntas de pesquisa:

(i) De que forma os ensaios não destrutivos auxiliam na preservação do patrimônio construído?

(ii) Quais as conclusões vêm sendo obtidas com técnicas de monitoramento digitais em edificações de interesse histórico?

Esses enfoques orientaram tanto a estratégia de busca quanto os critérios de seleção dos estudos, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Enfoques de pesquisa e objetivos específicos.



2.1 Seleção bibliográfica

A busca bibliográfica foi realizada em bases de dados científicas de relevância — Scopus e Web of Science — e abrangeu artigos publicados sem restrição temporal, até a data limite de 12 de novembro de 2024. Optou-se pela utilização da busca avançada, considerando a ocorrência dos termos no título, resumo e palavras-chave, de modo a garantir maior aderência temática dos resultados.

As combinações dos termos de busca foram definidas com base nos enfoques de pesquisa e nos objetivos do estudo, conforme apresentado na Tabela 1. Após a identificação inicial, todos os registros recuperados foram exportados para o gerenciador de referências Mendeley, onde foram removidos os registros duplicados.

Tabela 1: Número de artigos encontrados com as buscas.

Combinação dos termos de busca	Scopus	Web of Science
"heritage buildings" AND "digitalization"	72	06
"heritage buildings" AND "non-destructive testing"	54	21
"heritage buildings" AND "digital twins"	51	09

Na etapa de triagem, foi realizada a leitura dos títulos e resumos, excluindo-se os artigos que não apresentavam relação direta com o patrimônio construído, que não empregavam ensaios não destrutivos ou técnicas digitais ou que tratavam exclusivamente de outros tipos de edificações. Em seguida, na fase de elegibilidade, os textos completos dos artigos remanescentes foram analisados integralmente.

Os critérios de inclusão adotados foram:

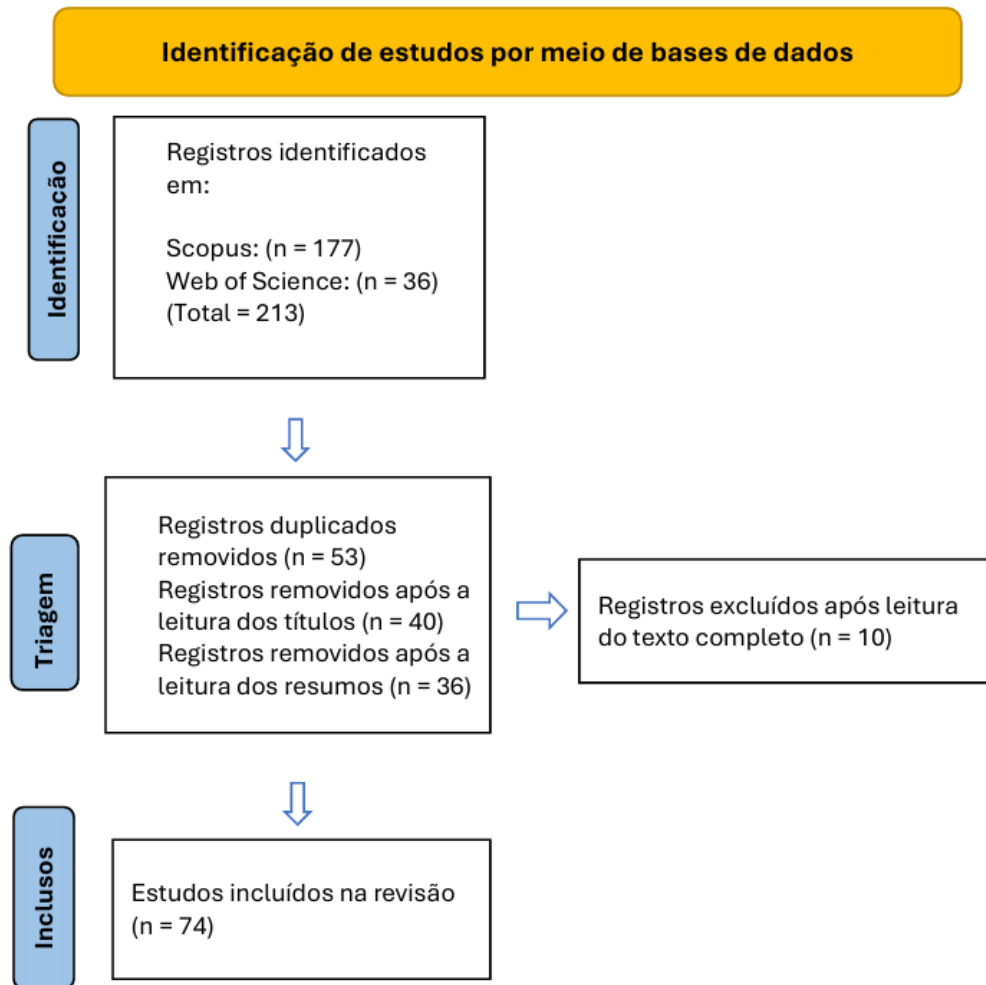
- estudos aplicados a edificações de interesse histórico ou patrimônio construído;
- uso de ensaios não destrutivos para inspeção, diagnóstico ou monitoramento;
- aplicação de técnicas de digitalização, modelagem digital ou gêmeos digitais;
- artigos revisados por pares e publicados em periódicos científicos.

Os critérios de exclusão compreenderam:

- estudos duplicados entre as bases de dados;
- trabalhos que não apresentavam aplicação prática ou discussão metodológica relevante;
- publicações do tipo resumos de eventos, notas técnicas, editoriais ou capítulos de livros.

O processo de seleção seguiu as etapas do fluxograma PRISMA, apresentado na Figura 2, que demonstra o procedimento metodológico adotado.

Figura 2: Etapas para a seleção dos artigos.



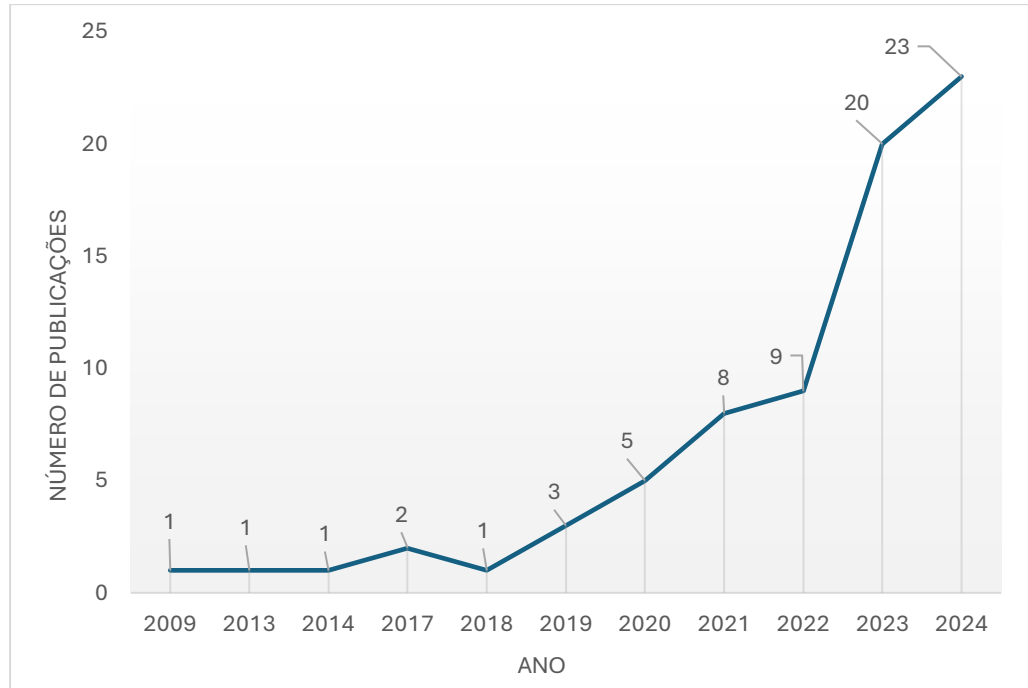
Fonte: Adaptado de Page et al. (2021).

2.2 Análise bibliométrica

Nesta seção, foi avaliada a relevância científica dos periódicos. O portfólio final de pesquisa foi composto por 74 publicações. A análise bibliométrica foi conduzida com base em critérios contemporâneos de relevância científica, considerando a indexação dos periódicos em bases internacionais, como Scopus e Web of Science, bem como indicadores bibliométricos amplamente aceitos, tais como o *CiteScore* e *Journal Impact Factor* (JIF), quando disponíveis.

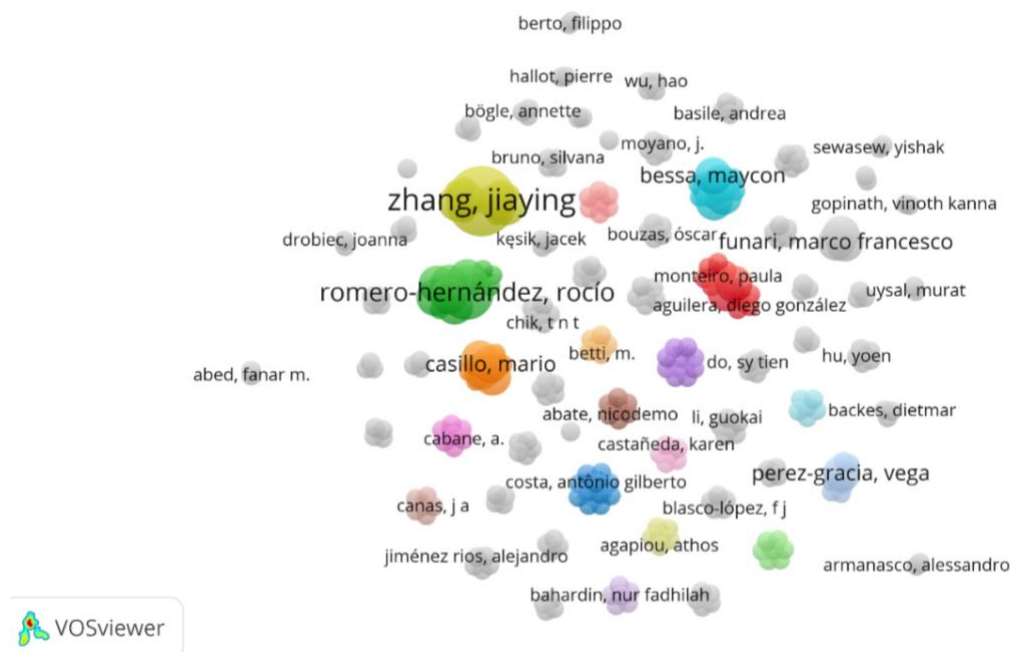
A evolução temporal das publicações relacionadas ao uso de ensaios não destrutivos e de tecnologias digitais aplicadas ao patrimônio construído foi analisada a partir do número total de artigos incluídos na revisão, conforme apresentado na Figura 3. O primeiro estudo identificado foi publicado em 2009, indicando o início da aplicação sistemática dessas técnicas no contexto patrimonial. A partir de 2019, observa-se um crescimento significativo e contínuo no número de publicações, refletindo o avanço tecnológico, a ampliação do uso de ferramentas digitais e o aumento do interesse científico em estratégias de monitoramento e conservação não invasivas para edificações históricas.

Figura 3: Evolução temporal das publicações relacionadas ao tema, no período de 2009 a 2024.



Quanto à relevância dos autores e das palavras-chave, estas foram analisadas com o auxílio do software VOSviewer (Van Eck; Waltman, 2023). Ao observar a rede de autores, nota-se que há divisão dos autores em grupos sem conexões entre os mesmos, o que reflete a ausência de colaboração entre grupos de autores e instituições. Isso pode ser justificado devido aos estudos, em maior número, serem de países ou regiões diferentes, o que não proporciona estudos conjuntos destes autores. A Figura 4 demonstra a imagem gerada.

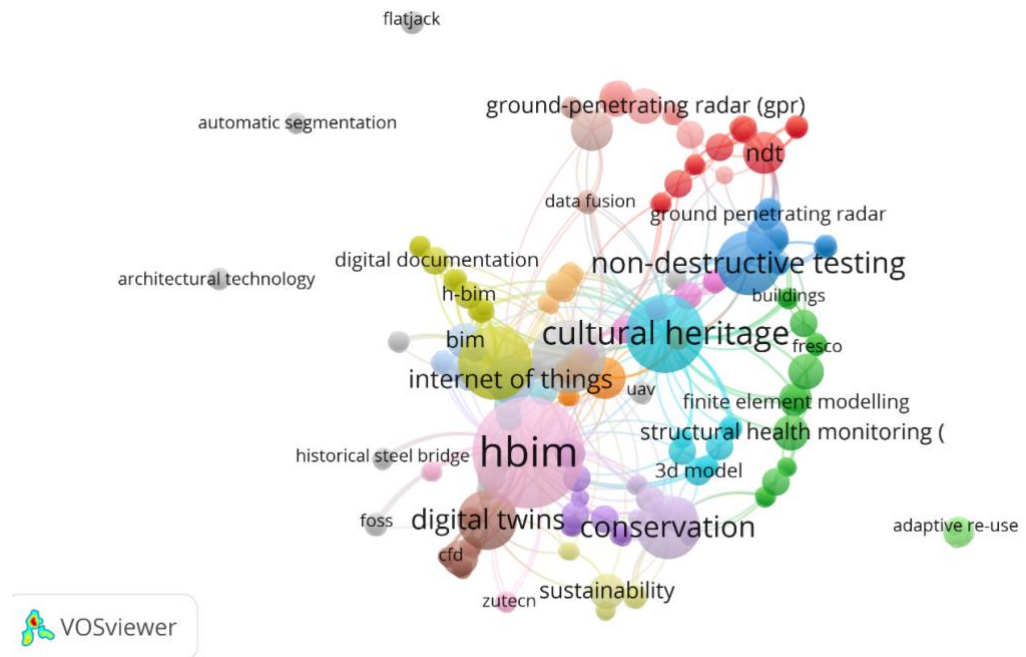
Figura 4: VOSviewer dos autores.



Fonte: VOSviewer (2025).

Em vista da rede de co-ocorrência de palavras-chave criada, considerando os artigos selecionados, 281 palavras-chave foram agrupadas pelo software. As palavras-chave que mais se destacaram foram, respectivamente: (i) HBIM, (ii) cultural heritage, (iii) heritage buildings, (iv) conservation, (v) non-destructive testing e (vi) digital twins. Pela Figura 5, observa-se claramente que diversos termos apresentam conexão devido à formação das redes. As temáticas referentes aos ensaios não destrutivos, à digitalização e aos gêmeos digitais mostram forte relação no contexto dos estudos sobre patrimônio cultural.

Figura 5: VOSviewer das palavras-chave.



Fonte: VOSviewer (2025).

Os estudos analisados contemplaram diferentes contextos geográficos, incluindo Europa, Ásia, Oriente Médio e América Latina, com destaque para países que concentram significativo acervo patrimonial, como Itália, Espanha, China, Turquia e Brasil. Ainda assim, observa-se menor número de publicações indexadas provenientes de outras regiões historicamente relevantes, o que reforça a necessidade de ampliação da produção científica internacional nesse campo.

3 Resultados e discussões

Ao considerar os 74 artigos lidos na RSL, os autores procuraram resposta às duas perguntas de pesquisa que nortearam essa produção. Do número total, 20 (vinte) artigos direcionam respostas à pergunta de pesquisa (i) “De que forma os ensaios não destrutivos auxiliam na preservação do patrimônio construído?”; 47 (quarenta e sete) artigos à pergunta de pesquisa (ii) “Quais as conclusões vêm sendo obtidas com técnicas de monitoramento digitais em edificações de interesse histórico?” e 07 (sete) artigos contribuíram para responder às duas perguntas simultaneamente.

3.1 Ensaio não destrutivo

O enfoque de pesquisa relacionada aos ensaios não destrutivos mostra-se fundamental no estudo do patrimônio construído, uma vez que permite compreender de que forma

essas técnicas podem ser aplicadas para a caracterização de sistemas construtivos históricos, o que contribui diretamente para a resposta à primeira pergunta de pesquisa.

Estudos recentes demonstram que diferentes ensaios não destrutivos (END) possibilitam a identificação de técnicas construtivas e mecanismos de deterioração, sem a necessidade de intervenções invasivas ou danos às estruturas históricas. Nesse contexto, a termografia infravermelha tem sido empregada para a detecção de descontinuidades internas, mapeamento de áreas com umidade, identificação de vazios e estimativa da textura e heterogeneidade da alvenaria sob camadas de reboco, pinturas ou afrescos (Gusella; Cluni; Liberotti, 2020; Patrucco et al., 2022; Froner et al., 2024).

Ademais, observa-se que os ENDs são vistos como meios menos invasivos para estudar o comportamento estrutural das alvenarias em construções históricas, amenizando a necessidade de técnicas invasivas. Um outro fator importante sobre o uso dessas técnicas em construções históricas é a possibilidade de revelação de detalhes históricos cobertos por restaurações anteriores (Frackiewicz; Raszczuk; Jasieńko, 2024; Santos-Assunção et al., 2014; Pérez-Gracia et al., 2013; Artopoulos et al., 2024; Guadagnuolo et al., 2023; Pérez-Gracia et al., 2009; Vidovszky, 2017; Martínez-Soto et al., 2021; Yalçiner; Büyüksaraç; Kurban, 2019).

Neste contexto, o GPR demonstrou ser útil para localizar a posição de vigas, a substituição de materiais, objetos enterrados, camadas de pavimento, seções danificadas em diferentes cenários construtivos e características estruturais, como a presença de vazios ou infiltrações. Ademais, os ensaios não destrutivos também são utilizados para análise térmica dos edifícios e na identificação de rachaduras dos edifícios históricos. Diversos autores relatam que os testes não destrutivos, quando utilizados isoladamente para fins de diagnóstico, não são exclusivamente recomendados, pois estão sujeitos a fatores que podem afetar o comportamento do ensaio. Por isso, recomendam a combinação de diferentes técnicas ou, em alguns casos, o uso de métodos semi-destrutivos (Pérez-Gracia et al., 2009; Artopoulos et al., 2024; Chik et al., 2024; Gopinath; Ramadoss, 2021).

Além disso, foram observadas limitações dos ENDs, como o uso do GPR. Em alguns edifícios históricos, medições indiretas e o espaço físico restrito podem gerar resultados passíveis de múltiplas interpretações válidas. Além dessas incertezas, há ainda dificuldades para acessar áreas superiores das paredes, devido às alturas elevadas e ao peso das antenas do equipamento. Em vista disso, na etapa de caracterização de um patrimônio, alguns autores recomendam técnicas não destrutivas diversas, que podem ser combinadas para se complementarem e possibilitar um melhor planejamento de restauro. Os testes de raios-X é um exemplo de método não destrutivo que foi utilizado para estudar elementos estruturais em ferro forjado em edifícios históricos (Santos-Assunção et al., 2014; Pérez-Gracia; Solla; Fontul, 2024; Pehlivan, 2023; Vidovszky, 2017).

Estudos realizados para diagnóstico de peças de madeira geraram uma avaliação qualitativa para especificar os locais de deterioração biológica e de defeitos internos na madeira. Os ensaios não destrutivos fornecem informações acerca das características mecânicas da madeira, sem comprometer a integridade da estrutura (Drobiec; Nowogońska, 2023; Raposo et al., 2017).

As técnicas não destrutivas têm sido utilizadas para indicar a presença de umidade nos edifícios históricos ou de água subterrânea no entorno (Yalçiner; Büyüksaraç; Kurban, 2019; Muradov et al., 2022) e auxiliar em diagnósticos de estado de conservação para

anteceder intervenções de reabilitação e restauro em estruturas de gesso (Torres-González et al., 2021).

As técnicas não destrutivas indiretas, como ensaios sônicos e ultrassônicos, avaliam parâmetros mecânicos nos edifícios; contudo, por serem baseados em grandezas dificilmente comparáveis, como a velocidade de propagação de pulsos, por exemplo, necessitam de ferramentas específicas e processamento avançado. Ademais, essas técnicas também são úteis para a identificação de manifestações patológicas e contribuem para a conservação preventiva de edifícios históricos (Armanasco; Foppoli, 2020; Diz-Mellado et al., 2021; Hidalgo-Sánchez et al., 2023).

Além disso, a inspeção visual é definida por alguns autores como um processo não destrutivo de caracterização para avaliar a condição de uma edificação histórica e a metodologia mais simplificada para identificar manifestações patológicas. Justifica-se pelo fato de que a análise sensorial é um meio acessível que, junto a outras técnicas, gera diagnósticos interessantes (Rubens et al., 2023; Bertolin; Berto, 2024).

A inspeção visual apresentada na norma NBR 16747 (ABNT, 2020) é um procedimento de análise sensorial que possibilita uma avaliação inicial das manifestações patológicas em elementos estruturais, alvenarias e revestimentos, além de permitir a identificação dos tipos de materiais e processo construtivo empregados na edificação. Além disso, é na etapa de inspeção visual que são realizadas fotografias e documentação do estado de conservação da edificação naquele momento, o que pode ser útil para auxiliar em diagnósticos futuros, agregando informações de diferentes métodos investigativos, o que gera análises mais profundas para futuros projetos de restauro.

3.2 Digitalização e gêmeos digitais

O enfoque de pesquisa “digitalização e gêmeos digitais” contribui aos estudos da preservação de edificações de interesse cultural por possibilitar o uso de tecnologias para obtenção de dados. Dessa forma, identificar como o uso de ferramentas digitais integradas auxilia no monitoramento das edificações históricas responde à segunda pergunta de pesquisa.

O uso de ferramentas digitais integradas no setor do patrimônio construído tem contribuído para a produção de documentação técnica de qualidade, por meio do monitoramento de processos de deterioração ao longo do tempo. Esses recursos têm sido aplicados tanto em estruturas convencionais de alvenaria, quanto em estruturas metálicas e de madeira, estas últimas particularmente suscetíveis a elevadas taxas de degradação quando expostas a agentes ambientais.

Entre as principais ferramentas digitais integradas na literatura, destacam-se:

- (i) técnicas de digitalização tridimensional, baseadas em dados adquiridos por meio de fotogrametria e varredura a laser, que permitem a geração de modelos tridimensionais detalhados e a obtenção de informações geométricas e construtivas, incluindo a configuração interna de elementos estruturais, como colunas (Bouzas et al., 2022; Froner et al., 2024; Puerto et al., 2024);
- (ii) estratégias de análise e integração de dados, baseadas na combinação de informações provenientes de ensaios não destrutivos, sensores e modelos digitais, viabilizando a identificação de padrões de deterioração e a avaliação do

- desempenho estrutural ao longo do tempo (Santos-Assunção et al., 2014; Patrucco et al., 2022; Artopoulos et al. 2024; Cecere et al. 2024); e
- (iii) sistemas de sensoriamento inteligente, incluindo o uso de tijolos inteligentes, capazes de incorporar sensores para monitorar parâmetros físicos, como deformações, variações térmicas e umidade, fornecendo dados contínuos para o acompanhamento da saúde estrutural das edificações históricas. Essas abordagens, quando integradas, ampliam a capacidade de diagnóstico, favorecem estratégias de manutenção preventiva e contribuem para a tomada de decisão em intervenções compatíveis com o valor patrimonial dos edifícios (Jiménez Rios et al., 2024; Monchetti et al., 2023; Sarhan; Abed, 2021; Wang et al., 2023; Intrigila et al., 2024; Hussein et al., 2024).

A digitalização permite a criação de cópias virtuais de elementos e artefatos do patrimônio construído, apresentando como vantagens a documentação detalhada e a não necessidade de intervenções físicas diretas. Além disso, possibilita a acessibilidade do edifício a um público mais extenso, por ser compartilhado de forma virtual. Consequentemente, contribui para a preservação do patrimônio e o conhecimento das técnicas construtivas (Vieira et al., 2023; Lucchi, 2023; Resta; Bögge; Mondino, 2024; Nguyen et al., 2023; Lin et al., 2024; Martinelli; Calcerano; Gigliarelli, 2022; Oostwegel et al., 2022; Mohd Nurfaizal Baharuddin et al., 2023; Cinquepalmi; Tiburcio, 2023; Tang et al., 2024; Khalil; Stravoravdis; Backes, 2021; Hou et al., 2024; Zhang et al., 2022; Moyano et al., 2023; Bertolin; Berto, 2024).

Os modelos digitais, denominados gêmeos digitais, documentam a geometria, os ambientes e peças complexas do edifício histórico, além de agregar enriquecimento semântico. Dessa forma, possibilitam o diagnóstico de deterioração do patrimônio construído, especialmente em situações de difícil acesso, desastres naturais ou danos causados por ações humanas. A coleta de dados, realizada por meio do processo de Scan-to-HBIM, auxilia especialistas da área da construção em ações de restauro (Hussein et al., 2024; Milosz; Kęsik; Montusiewicz, 2024; Di Filippo et al., 2018; Nguyen et al., 2023; Vieira et al., 2023^a; Sewasew; Tesfamariam, 2023; Abd ElWahab; Bakr; Raslan, 2019; Sánchez-Aparicio et al., 2020; Baik et al., 2021; Penjor et al., 2024; Moyano et al., 2021).

Para mais, os gêmeos digitais integrados a ferramentas de simulação de desempenho de edifícios históricos fornecem informações sobre o comportamento energético destes e apoiam a tomada de decisões relacionadas às intervenções voltadas à melhoria da eficiência energética e à redução de custos na gestão sustentável dos edifícios históricos. Ademais, contribuem para maior confiabilidade nos dados e para a segurança aos usuários (Massafra; Predari; Gulli, 2022; Cheng et al., 2024; Karatzas et al., 2024; Trento; Wurzer; Coraglia, 2019; Zhang et al., 2023^a; Galiano-Garrigós et al., 2024; Vuoto; Funari; Lourenço, 2024; Zhang et al., 2023^b; Casillo et al., 2024; Vuoto; Funari; Lourenço, 2023; Chacón et al., 2024; Jouan; Hallot, 2020; Cortés Meseguer; García Valldecabres, 2023).

Quanto aos desafios relacionados à aplicação de gêmeos digitais ao patrimônio construído, foram apontados sobretudo aspectos ligados à necessidade de abordagens multidisciplinares para a coleta de dados e para as análises. Por outro lado, alguns autores ressaltam essa multidisciplinariedade como uma vantagem, por possibilitar uma avaliação mais abrangente dos danos em edifícios históricos. Essa etapa é considerada complexa, pois exige profissionais com conhecimento prévio em softwares específicos, além do conhecimento sobre os materiais que compõem o edifício histórico para a

produção de modelagem que se aproxime do objeto real (Lucchi, 2023; Nguyen et al., 2023; Martinelli; Calcerano; Gigliarelli, 2022; Rubens et al., 2023).

Em suma, os modelos tridimensionais foram apontados como úteis para preservar e documentar o patrimônio, considerando o rastreamento de mudanças e degradação ao longo da vida útil dos edifícios históricos. Os gêmeos digitais foram descritos como uma das principais tendências tecnológicas para a conservação e valorização do patrimônio cultural, sendo apontados como fundamentais para o monitoramento, a gestão e o apoio a ações de proteção de edifícios históricos (Yiğit; Uysal, 2024; Cardinali et al., 2023; Capolupo et al., 2020; Casillo et al., 2022).

3.3 Principais técnicas e conclusões

De modo a sintetizar a aplicação dos ensaios não destrutivos e os meios tecnológicos no âmbito do patrimônio construído, Na Tabela 2 são demonstradas as informações relevantes obtidas na literatura.

Tabela 2: Técnicas não destrutivas e ferramentas digitais integradas com suas respectivas aplicações

Referência	Tipo(s) de END(s) e técnicas	Aplicações
[Froner et al., 2024; Patrucco et al., 2022; Gusella; Cluni; Liberotti, 2020]	Termografia infravermelha	Compreensão da técnica construtiva e dos desgastes das alvenarias
[Frąckiewicz; Raszczuk; Jasieńko, 2024; Santos-Assunção et al., 2014; Pérez-Gracia et al., 2013; Artopoulos et al., 2024; Guadagnuolo et al., 2023; Pérez-Gracia et al., 2009; Chik et al., 2024; Yalçiner; Büyüksaraç; Kurban, 2019]	GPR/ GPR combinado com tomografia sísmica	Avaliação da integridade da estrutura, posição de vigas, monitoramento da superfície e o subsolo de edifícios históricos
[Vidovszky, 2017]	Testes de raios-X	Investigar elementos estruturais de ferro forjado
[Martínez-Soto et al., 2021]	Análise Espectral de Ondas Superficiais	Avaliação do módulo de elasticidade, modelo de cisalhamento e coeficiente de Poisson
[Muradov et al., 2022, Yalçiner; Büyüksaraç; Kurban, 2019]	Micro-ondas unido à fotogrametria e tecnologias de varredura a laser/ GPR	Identificação de umidade ou de água subterrânea no entorno da edificação
[Gusella; Cluni; Liberotti, 2020; Artopoulos et al., 2024]	Termografia infravermelha	Caracterização da textura da alvenaria e avaliação térmica da edificação
[Drobiec; Nowogońska, 2023; Raposo et al., 2017; Torres-González et al., 2021; Hidalgo-Sánchez et al., 2023]	Tecnologia ultrassônica e esclerométrica (ou teste do martelo de madeira), inspeção visual, resistógrafo e umidímetro/ Gesso: Inspeção visual, durômetro (dureza e umidade), termografia infravermelha (descontinuidades, descolamentos e umidade) e GPR (identificação de fixações metálicas e presença de vazios)	Identificação dos defeitos internos da qualidade de peças de madeira, características mecânicas das peças de madeira/ Diagnóstico do estado de conservação de estruturas de gesso, como a dureza
[Diz-Mellado et al., 2021; Hidalgo-Sánchez et al., 2023; Bertolin; Berto, 2024]	Inspeção visual (mapeamento de danos), levantamentos fotogramétricos (para visualizações), termografia (problemas de umidade, diferenças entre materiais ou rachaduras nas paredes), Nível a laser (distorções angulares dos elementos estruturais), Teste de vibração (acelerômetro para medir a rigidez da estrutura), GPR (para confirmar hipóteses documentais sobre o subsolo), scanners a laser	Identificação de falhas construtivas por meio da combinação de ENDs e contribuição à conservação preventiva

[Froner et al., 2024; Patrucco et al., 2022, Artopoulos et al., 2024; Intrigila et al., 2024; Hussein et al., 2024; Puerto et al., 2024; Bouzas et al., 2022; Wang et al., 2023; Monchetti et al., 2023, Cecere et al., 2024, Sarhan; Abed, 2021; Rubens et al., 2023; Capolupo et al., 2020]	Câmeras, fotogrametria, varredura a laser terrestre e termografia	Monitoramento dos processos de deterioração
[Santos-Assunção et al., 2014; Jiménez Rios et al., 2024]	GPR, tomografia sísmica/ Materiais inteligentes	Obtenção de informações sobre a estrutura interna de colunas
[Vieira et al., 2023 ^a ; Sewasew; Tesfamariam, 2023; Abd ElWahab; Bakr; Raslan, 2019; Sánchez-Aparicio et al., 2020; Baik et al., 2021; Penjor et al., 2024; Moyano et al., 2021; Lucchi, 2023; Zhang et al., 2023 ^a ; Lin et al., 2024; Nguyen et al., 2023; Morero et al., 2023; Tang et al., 2024; Khalil; Stravoravdis; Backes, 2021; Moyano et al., 2023]	Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), scanner a laser, softwares para gerar modelos tridimensionais	Dados para recriar a estrutura e a geometria dos edifícios históricos para processos de manutenção, retrofit ou restauração dos edifícios históricos/ Auxílio em tomada de decisões com a elaboração de documentos técnicos para o patrimônio construído
[Vieira et al., 2023 ^a ; Resta; Bögle; Mondino, 2024; Lucchi, 2023; Cortés Meseguer; García Valldecabres, 2023; Cardinali et al., 2023; Capolupo et al., 2020]	Câmeras, sensores, softwares para modelagens	Conhecimento do patrimônio em diversos locais do mundo de forma virtual/ Passeios virtuais/ Valorização do patrimônio histórico
[Cheng et al., 2024; Hou et al., 2024; Zhang et al., 2022; Massafra; Predari; Gulli, 2022; Trento; Wurzer; Coraglia, 2019; Karatzas et al., 2024]	Simulações termodinâmicas em softwares	Melhoria de desempenho térmico ou energético das construções históricas/ Possibilidade de realizar simulações
[Martinelli; Calcerano; Gigliarelli, 2022; Oostwegel et al., 2022; Mohd Nurfaizal Baharuddin et al., 2023; Galiano-Garrigós et al., 2024; Cinquepalmi; Tiburcio, 2023; Vuoto; Funari; Lourenço, 2024; Zhang et al., 2023a; Casillo et al., 2024; Vuoto; Funari; Lourenço, 2023; Chacón et al., 2024; Jouan; Hallot, 2020; Cortés Meseguer; García Valldecabres, 2023; Yiğit; Uysal, 2024; Cardinali et al., 2023; Bertolin; Berto, 2024; Casillo et al., 2022]	Fotogrametria, varredura a laser terrestre, levantamento geodésico, recursos computacionais (softwares)	Contribuições para etapas de planejamento, manutenção, conservação preventiva e proteção sustentável do patrimônio construído

4 Considerações finais

A partir da revisão sistemática de literatura conduzida com base no método *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA), foi possível identificar as seguintes conclusões principais:

- (i) As técnicas não destrutivas de inspeção visual, *Ground Penetrating Radar* (GPR) e termografia infravermelha são amplamente utilizadas para caracterizar edifícios históricos;
- (ii) Os ensaios não destrutivos possibilitam, principalmente: compreensão da técnica construtiva e dos desgastes das alvenarias, avaliação da integridade das estruturas; identificação de umidade ou de água no entorno da edificação, caracterização da textura da alvenaria, avaliação térmica da edificação, identificação de manifestações patológicas e contribuição à conservação preventiva;

(iii) Os métodos mais utilizados para a digitalização e aplicação de gêmeos digitais em edificações de interesse histórico foram as fotografias, fotogrametria e varredura a laser móvel;

(iv) A digitalização e os gêmeos digitais contribuem para os edifícios históricos por meio de monitoramento dos processos de deterioração, obter informações sobre a estrutura interna de colunas; recriar a estrutura e a geometria dos edifícios históricos para processos de manutenção, *retrofit* ou restauração, auxílio em tomada de decisões por meio de documentos criados para acervos técnicos, conhecimento do patrimônio em diversos locais do mundo de forma virtual, passeios virtuais, valorização do patrimônio histórico, melhoria de desempenho térmico ou energético das construções históricas com simulações e contribuições para etapas de planejamento, manutenção, conservação preventiva e proteção sustentável do patrimônio construído.

(v) As abordagens combinadas de ensaios não destrutivos e recursos tecnológicos podem aprimorar o monitoramento do comportamento dos elementos construtivos e subsidiar a tomada de decisão em intervenções futuras, de modo a fortalecer estratégias de preservação sustentável do patrimônio construído.

Entretanto, observou-se que a produção científica analisada apresenta alguns estudos provenientes de países europeus e de algumas regiões da Ásia, onde políticas de preservação e investimentos em tecnologias de monitoramento patrimonial se encontram mais consolidados. Em contrapartida, verifica-se alguns estudos provenientes de países que detêm extensos e diversos conjuntos de edificações de interesse histórico, como aqueles localizados na América Latina, África e parte do Oriente Médio, o que pode indicar avanço da pesquisa científica de patrimônio construído nessas regiões.

Para mais, ressalta-se que as conclusões apresentadas estão condicionadas à bibliografia selecionada e aos recortes analíticos definidos pelos enfoques e perguntas de pesquisa adotados. A análise realizada evidencia a necessidade de ampliação de estudos voltados à aplicação de técnicas não destrutivas em edificações de interesse histórico, especialmente quando integradas a recursos tecnológicos como a digitalização e os gêmeos digitais.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CEFET-MG e à FAPEMIG, por subsidiar essa pesquisa.

Referências

ABD ELWAHAB, Heba Allah; BAKR, Ali F.; RASLAN, Rania A. Towards a parametric plug-in for conservation of built heritage. **Alexandria Engineering Journal**, v. 58, n. 1, p. 325–331, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.12.001>.

ARMANASCO, Alessandro; FOPPOLI, Dario. A flat jacks method for in situ testing of brick masonry shear characteristics. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 119840, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119840>.

ARTOPOULOS, Georgios et al. Data-Driven Multi-Scale Study of Historic Urban Environments by Accessing Earth Observation and Non-Destructive Testing Information via an HBIM- Supported Platform. **International Journal of Architectural**

Heritage, v. 18, n. 6, p. 920–939, 2024. DOI:
<https://doi.org/10.1080/15583058.2023.2199408>.

BAIK, Ahmad et al. Applying Digital Methods for Documenting Heritage Building in Old Jeddah: A Case Study of Hazzazi House. **Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage**, v. 21, p. e00189, 2021. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.daach.2021.e00189>.

BERTOLIN, Chiara; BERTO, Filippo. Sustainable management of heritage buildings in long-term perspective (SyMBoL): current knowledge and further research needs. **International Journal of Building Pathology and Adaptation**, v. 42, n. 1, p. 1–17, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJBPA-02-2023-0015>.

BOUZAS, Óscar et al. Structural health control of historical steel structures using HBIM. **Automation in Construction**, v. 140, p. 104308, 2022. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104308>.

CAPOLUPO, Alessandra et al. Integration of terrestrial laser scanning and UAV-SFM technique to generate a detailed 3D textured model of a heritage building. **Proceedings of SPIE**, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2574034>.

CARDINALI, Vieri et al. An oriented H-BIM approach for the seismic assessment of cultural heritage buildings: Palazzo Vecchio in Florence. **Buildings**, v. 13, n. 4, p. 913, 2023. DOI:
<https://doi.org/10.3390/buildings13040913>.

CASILLO, Mario et al. Revolutionizing cultural heritage preservation: an innovative IoT-based framework for protecting historical buildings. **Evolutionary Intelligence**, v. 17, n. 5–6, p. 3815–3831, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12065-024-00959-y>.

CASILLO, Mario et al. Revolutionizing cultural heritage preservation: an innovative IoT-based framework for protecting historical buildings. **Evolutionary Intelligence**, v. 17, n. 5–6, p. 3815–3831, 27 out. 2024.

CECERE, L. et al. IoT and digital twin: a new perspective for cultural heritage predictive maintenance. **Procedia Structural Integrity**, v. 64, p. 2181–2188, 2024. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.09.334>.

CHACÓN, R. et al. Material characterization for HBIM data structures on a masonry arch bridge. In: **Bridge Maintenance, Safety, Management, Digitalization and Sustainability**. London: CRC Press, 2024. p. 2370–2378.

CHENG, Jack C. P. et al. Thermal performance improvement for residential heritage building preservation based on digital twins. **Journal of Building Engineering**, v. 82, p. 108283, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108283>.

CHIK, T. N. T. et al. A review of structural health monitoring in heritage building due to cracking issues. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 1347, n. 1, p. 012071, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1347/1/012071>.

CINQUEPALMI, Federico; TIBURCIO, Virginia Adele. Sustainable restoration of cultural heritage in the digital era. **Vitruvio – International Journal of Architectural Technology and Sustainability**, v. 8, n. 2, p. 76–87, 2023. DOI:
<https://doi.org/10.4995/vitruvio-ijats.2023.20545>.

- CORTÉS MESEGUER, Luis; GARCÍA VALLDECABRES, Jorge. Digital twins: HBIM information repositories to centralize knowledge and interdisciplinary management of architectural heritage. **Vitruvio – International Journal of Architectural Technology and Sustainability**, v. 8, n. 2, p. 64–75, 2023. DOI: <https://doi.org/10.4995/vitruvio-ijats.2023.20534>.
- COSTA, Felipe Vaz; LIMA, Gilson Brito Alves. Uso do instrumento PRISMA e de análise de dados como suporte ao levantamento e categorização de KPIs de SSO. **Exacta**, v. 21, n. 1, p. 101–129, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5585/exactaep.2021.18027>.
- DI FILIPPO, Andrea et al. Use of a wearable mobile laser system in seamless indoor 3D mapping of a complex historical site. **Remote Sensing**, v. 10, n. 12, p. 1897, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10121897>.
- DIZ-MELLADO, Eduardo et al. Non-destructive testing and finite element method integrated procedure for heritage diagnosis: the Seville Cathedral case study. **Journal of Building Engineering**, v. 37, p. 102134, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102134>.
- DROBIEC, Joanna; NOWOGOŃSKA, Beata. Restrictions and new possibilities of technical and conservation diagnostics of wood in heritage buildings. **Civil and Environmental Engineering Reports**, v. 33, n. 2, p. 106–116, 2023. DOI: <https://doi.org/10.59440/ceer/174568>.
- FIDELES, Bruna Tayna Macedo et al. Levantamentos digitais como suporte à inspeção em edificações: uma aplicação no Acquário Ceará. **Concreto & Construções**, v. 51, n. 114, p. 58–64, 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/1809-7197.2024.114.0006>.
- FRĄCKIEWICZ, Piotr; RASZCZUK, Krzysztof; JASIEŃKO, Jerzy. Identification of alterations in the structure of historical masonry walls using the GPR method accompanied with architectural survey in the former Piast Gymnasium in Brzeg. **Civil and Environmental Engineering Reports**, v. 34, n. 4, p. 32–42, 2024. DOI: <https://doi.org/10.59440/ceer/191566>.
- FRONER, Yacy Ara et al. Data collection for cultural heritage risk management: the damage map through heritage building information modeling (HBIM) project applied to the façade of St Francis of Assisi, Ouro Preto, Brazil. **Studies in Conservation**, v. 69, n. sup1, p. 98–107, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/00393630.2024.2379132>.
- GALIANO-GARRIGÓS, Antonio et al. The influence of visitors on heritage conservation: the case of the Church of San Juan del Hospital, Valencia, Spain. **Applied Sciences**, v. 14, n. 5, p. 2065, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14052065>.
- GARRIDO, Iván et al. Development of thermal principles for the automation of the thermographic monitoring of cultural heritage. **Sensors**, v. 20, n. 12, p. 1–20, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20123392>.
- GOPINATH, Vinoth Kanna; RAMADOSS, Ravi. Review on structural health monitoring for restoration of heritage buildings. **Materials Today: Proceedings**, v. 43, p. 1534–1538, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.318>.

- GUADAGNUOLO, Mariateresa et al. Simplified methods for the evaluation of mechanical properties of tuff masonry walls in Campania (Italy). **Procedia Structural Integrity**, v. 44, p. 878–885, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.01.114>.
- GUSELLA, Vittorio; CLUNI, Federico; LIBEROTTI, Riccardo. Feasibility of a thermography nondestructive technique for determining the quality of historical frescoed masonries: applications on the Templar Church of San Beviginate. **Applied Sciences**, v. 11, n. 1, p. 281, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11010281>.
- HIDALGO-SÁNCHEZ, Francisco M. et al. NDT spatial data integration for monumental buildings: technical information management for the Royal Alcazar of Seville. **Building Research & Information**, v. 51, n. 6, p. 625–647, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/09613218.2022.2162476>.
- HOU, Huiying (Cynthia) et al. Digital twin application in heritage facilities management: systematic literature review and future development directions. **Engineering, Construction and Architectural Management**, v. 31, n. 8, p. 3193–3221, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1108/ECAM-06-2022-0596>.
- HUSSEIN, Khalid Ahmed et al. Digital preservation of heritage urban facades: an integrated approach using historic building information modeling and shape grammar analysis. **Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage**, v. 35, p. e00383, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.daach.2024.e00383>.
- INTRIGILA, Claudio et al. HBIM for conservation and valorization of structural heritage: the Stylite Tower at Umm ar-Rasas, Jordan. **Journal of Cultural Heritage**, v. 70, p. 397–407, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.10.010>.
- JIMÉNEZ RIOS, Alejandro et al. Industry 5.0: towards an enhanced built cultural heritage conservation practice. **Journal of Building Engineering**, v. 96, p. 110542, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110542>.
- JOUAN, Pierre; HALLOT, Pierre. Digital twin: research framework to support preventive conservation policies. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 9, n. 4, p. 228, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi9040228>.
- KARATZAS, Stylianos et al. Digital twins-enabled heritage buildings management through social dynamics. **Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development**, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1108/JCHMSD-08-2023-0136>.
- KHALIL, Ahmed; STRAVORAVDIS, Spyridon; BACKES, Dietmar. Categorisation of building data in the digital documentation of heritage buildings. **Applied Geomatics**, v. 13, n. 1, p. 29–54, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12518-020-00322-7>.
- LIN, Guiye et al. Three-dimensional documentation and reconversion of architectural heritage by UAV and HBIM: a study of Santo Stefano Church in Italy. **Drones**, v. 8, n. 6, p. 250, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones8060250>.
- LUCCHI, Elena. Digital twins for the automation of the heritage construction sector. **Automation in Construction**, v. 156, p. 105073, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105073>.
- MARCONDES, Renato; SILVA, Silvio Luiz Rutz da. O protocolo PRISMA 2020 como uma possibilidade de roteiro para revisão sistemática em ensino de ciências. **Revista**

- Brasileira de Pós-Graduação**, Brasília, v. 18, n. 39, p. 1–19, 2023. DOI: <https://doi.org/10.21713/rbpg.v18i39.1894>.
- MARTINELLI, Letizia; CALCERANO, Filippo; GIGLIARELLI, Elena. Methodology for an HBIM workflow focused on the representation of construction systems of built heritage. **Journal of Cultural Heritage**, v. 55, p. 277–289, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.03.016>.
- MARTÍNEZ-SOTO, Fernando et al. Spectral analysis of surface waves for non-destructive evaluation of historic masonry buildings. **Journal of Cultural Heritage**, v. 52, p. 31–37, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.09.002>.
- MASSAFRA, A.; PREDARI, G.; GULLI, R. Towards digital twin-driven cultural heritage management: a HBIM-based workflow for energy improvement of modern buildings. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLVI-5/W1-2022, p. 149–157, 2022. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-5-W1-2022-149-2022>.
- MIŁOŻ, Marek; KĘSIK, Jacek; MONTUSIEWICZ, Jerzy. Three-dimensional digitization of documentation and perpetual preservation of cultural heritage buildings at risk of liquidation and loss: the methodology and case study of St Adalbert’s Church in Chicago. **Electronics**, v. 13, n. 3, p. 561, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics13030561>.
- MOHD NURFAISAL BAHARUDDIN et al. Conservation digitalization through heritage building information modelling (HBIM): online database theoretical review. **Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology**, v. 33, n. 1, p. 317–332, 2023. DOI: <https://doi.org/10.37934/araset.33.1.317332>.
- MONCHETTI, S. et al. The research project “Charming Pistoia”: an integrated HBIM project for preservation and maintenance of heritage structures. **Procedia Structural Integrity**, v. 44, p. 1988–1995, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.01.254>.
- MOREIRA DE ARAÚJO, Francisca Noeme; QUEIROZ, Marcelo Victor Alves Bila; EL AOUAR, Walid Abbas. Telemedicina, telessaúde e digitalização: revisão sistemática utilizando o protocolo PRISMA (2020–2022). **Revista de Administração em Saúde**, São Paulo, v. 23, n. 91: e350, abr.–jun. 2023. Disponível em: <https://cqh.org.br/ojs-2.4.8/index.php/ras/article/view/350>.
- MORERO, Laura et al. The use of a heritage building information model as an effective tool for planning restoration and diagnostic activities: the example of the Troia Cathedral rose window. **Acta IMEKO**, v. 12, n. 4, p. 1–8, 2023. DOI: <https://doi.org/10.21014/actaimeko.v12i4.1511>.
- MOYANO, J. et al. Integration of dynamic information on energy parameters in HBIM models. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLVIII-M-2-2023, p. 1089–1096, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-1089-2023>.
- MOYANO, Juan et al. Semantic interpretation of architectural and archaeological geometries: point cloud segmentation for HBIM parameterisation. **Automation in Construction**, v. 130, p. 103856, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103856>.

- MURADOV, Magomed et al. Non-destructive system for in-wall moisture assessment of cultural heritage buildings. **Measurement**, v. 203, p. 111930, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111930>.
- NGUYEN, Thu Anh et al. Practical workflow for cultural heritage digitalization and management: a case study in Vietnam. **International Journal of Construction Management**, v. 23, n. 13, p. 2305–2319, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/15623599.2022.2054268>.
- NOVAIS, A. L. M. et al. **Coordenadoria de Patrimônio Cultural: 20 anos de atuação especializada do MPMG**. Belo Horizonte: DIPE, 2024. Disponível em: https://www.mpmg.mp.br/data/files/23/14/39/64/863A091017A50CF8760849A8/Livro_digital_MP_livro_20anos.pdf.
- OOSTWEGEL, Laurens Jozef Nicolaas et al. Digitalization of culturally significant buildings: ensuring high-quality data exchanges in the heritage domain using OpenBIM. **Heritage Science**, v. 10, n. 1, p. 10, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40494-021-00640-y>.
- PAGE, Matthew J. et al. A declaração PRISMA 2020: diretriz atualizada para relatar revisões sistemáticas. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v. 31, n. 2, 2022. DOI: <https://doi.org/10.26633/RPSP.2022.112>.
- PAGE, Matthew J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, v. 372, p. 1–9, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>.
- PATRUCCO, Giacomo et al. 3D Data Fusion for Historical Analyses of Heritage Buildings Using Thermal Images: The Palacio de Colomina as a Case Study. **Remote Sensing**, v. 14, n. 22, p. 5699, 11 nov. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14225699>.
- PEHLIVAN, Gamze Fahriye. Condition and characterization analysis of a twentieth century cultural heritage through non-destructive testing (NDT) methods: the case of the Sivas industry school ironworking atelier in Turkey. **Heritage Science**, v. 11, n. 1, p. 62, 28 mar. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40494-023-00889-5>.
- PENJOR, Tshering et al. Heritage building information modeling (HBIM) for heritage conservation: Framework of challenges, gaps, and existing limitations of HBIM. **Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage**, v. 35, p. e00366, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.daach.2024.e00366>.
- PÉREZ-GRACIA, V. et al. Radar exploration applied to historical buildings: A case study of the Marques de Llió palace, in Barcelona (Spain). **Engineering Failure Analysis**, v. 16, n. 4, p. 1039–1050, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.05.007>.
- PÉREZ-GRACIA, V. et al. Non-destructive analysis in cultural heritage buildings: Evaluating the Mallorca cathedral supporting structures. **NDT & E International**, v. 59, p. 40–47, out. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.04.014>.
- PEREZ-GRACIA, Vega; SOLLA, Mercedes; FONTUL, Simona. Analysis of the GPR signal for moisture detection: application to heritage buildings. **International Journal of Architectural Heritage**, v. 18, n. 2, p. 230–253, 8 fev. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/15583058.2022.2139652>.

- PUERTO, Andrés et al. Building information modeling and complementary technologies in heritage buildings: A bibliometric analysis. **Results in Engineering**, v. 22, p. 102192, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102192>.
- RAPOSO, Patrícia C. et al. Non-Destructive Structural Wood Diagnosis of a Medieval Building. **Procedia Structural Integrity**, v. 5, p. 1147–1152, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.07.024>.
- RESTA, Laura Fernandez; BÖGLE, Annette; MONDINO, Daniel. Enhancing heritage building preservation with MCDM and HBIM: A research proposal. **Procedia Structural Integrity**, v. 64, p. 2165–2172, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.09.330>.
- RICCIARDI, Maria et al. Investigations on historical monuments' deterioration through chemical and isotopic analyses: an Italian case study. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, p. 29409–29418, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15103-x>.
- RUBENS, Tallis et al. Digitalization based on high-resolution scanning and HBIM tools for damage assessment of the José de Alencar house. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 8, n. 1, p. 30, 30 jun. 2023. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2361581/v1>.
- SÁNCHEZ-APARICIO, Luis Javier et al. Web-GIS approach to preventive conservation of heritage buildings. **Automation in Construction**, v. 118, p. 103304, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103304>.
- SANTOS-ASSUNÇÃO, Sonia et al. Assessment of Complex Masonry Structures with GPR Compared to Other Non-Destructive Testing Studies. **Remote Sensing**, v. 6, n. 9, p. 8220–8237, 29 ago. 2014. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs6098220>.
- SARDELLA, Alessandro et al. Risk mapping for the sustainable protection of cultural heritage in extreme changing environments. **Atmosphere**, v. 11, n. 7, 1 jul. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos11070700>.
- SARHAN, Hussein R.; ABED, Fanar M. The Feasibility of Using UAV Structure from Motion Photogrammetry to Extract HBIM of the Great Ziggurat of UR. **Iraqi Journal of Science**, v. 62, n. 11, p. 4518–4528, 24 dez. 2021. DOI: [https://doi.org/10.24996/ij.s.2021.62.11\(SI\).31](https://doi.org/10.24996/ij.s.2021.62.11(SI).31).
- SEWASEW, Yishak; TEFAMARIAM, Solomon. Historic building information modeling using image: Example of port city Massawa, Eritrea. **Journal of Building Engineering**, v. 78, p. 107662, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107662>.
- SUTHERLAND, Neil et al. InfraRed Thermography and 3D-Data Fusion for Architectural Heritage: A Scoping Review. **Remote Sensing**, v. 15, n. 9, p. 2422, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15092422>.
- Tang, Whai Tak et al. Digitalisation of asset management in Chinese temples in Hong Kong. **HKIE Transactions**, v. 30, n. 3, p. 34–43, 28 mar. 2024. DOI: <https://doi.org/10.33430/V30N3THIE-2022-0053>.
- TORRES-GONZÁLEZ, M. et al. Analysis of the state of conservation of historical plasterwork through visual inspection and non-destructive tests. The case of the upper

- frieze of the Toledanos Room (The Royal Alcázar of Seville, Spain). **Journal of Building Engineering**, v. 40, p. 102314, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102314>.
- TRENTO, Armando; WURZER, Gabriel; CORAGLIA, Ugo Maria. **A Digital Twin for Directing People Flow in Preserved Heritage Buildings**. São Paulo: Editora Blucher, dez. 2019. Disponível em: <http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/34213>.
- VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. **VOSviewer manual: version 1.6.20**. Leiden: CWTS, 2023. Disponível em: https://www.vosviewer.com/documentation/Manual_VOSviewer_1.6.20.pdf.
- VASCONCELOS, Ana Raina Carneiro et al. Applications of Smart and Self-Sensing Materials for Structural Health Monitoring in Civil Engineering: A Systematic Review. **Buildings**, v. 14, n. 8, 2345, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14082345>.
- VIDOVSKY, István. Diagnostic Method for Revealing Major Risk Factors of Wrought Iron Building Structure Elements. **Procedia Engineering**, v. 196, p. 181–186, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.189>.
- VIEIRA, Mylene M. et al. Strategy for HBIM implementation using high-resolution 3D architectural documentation based on laser scanning and photogrammetry of the José de Alencar theatre. **Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage**, v. 30, p. e00287, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.daach.2023.e00287>.
- VIEIRA, Mylene M. et al. Semi-automatic scan-to-BIM procedure applied to architectural ornaments of Nossa Senhora do Rosário Church, Aracati-CE. **Research Square**, 29 fev. 2024. Preprint. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3988894/v1>.
- VUOTO, Annalaura; FUNARI, Marco Francesco; LOURENÇO, Paulo B. On the Use of the Digital Twin Concept for the Structural Integrity Protection of Architectural Heritage. **Infrastructures**, v. 8, n. 5, p. 86, 4 maio 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures8050086>.
- VUOTO, Annalaura; FUNARI, Marco Francesco; LOURENÇO, Paulo B. Shaping Digital Twin Concept for Built Cultural Heritage Conservation: A Systematic Literature Review. **International Journal of Architectural Heritage**, v. 18, n. 11, p. 1762–1795, 21 nov. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/15583058.2023.2258084>.
- WANG, Ru et al. HTSM Platform: A novel way to achieve resource-optimized conservation processes for heritage buildings. **Journal of Cleaner Production**, v. 423, p. 138540, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138540>.
- YALÇINER, C. Çağlar; BÜYÜKSARAÇ, Aydın; KURBAN, Yunus Can. Non-destructive damage analysis in Kariye (Chora) Museum as a cultural heritage building. **Journal of Applied Geophysics**, v. 171, p. 103874, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103874>.
- YIĞİT, Abdurahman Yasin; UYSAL, Murat. Automatic crack detection and structural inspection of cultural heritage buildings using UAV photogrammetry and digital twin technology. **Journal of Building Engineering**, v. 94, p. 109952, 1 out. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109952>.

ZHANG, Jiaying et al. Automatic relative humidity optimization in underground heritage sites through ventilation system based on digital twins. **Building and Environment**, v. 216, p. 108999, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108999>.

ZHANG, Jiaying et al. Predictive control of HVAC by multiple output GRU - CFD integration approach to manage multiple IAQ for commercial heritage building preservation. **Building and Environment**, v. 245, p. 110802, 2023a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110802>.

ZHANG, Jiaying et al. Multi-indicator adaptive HVAC control system for low-energy indoor air quality management of heritage building preservation. **Building and Environment**, v. 246, p. 110910, 2023b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110910>.