



## Digital Image Processing and Advanced Artificial Intelligence Techniques in the Identification of Pathological Manifestations on the Facades of Historic Buildings: A Systematic Literature Review


### Processamento Digital de Imagens e Técnicas Avançadas de Inteligência Artificial na Identificação de Manifestações Patológicas em Fachadas de Edificações Históricas: Uma Revisão Sistemática da Literatura

JACINTO, Moises<sup>(1)</sup>; MAUÉS, Luiz<sup>(2)</sup>; SOUSA, Gean<sup>(3)</sup>; PEREIRA, Wesley<sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup>  0000-0001-8681-7094; Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil. [moisesaraujosantosjacinto@gmail.com](mailto:moisesaraujosantosjacinto@gmail.com).

<sup>(2)</sup>  0000-0002-1762-8617; Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil. [maues@ufpa.br](mailto:maues@ufpa.br).

<sup>(3)</sup>  0000-0003-0797-1099; Universidade Federal do Maranhão, Imperatriz, Maranhão, Brasil. [gean.pibe@gmail.com](mailto:gean.pibe@gmail.com).

<sup>(4)</sup>  0000-0001-5350-6978; Universidade Federal do Maranhão, Balsas, Maranhão, Brasil. [wesley.fonseca@gmail.com](mailto:wesley.fonseca@gmail.com).

O conteúdo expresso neste artigo é de inteira responsabilidade dos/as seus/as autores/as.

#### ABSTRACT

Introduction Historic building façades are continuously exposed to physical and chemical degradation processes, leading to pathological manifestations that may compromise structural safety and cultural value. Due to heritage protection constraints, diagnostic methods must be accurate, non-destructive, and compatible with conservation principles. In this context, digital technologies have emerged as promising tools for the identification and analysis of building pathologies. This paper presents a systematic literature review aimed at identifying and analyzing scientific contributions related to the use of digital image processing, diagnostic engineering, and Industry 4.0 technologies in the identification of pathological manifestations in historic building façades. The review followed established systematic review protocols, including structured searches in national and international databases, predefined inclusion and exclusion criteria, and qualitative and quantitative analyses of the selected studies. The findings reveal a significant growth in research focused on the digitalization of built heritage, highlighting techniques such as photogrammetry, infrared thermography, 3D laser scanning, unmanned aerial vehicles, and Heritage Building Information Modeling (HBIM). However, the results also indicate a relevant research gap concerning the direct application of advanced machine learning and semantic segmentation techniques for the automated diagnosis of pathological manifestations in historic façades. It is concluded that the integration of traditional diagnostic approaches with advanced digital tools represents a promising research avenue, with strong potential to enhance conservation, documentation, and restoration decision-making processes for historic buildings.

#### RESUMO

As fachadas de edificações históricas estão constantemente sujeitas a processos de degradação física e química, resultando em diferentes manifestações patológicas que podem comprometer sua integridade, segurança e valor cultural. Diante das restrições impostas pelo tombamento histórico, torna-se fundamental adotar métodos de diagnóstico precisos, não destrutivos e compatíveis com a preservação do patrimônio. Nesse contexto, o uso de tecnologias digitais tem se destacado como uma alternativa promissora para o mapeamento e a análise dessas patologias. Este artigo apresenta uma revisão sistemática da literatura com o objetivo de identificar e analisar as contribuições científicas relacionadas à aplicação do processamento digital de imagens, da engenharia diagnóstica e de tecnologias associadas à Indústria 4.0 na identificação de manifestações patológicas em fachadas de prédios históricos. A metodologia adotada seguiu protocolos consolidados de revisão sistemática, com buscas em bases nacionais e internacionais, aplicação de critérios de inclusão e exclusão e análise qualitativa e quantitativa dos estudos selecionados. Os resultados indicam um crescimento expressivo das pesquisas voltadas à digitalização do patrimônio edificado, com destaque para técnicas como fotogrametria, termografia infravermelha, escaneamento a laser 3D, uso de drones e modelagem HBIM. Entretanto, observa-se uma lacuna relevante na integração dessas tecnologias com técnicas avançadas de aprendizado de máquina e segmentação semântica aplicadas diretamente ao diagnóstico automatizado de fachadas históricas. Conclui-se que a convergência entre métodos tradicionais de diagnóstico e ferramentas digitais avançadas representa um campo promissor de pesquisa, com potencial significativo para aprimorar os processos de preservação e restauração do patrimônio construído.

#### INFORMAÇÕES DO ARTIGO

##### Histórico do Artigo:

Submetido: 05/02/2026

Aprovado: 15/03/2026

Publicação: 21/03/2026



##### Keywords:

Historic heritage, pathological manifestations, digital image processing, damage mapping, industry 4.0, semantic segmentation.

##### Palavras-Chave:

Patrimônio histórico, manifestações patológicas, processamento digital de imagens, mapeamento de danos, indústria 4.0, segmentação semântica.

## Introdução

A preservação do patrimônio histórico edificado demanda abordagens técnicas que conciliem conservação, segurança e respeito aos valores culturais associados às edificações tombadas. Nesse contexto, o tombamento histórico estabelece diretrizes para os processos de restauração, os quais devem ser fundamentados em análises criteriosas das patologias das construções e em métodos adequados de diagnóstico (IPHAN, 2015; Souza & Ripper, 1998). A engenharia diagnóstica, aliada à elaboração de mapas de danos, destaca-se como ferramenta essencial para a identificação e compreensão dos mecanismos de degradação em prédios históricos, subsidiando intervenções mais eficazes e compatíveis com a edificação original (Helene, 1981; Tinoco, 2009). Paralelamente, o avanço da Indústria 4.0 tem possibilitado a incorporação de tecnologias digitais ao processo de inspeção e monitoramento, ampliando a precisão das análises e contribuindo para a gestão inteligente do patrimônio construído (Silva Junior et al., 2020; Volk et al., 2014).

A partir de buscas preliminares em bases internacionais e repositórios editoriais (com ênfase em periódicos de engenharia, conservação e ambiente construído), observa-se um crescimento recente de estudos que conectam diagnóstico de patologias em edifícios históricos a tecnologias digitais. A literatura divide-se em dois enfoques principais, no qual, o primeiro avalia a conservação por meio de ensaios não destrutivos (NDT), com ênfase na aplicabilidade e limitações conforme material e dano (Bocacci et al., 2024; Hussain & Akhtar, 2017). O segundo enfoque diz respeito a digitalização do patrimônio por fotogrametria e varredura a laser, com foco em modelagem HBIM (*Heritage building information modeling*), documentação, gestão do ciclo de vida e suporte à decisão (Ma et al., 2025; Penjor et al., 2024). Esses achados indicam que “tombamento histórico”, “processo de restauração”, “engenharia diagnóstica” e “mapa de danos” vêm sendo progressivamente articulados com tecnologias associadas à Indústria 4.0, sobretudo para aumentar precisão, rastreabilidade e repetibilidade das avaliações (Deng et al., 2021; Hu et al., 2022).

Apesar desse avanço, a produção científica permanece fragmentada por enfoques (patologia/diagnóstico, documentação, modelagem, monitoramento) e por campos disciplinares, o que torna especialmente relevante a condução de uma revisão sistemática da literatura. Revisões sistemáticas contribuem para reduzir vieses de seleção, explicitar critérios de inclusão/exclusão e sintetizar evidências comparáveis, permitindo identificar lacunas metodológicas e direções futuras com maior robustez do que revisões narrativas (Deng et al., 2021; Hu et al., 2022). No tema específico, a necessidade é ainda mais evidente porque decisões de intervenção em bens tombados exigem lastro técnico-documental e compatibilidade patrimonial, e a convergência entre “mapa de danos”, “engenharia diagnóstica” e “digitalização/monitoramento” nem sempre é tratada de forma integrada nas publicações (Cui & Wu, 2025; Penjor et al., 2024). Assim, uma SLR (*Single lens reflex*) é

estratégica para organizar o estado da arte, mapear métodos recorrentes (por exemplo, HBIM, NDT, fotogrametria/TLS, sensores) e comparar como cada abordagem apoia o diagnóstico e o planejamento de restaurações.

Quanto às revisões já existentes, a literatura apresenta: (i) revisões sobre NDT aplicados à avaliação de estruturas antigas e monumentos, sistematizando técnicas e indicando benefícios e restrições conforme o tipo de estrutura e defeitos esperados (Boccacci et al., 2024; Hussain & Akhtar, 2017); (ii) revisões e frameworks sobre HBIM e digitalização do patrimônio, discutindo fluxos de aquisição (*laser scanning*/fotogrametria), modelagem e desafios de interoperabilidade e adoção (Cui & Wu, 2025; Penjor et al., 2024); e (iii) revisões sobre digital twins e habilitadores da Indústria 4.0 no ambiente construído, com sínteses amplas sobre IoT (*Internet of Things*), integração de dados e gestão do ciclo de vida (Baghdadi, 2025; Deng et al., 2021; Hu et al., 2022).

Ainda assim, essas revisões tendem a tratar os tópicos de modo setorial (ou focadas em HBIM, ou em NDT, ou em digital twins), sem consolidar, em um mesmo protocolo, a relação entre tombamento, processos de restauração, patologia/engenharia diagnóstica, mapa de danos e tecnologias 4.0. Além disso, o volume de publicações recentes sobre “patrimônio inteligente”, automação e IA aplicada ao patrimônio vem crescendo, o que reforça a pertinência de uma nova revisão mais atual, capaz de atualizar evidências, harmonizar terminologias e propor uma estrutura integradora para apoiar decisões técnicas em edificações históricas (Baghdadi, 2025; Cui & Wu, 2025; Ma et al., 2025). Diante disso, o objetivo desta revisão foi identificar, sistematizar e analisar criticamente a literatura em relação ao mapeamento de manifestações patológicas em fachadas históricas com ênfase em tecnologias digitais.

## **Referencial teórico**

### ***Tecnologias utilizadas em mapeamentos de danos em fachadas***

As tecnologias utilizadas no mapeamento de danos em fachadas têm evoluído significativamente, proporcionando maior precisão, rapidez e segurança nos diagnósticos patológicos das edificações. Entre as principais ferramentas empregadas destacam-se a fotogrametria digital, o uso de drones (VANTs), a termografia infravermelha e os ensaios não destrutivos, que auxiliam tanto na identificação de manifestações aparentes (fissuras, manchas, destacamentos) quanto na detecção de anomalias não visíveis a olho nu, como umidade e descolamentos internos (ABNT, 2020; Bertolini, 2010; Maldague, 2001). Os drones permitem a inspeção de regiões de difícil acesso com maior segurança, além de gerar registros com alta resolução para posterior processamento e mapeamento em softwares específicos (Melo & Melo, 2023). Já a termografia infravermelha é amplamente aplicada para localizar variações térmicas associadas a infiltrações, falhas de aderência e destacamentos de revestimentos, contribuindo para mapas de danos mais completos e confiáveis (Maldague, 2001).

Além disso, a modelagem BIM (*Building Information Modeling*) vem sendo incorporada como ferramenta de organização, rastreabilidade e monitoramento das patologias ao longo do tempo, integrando dados de inspeção, fotografias, resultados de ensaios e histórico de manutenção ao modelo digital da edificação, o que melhora a tomada de decisão e o planejamento de intervenções (ABNT, 2020; Sacks et al., 2018). Técnicas complementares, como inspeções visuais sistematizadas e ensaios não destrutivos (por exemplo, ultrassom e esclerometria), contribuem para aumentar a confiabilidade do diagnóstico e orientar estratégias de reparo e prevenção, alinhadas a diretrizes de inspeção predial e à literatura de patologia das construções (ABNT, 2020; Bertolini, 2010).

No Quadro 1, são apresentadas as principais tecnologias utilizadas no processo de mapeamento de danos em fachadas.

### Quadro 1.

#### *Principais tecnologias utilizadas no mapeamento de fachadas*

<b>Softwares</b>	<b>Função</b>
<b>Escaneamento a laser 3D (TLS)</b>	Esta técnica é considerada uma das melhores soluções para a digitalização 3D de patrimônios culturais. Com o TLS, é possível detectar alguns defeitos como delaminação superficial, trincas, deslocamentos e deflexões em paredes. Essa tecnologia também permite medir os defeitos com as informações adquiridas em um sistema CAD ( <i>Computer Aided Design</i> ) (Alencastro et al., 2019).
<b>Termografia infravermelha (IRT)</b>	A termografia infravermelha (IRT) é uma técnica não destrutiva que tem sido aplicada na inspeção de edificações como uma importante ferramenta de diagnóstico. O princípio é baseado na medição da distribuição de energia térmica radiante, que é emitida por um objeto (Birch, 2006). Essa tecnologia tem sido utilizada para detectar defeitos superficiais como umidade, vazamento de ar nas paredes, desprendimento e trincas em algum tipo de revestimento (Antunes, 2010). Além disso, apresenta algumas limitações relacionadas ao custo significativo das câmeras infravermelhas de alta resolução.
<b>Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (PRS)</b>	A fotogrametria e sensoriamento remoto (PRS) é uma técnica capaz de determinar a geometria 3D de objetos físicos por meio da análise e medição de fotografias 2D. Está dividida em fotogrametria aérea e terrestre (BAUER et al., 2006).
<b>Processamento de imagem digital (DIP)</b>	O processamento digital de imagens é uma técnica para extrair informações das imagens com diversas aplicações em engenharia e arquitetura. Esta técnica requer o uso de software para realizar o processamento de imagem em imagens digitais. Existem duas áreas principais de aplicação, que é um nível baixo que envolve a melhoria de informações pictóricas para interpretação humana e um nível alto para o processamento de dados de cena para percepção de máquina autônoma, para dar ao sistema a capacidade de interpretar e entender uma imagem (Bordalo et al., 2010)
<b>Drones (UAV)</b>	Os avanços nos sistemas de programação e piloto automático, a miniaturização de componentes, como giroscópios e unidades de GPS, tornaram as máquinas menores, mais baratas e mais fáceis de voar. Atualmente, os drones ou mais formalmente conhecidos como Unmanned Aerial Vehicles (UAV), têm grande popularidade e a tecnologia tem um nível de maturidade que a torna mais amigável e barata (Bordalo et al., 2010).

### ***Aprendizado de máquina e segmentação semântica***

A indústria da construção tem muitos sistemas automatizados separados que vão desde o processo de design até a logística e planejamento, mas muitas vezes esses sistemas de informação são incompatíveis entre si, o que é uma limitação para criação e aprendizado de máquina eficaz e artificial de sistemas de inteligência (Miyamoto, 2004).

No entanto, o digital e a transformação dos processos na construção são expressos como fracas em comparação com outras indústrias. O potencial de soluções baseadas em inteligência artificial pode ser realizado apenas através da integração de todas as fontes de dados heterogêneos (Braga; Amorim, 2023).

O Aprendizado de Máquina (AM) é uma área da Inteligência Artificial (IA) que utiliza técnicas estatísticas e computacionais para permitir que os sistemas aprendam com dados, sem serem explicitamente programados para isso. De acordo com Cerri e Carvalho (2017), o propósito do processo de Aprendizado de Máquina é obter conhecimento dos dados, visando à construção de modelos que permitam a previsão ou classificação de novos dados.

A Inteligência Artificial é um ramo da computação que se dedica a criar algoritmos e sistemas capazes de realizar tarefas que antes só eram possíveis para seres humanos, como o reconhecimento de voz, a visão computacional, e a tomada de decisões (Gomes, 2010; Ludermir, 2021).

As principais áreas de aplicação da IA na construção civil serão o gerenciamento de projetos, a previsão de riscos, e a análise de dados para tomada de decisões, sendo que, deve-se notar também a importância de se considerar os impactos sociais e econômicos da aplicação da IA na construção civil, como a necessidade de adaptação dos trabalhadores às novas tecnologias, e a possibilidade de aumento da desigualdade social em decorrência da substituição de trabalhadores por máquinas (Gomes, 2010; Ludermir, 2021; Silva & Mairink, 2019; Teixeira et al., 2020).

As redes neurais artificiais são um conjunto de algoritmos e técnicas que se baseiam no funcionamento do cérebro humano para realizar tarefas complexas. Essas redes são formadas por neurônios artificiais interconectados, que processam informações de entrada e geram uma saída. As redes neurais têm sido amplamente utilizadas em diversas áreas, como a medicina, a engenharia, a robótica e a inteligência artificial, e têm sido objeto de estudo de muitos pesquisadores (Fleck et al., 2016; Rauber, 2005; Vargas et al., 2016; Waziri et al., 2017).

As redes neurais convolucionais são um tipo especial de redes neurais que têm obtido sucesso em tarefas de visão computacional, como reconhecimento de imagens, detecção de objetos e segmentação semântica de imagens. Elas são compostas por camadas convolucionais, que aplicam uma convolução entre a entrada e um conjunto de filtros aprendidos, camadas de *pooling*, que reduzem a dimensão dos dados e aumentam a robustez da rede, e camadas totalmente conectadas, que realizam a classificação final (Ferreira, 2017; Juraszek et al., 2014; Vargas et al., 2016).

## Material e Métodos

### ***Desenho e protocolo da revisão***

Realizou-se uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) com foco em identificar lacunas de conhecimento na intersecção entre patrimônio construído, diagnóstico/restauração e métodos de segmentação semântica, no período de novembro de 2017 a dezembro de 2025. A revisão foi conduzida segundo boas práticas internacionalmente reconhecidas para revisão sistemática, com protocolação prévia do escopo, da estratégia de busca, dos critérios de elegibilidade e do plano de extração/síntese (Kitchenham & Charters, 2007; Page et al., 2021). O relato segue, quando aplicável, as recomendações do PRISMA 2020 para aumentar transparência e reprodutibilidade (Booth et al., 2016; Page et al., 2021).

### ***Escopo temático e perguntas de pesquisa***

A revisão foi estruturada para: (i) mapear o estado da arte sobre o tratamento de bens edificados históricos em processos de diagnóstico e restauração; (ii) identificar abordagens e técnicas de segmentação semântica com potencial de aplicação em edifícios históricos; e (iii) evidenciar lacunas de conhecimento nesses cruzamentos temáticos (Gough et al., 2012; Tranfield et al., 2003).

### ***Fontes de informação e bases de dados***

Para maximizar abrangência e cobertura disciplinar, foram consultadas as seguintes bases e portais: Periódicos CAPES, SciELO Brasil, Google Acadêmico, Scopus e Web of Science. A seleção combina bases regionais e de acesso aberto (p.ex., SciELO) com bases internacionais de alta curadoria (*Scopus* e *Web of Science*), mitigando vieses de cobertura (Falagas et al., 2008; Mongeon & Paul-Hus, 2015). Além disso, realizou-se etapa bibliométrica complementar na plataforma *Dimensions* para quantificação de produção, citações e tendências (Hook et al., 2018; Snyder, 2019).

### ***Ferramenta de apoio e organização***

A revisão específica sobre segmentação semântica foi estruturada com suporte do software START (*State of the Art Through Systematic Review*), utilizado para padronizar a cadeia de busca, triagem e organização dos registros (Kitchenham & Charters, 2007). As decisões da ferramenta foram auditadas por meio de registros de busca e logs de triagem, conforme boas práticas (Booth et al., 2016).

### ***Estratégia de busca***

Foram empregadas duas famílias de descritores:

1. Para o eixo patrimônio/diagnóstico/restauração: “Tombamento histórico”, “Processo de restauração”, “Patologia das construções”, “Engenharia diagnóstica em prédios históricos”, “Mapa de danos”, “Indústria 4.0”.

2. Para o eixo visão computacional: “segmentação semântica” e “segmentação semântica na construção civil”.

Inicialmente, as buscas foram executadas sem filtros, respeitando a configuração padrão de cada base (Falagas et al., 2008). Na sequência, aplicou-se uma triagem em dois níveis: (i) título e (ii) resumo/abstract (Page et al., 2021). Para viabilizar comparabilidade entre bases e reduzir viés de ordenação algorítmica, a quantificação considerou apenas as duas primeiras páginas de resultados em cada base para as consultas principais — estratégia de corte pragmática e explicitada (Booth et al., 2016; Haddaway et al., 2015).

Nota de transparência: embora o corte nas duas primeiras páginas otimize a exequibilidade, reconhece-se que tal decisão pode subestimar registros relevantes posicionados além desse limite, especialmente em mecanismos com ranqueamento por relevância/citação (Haddaway et al., 2015). Esse potencial viés é reconhecido nos Limites do estudo.

### ***Crterios de elegibilidade e processo de seleço***

Foram definidos crterios de incluso e excluso previamente ao inio da triagem, contemplando: aderncia temtica ao escopo, tipo de documento acadmico (priorizando artigos e revises), disponibilidade do texto e qualidade/pertinncia inferida a partir de ttulo e resumo. Registros duplicados entre bases foram identificados e removidos antes da avaliao de elegibilidade (Booth et al., 2016; Page et al., 2021).

O fluxo de elegibilidade (identificao → triagem por ttulo → triagem por resumo → leitura completa quando necessrio) encontra-se sintetizado na Figura 1, em diagrama compatvel com PRISMA (Page et al., 2021).

### ***Extrao, organizao e sntese dos dados***

Dos estudos elegveis, foram extraídos metadados e variveis substantivas: autores, ano, peridico, base de indexao, objetivos, mtodos, mtricas/indicadores, contribuies, lacunas e tendncias. A organizao e o controle de verses foram feitos com o START e planilhas de apoio. A sntese combinou:

- Anlise qualitativa temtica para identificar eixos conceituais e lacunas (Booth et al., 2016; Gough et al., 2012).
- Anlise quantitativa/bibliomtrica (nmero anual de publicaes, citaes, tendncias temporais, trabalhos e peridicos mais influentes) conduzida no Dimensions, visando mapear dinmicas e densidades do campo (Hook et al., 2018; Snyder, 2019).

Essa abordagem quali quantitativa (*mixed methods*) permitiu integrar profundidade interpretativa e trao emprica por indicadores, aumentando validade e robustez das inferncias (Creswell & Clark, 2017; Tashakkori & Teddlie, 2015).

### ***Classificao do estudo***

Em termos de finalidade, trata-se de pesquisa exploratria, pois visa mapear o estado da arte e identificar lacunas relacionadas aos temas investigados (Gil, 2019; Tranfield et al.,

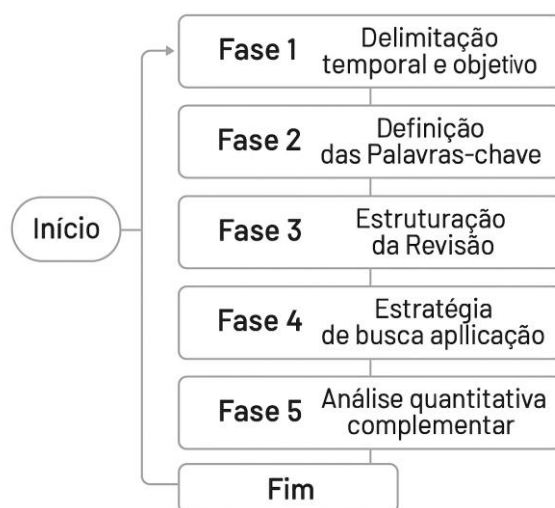
2003). Quanto aos procedimentos, é pesquisa bibliográfica, sustentada por artigos científicos indexados em bases acadêmicas, sem coleta de dados primários (Booth et al., 2016; Marconi & Lakatos, 2017). Quanto à natureza, é pesquisa básica, voltada à ampliação do conhecimento científico (Gil, 2019; Gough et al., 2012).

### **Controle de qualidade e vieses**

Foram observadas as seguintes práticas para reduzir vieses: (i) uso de múltiplas bases com perfis complementares; (ii) registro explícito de palavras-chave e filtros; (iii) reporte do fluxo de seleção (Figura 1). Como limitações, reconhecem-se: (a) o corte nas duas primeiras páginas de resultados, que pode excluir estudos relevantes; (b) possíveis vieses de cobertura entre bases (Haddaway et al., 2015; Mongeon & Paul-Hus, 2015).

**Figura 1.**

*Fluxograma*



Conforme observado no fluxograma (Figura 1), as etapas operacionais foram divididas em:

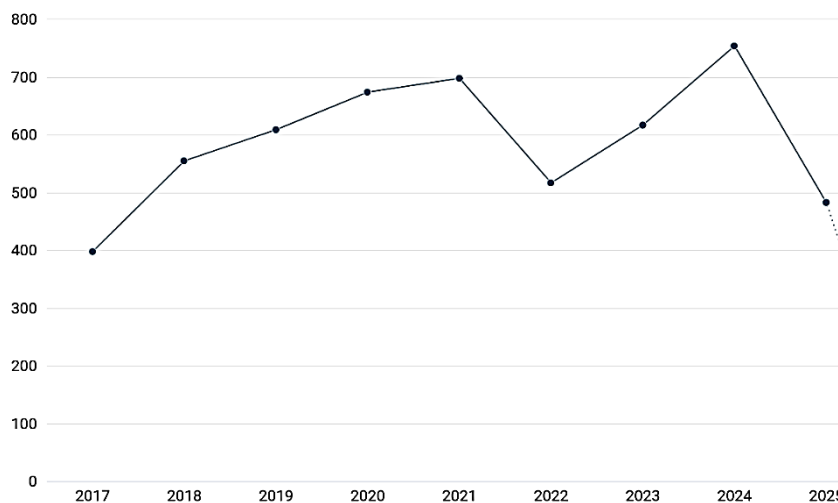
1. Fase 1 – Delimitação temporal e objetivo: RSL realizada entre nov/2017 e jun/2025, com foco em lacunas de conhecimento na temática (Tranfield et al., 2003).
2. Fase 2 – Palavras-chave: Definição dos descritores: “Tombamento histórico”, “Processo de restauração”, “Patologia das construções”, “Engenharia diagnóstica em prédios históricos”, “Mapa de danos”, “Indústria 4.0”, “segmentação semântica” e “segmentação semântica na construção civil”.
3. Fase 3 – Estruturação (segmentação semântica): Uso do START para padronizar o processo de busca, triagem e organização (Kitchenham & Charters, 2007).
4. Fase 4 – Bases de dados: Periódicos CAPES, SciELO Brasil, Google Acadêmico, Scopus e Web of Science (Falagas et al., 2008; Mongeon & Paul-Hus, 2015). Busca e filtros: Busca sem filtros no primeiro momento; quantificação restrita às duas primeiras páginas de resultados; filtragem por título e resumo em sequência (Haddaway et al., 2015; Page et al., 2021).
6. Fase 5 – Análise quantitativa complementar: Dimensões para métricas de produção, citações e tendências temporais (Hook et al., 2018; Snyder, 2019).

## Resultados e Discussão

A apresentação dos resultados se dá inicialmente com a exibição de como os temas aqui abordados aparecem quantitativamente em publicações anuais desde 2017. As Figuras de 1 a 7 permitem visualizar as quantidades de publicações de cada temática. Na Figura 2 é possível verificar a evolução das quantidades de publicação do tema “Tombamento Histórico”.

**Figura 2.**

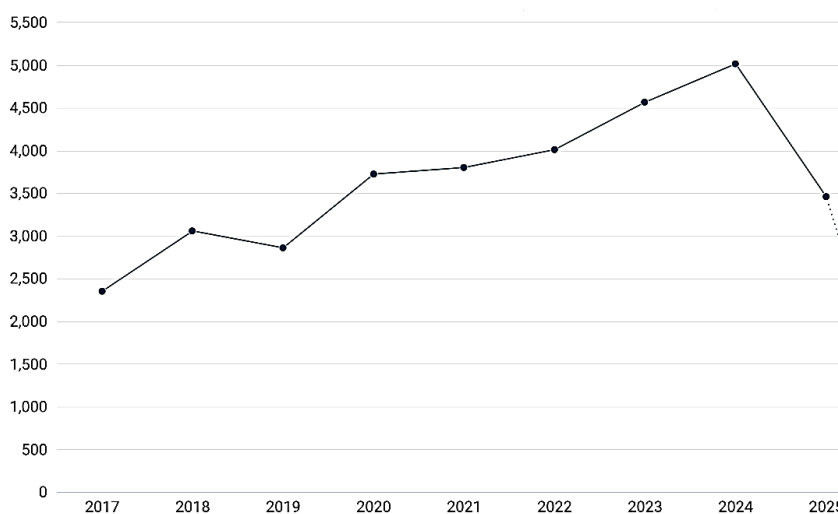
*Série temporal das quantidades de publicação do tema tombamento histórico*



O tema “tombamento histórico é relevante e que o mesmo teve um pico de publicações no ano de 2024. Continuando a análise, é apresentado na Figura 3 os resultados referentes ao tema “Processo de Restauração”.

**Figura 3.**

*Série temporal das quantidades de publicação do tema processo de restauração*

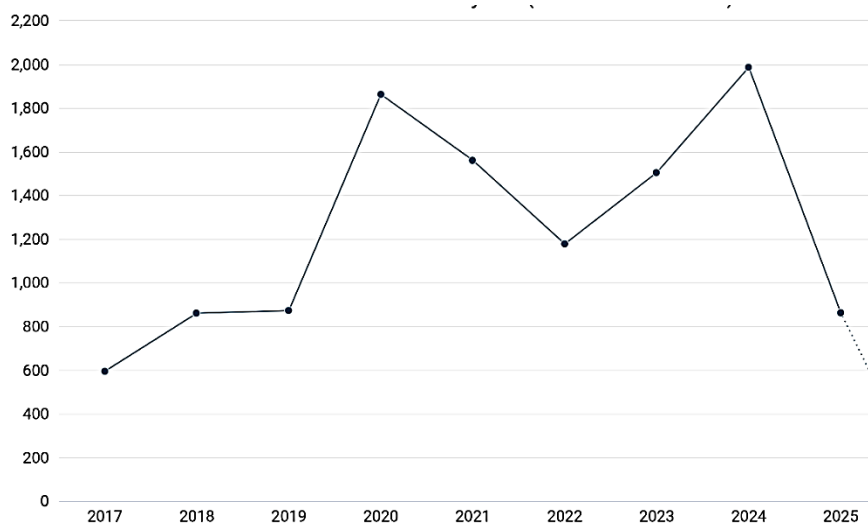


A quantidade de artigos publicados sobre o tema processo de restauração sofreu uma crescente, atingindo seu pico em 2024 e o descenso em 2025. É interessante observar que, em

geral, esse tema tem é abordado por uma grande quantidade de artigos ao longo dos anos. O tema Patologia das construções também foi analisado temporalmente. Os resultados gráficos dessa análise estão apresentados na Figura 4.

**Figura 4.**

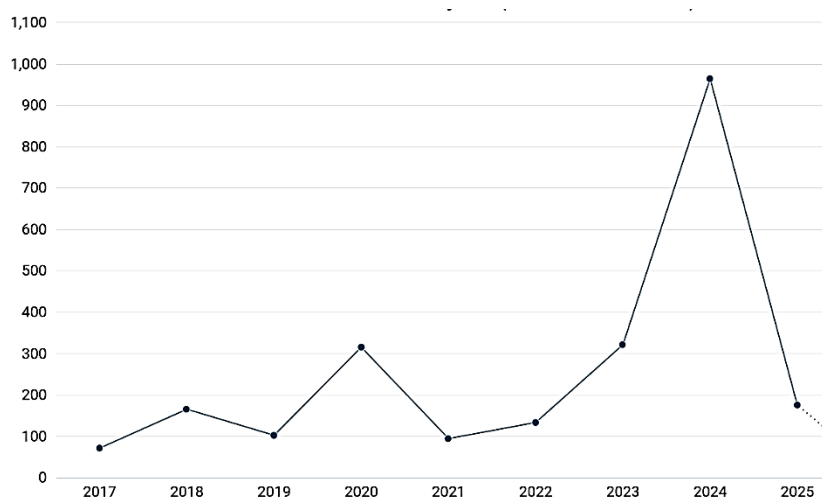
*Série temporal das quantidades de publicação do tema Patologia das construções*



Da mesma maneira, o pico de publicações sobre os temas ocorre no ano de 2024. Além disso, dois momentos de queda nas publicações chamam atenção, os anos de 2022 e 2025. O outro tema abordado nessa análise foi “Engenharia diagnóstica em prédios históricos”. Na Figura 5 constam as informações gráficas dessa busca.

**Figura 5.**

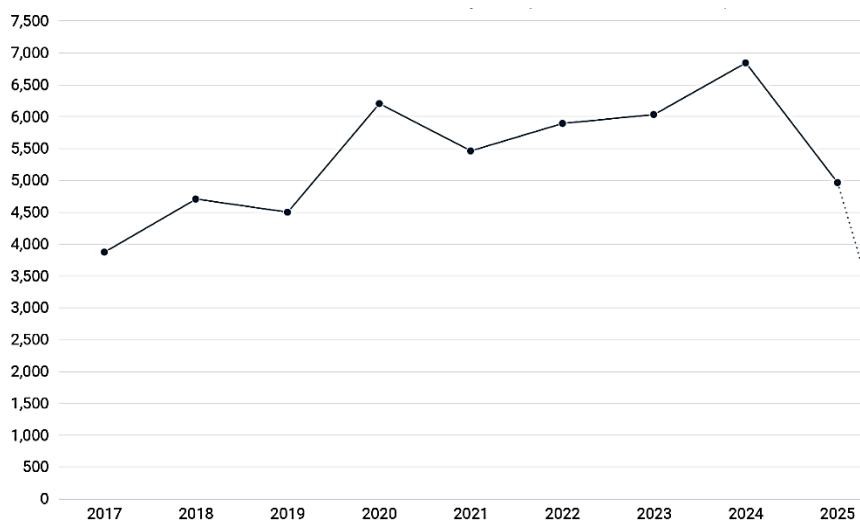
*Série temporal das quantidades de publicação do tema Engenharia diagnóstica em Prédios históricos*



Nessa fase da análise já é possível supor que existe uma tendência de que o ano de 2024 representou o momento em que houve um pico do número de publicações sobre os temas aqui abordados. Essa tendência vai se consolidando quando se observa a Figura 6.

**Figura 6.**

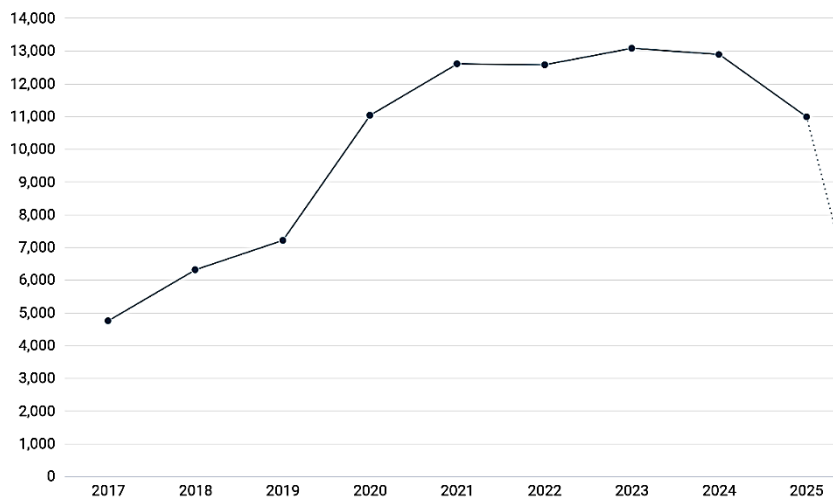
*Série temporal das quantidades de publicação do tema Mapa de Danos*



Outro tema pesquisado foi “Indústria 4.0”. O gráfico apresentado na Figura 7 demonstra que, entre os temas pesquisados, esse é o que tem apresentado ao longo dos anos o maior número de publicações. Esse fato indica a importância desse tema.

**Figura 7.**

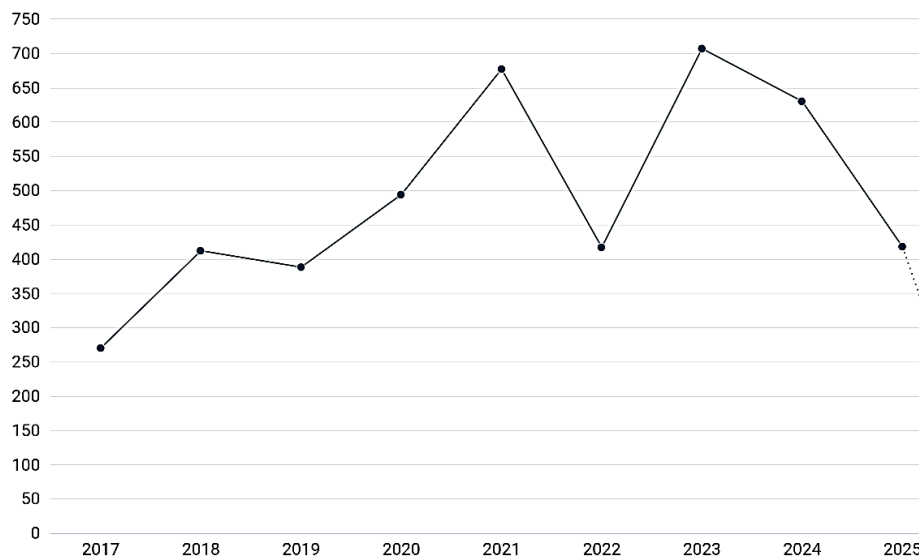
*Série temporal das quantidades de publicação do tema Industria 4.0*



O último tema abordado foi mais específico da área de processamento de imagens, a saber, Segmentação Semântica. Na Figura 8 constam os resultados da série temporal dos dados de publicação para esse tema.

**Figura 8.**

*Série temporal das quantidades de publicação do tema Segmentação Semântica*



Após analisar todos os resultados de busca pelos temas aqui abordados percebeu-se que são temas relevantes, pois sempre se apresentam como objeto de estudos. Além disso o ano de 2024 concentrou picos de publicações. A queda no número de publicações em 2025 para a maioria dos temas pode indicar um declínio dessas abordagens, porém só será possível fazer essa suposição de forma mais responsável quando dados de anos vindouros estiverem incluídos.

Na segunda parte dos resultados foram realizadas buscas sobre os mesmos temas nas seguintes bases de dados: Periódico Capes, *Scielo* Brasil e Google Acadêmico. No qual, inicialmente buscou-se resultados sem filtros, posteriormente, utilizamos filtros, sendo o primeiro através da leitura do título e o segundo a leitura do resumo, conforme demonstrado na Tabela 1.

**Tabela 1.**

*Resultados de busca nas bases de dados*

Especificações	Base de Dados					Total	
	Periódicos Capes	Scielo Brasil	Google Acadêmico	Scopus	Web of Science		
Palavras-chave	Segmentação semântica	20	3	18	2	1	44
	Segmentação semântica e construção civil	0	0	16	1	1	18
Total de artigos encontrados (sem filtro)		20	3	34	3	2	62
Filtros	1º Filtro – Leitura do título	7	2	9	1	1	20
	2º Filtro – Leitura do resumo	5	1	5	1	1	13
Total de pesquisas relevantes		5	1	5	1	1	13

Após a aplicação dos filtros foi possível listar os artigos encontrados. No Quadro 2 a lista desses artigos é apresentada.

### Quadro 2.

#### Lista de artigos selecionados após aplicação de todos os filtros

Título	Autor e Ano	País	Tipo / Periódico / Evento	Método/Arquitetura principal
Road crack detection using deep convolutional neural networks	Zhang et al. (2016)	EUA	Conferência – IEEE ICIP 2016	CNN supervisionada (classificação por patches)
Artificial Neural Networks in Construction Engineering and Management	Waziri et al. (2017)	Nigéria	Artigo – International Journal of Architecture, Engineering and Construction	Revisão de ANNs (Backpropagation, híbridos com GA/Fuzzy/PSO)
Concrete Crack Images for Classification (Dataset Mendeley)	Özgenel (2019)	Turquia	Dataset – Mendeley Data	Imagens 227x227 RGB; 40k amostras (20k com/sem fissura)
Segmentação de veias do pulso com uso de redes neurais convolucionais	Cardoso (2020)	Brasil	Dissertação/TCC – PUC Goiás	Comparação U-Net, SegNet e DeepLabv3 (SegNet melhor)
Redes neurais convolucionais e segmentação de imagens – revisão bibliográfica	Cunha (2020)	Brasil	Revisão/Monografia – UFOP	Revisão de FCN, CNN e aplicações
Deteção de fissuras utilizando Redes Neurais Convolucionais	Oliveira et al. (2021)	Brasil	Artigo – SIBGRAPI Estendido (SBC)	Detectron2 (Mask R-CNN)
Metodologia de fusão de dados usando aprendizado profundo para segmentação semântica de usos de solo na Amazônia	Oliveira (2021)	Brasil	Tese (Doutorado) – UFAM (TEDE)	CNN + segmentação multirresolução + fusão
Processamento digital de imagens para deteção automática de fissuras em revestimentos cerâmicos de edifícios	Ruiz et al. (2021)	Brasil	Artigo – Ambiente Construído	Pipeline de PDI com apoio de VANT/UAV
Um estudo comparativo de métodos de deep learning aplicados à segmentação semântica de obstáculos, zonas seguras e não seguras	Barbosa & Osório (2021)	Brasil	Conferência – Reunião Anual da SBPC (anais)	Comparação FCN, SegNet e Pix2Pix (GAN)
Deep Semantic Segmentation for Visual Understanding on Construction Sites	Wang et al. (2022)	EUA	Dataset + paper (a confirmar)	Modelos de segmentação semântica (a confirmar)
Automated Construction Site Monitoring Based on Improved YOLOv8-seg Instance Segmentation Algorithm	Bai et al. (2023)	China	Artigo – IEEE Access	YOLOv8-seg aprimorado (FocalNext, EMA, Context Aggregation)
Identificação Automatizada de Patologias via Segmentação Semântica	Pereira (2023)	Brasil	TCC	CNN/Segmentation (detalhes a confirmar)
NeRF-to-BIM: Semantic Segmentation for Construction Projects With Neural Radiance Fields	Hachisuka (2018)	EUA	Conferência – EC3/CIB W78 2023	NeRF + segmentação + conversão para BIM
Semantic Point Cloud Segmentation with Deep-Learning-Based Approaches for the Construction Industry: A Survey	Rauch & Braml (2023)	Alemanha	Survey – Applied Sciences (MDPI)	Survey
Semantic Segmentation of Building Components for Automated QA	2023	Canadá	Conferência – CSCE 2022 (publicado 2023) / LNCE	CNN para segmentação semântica (imagens sintéticas de BIM)

Avaliação da presença de fissuras em imagens de estruturas de concreto através de redes neurais profundas	Pereira Junior et al. (2024)	Brasil	Artigo – Revista Matéria	CNN (detalhes a confirmar)
Content annotation in images from outdoor construction jobsites using YOLOv8 and Swin Transformer	Farahat & Rezazadeh Azar (2024)	Canadá	Artigo – Smart Construction and Sustainable Cities (a confirmar)	YOLOv8 + Swin Transformer
Fine-tuning vision foundation model for crack segmentation in civil infrastructures (CrackSAM)	Ge et al. (2024)	China	Preprint – arXiv (também referido por Elsevier em submissão)	SAM + LoRA/Adapters (CrackSAM)
Innovative Approaches to Semantic Segmentation in Construction Sites	2024	Alemanha	Dissertação – TUM (Chair of Computational Modeling and Simulation)	Dataset próprio + RTMDet-SAM + Grounding DINO (zero-shot)
Semantic Segmentation of Heavy Construction Equipment Based on Point Cloud Data	Park & Kim (2024)	Coreia do Sul	Artigo – Buildings (MDPI)	RandLA-Net, KPConv (rigid/deformable), SCF-Net
Research and Application of YOLOv11-Based Object Segmentation for Intelligent Construction Sites	He et al. (2024)	China	Artigo – Buildings (MDPI)	YOLOv11-Seg (instância/segmentação)
ConstScene: A Dataset and Model for Advancing Robust Semantic Segmentation in Construction Environment	Salimi, Loni, Afshar, et al. (2025)	Suécia	Capítulo LNCS ICPRAI 2024 (2025) / Repositório GitHub	Dataset multi-condição + benchmarks de PCSS
Robust Few-Shot Semantic Segmentation for Blurred and ... Construction Environments	Salimi, Loni, Cicchetti, et al. (2025)	Suécia	IEEE (a confirmar)	Few-shot/Meta-learning para segmentação
Zero-Shot Object Detection And Segmentation For Construction Sites Through Multi-Model Integration	Tarutani & Himuro (2025)	Japão	Conferência (a confirmar)	Modelos visão-linguagem (p.ex., Grounding DINO / SAM)
Segmentação Socio-Semântica Urbana com Raciocínio Visão-Linguagem	2026	Brasil	Artigo	Visão-Linguagem (VLM) / Raciocínio visual

A lista de artigos apresentada no Quadro 02 evidencia que diversas técnicas têm sido utilizadas para realização de identificação de manifestações patológicas na indústria da construção civil. Outro ponto observado é a diversidade de Editoras/Periódicos que se interessam pela publicação e divulgação científica desse tema, o que reforça sua importância.

Os resultados obtidos nesta revisão sistemática evidenciam um cenário de crescente amadurecimento científico no campo da preservação do patrimônio histórico edificado, especialmente quando se considera a integração entre processos tradicionais de diagnóstico e métodos digitais avançados. Observou-se que temas como tombamento histórico, processo de restauração, patologia das construções, engenharia diagnóstica, mapa de danos e Indústria 4.0 mantêm presença constante na literatura contemporânea, com destaque para o significativo aumento de publicações no ano de 2024. Esse comportamento está alinhado às tendências identificadas por Volk et al. (2014), Deng et al. (2021) e Hu et al. (2022), que discutem a transformação digital no ambiente construído e o papel central de tecnologias emergentes no aperfeiçoamento dos processos de documentação, monitoramento e intervenção técnica em edificações.

A relevância do tema também é reforçada pelas diretrizes estabelecidas para conservação e restauração de bens tombados, que exigem diagnóstico preciso, documentação adequada e compatibilidade das intervenções com as características originais da edificação (IPHAN, 2015). Nesse sentido, a engenharia diagnóstica tem sido um eixo estruturante para a compreensão das manifestações patológicas, conforme argumentam Helene (1981), Souza e Ripper (1998) e Tinoco (2009), que destacam a importância de metodologias capazes de identificar mecanismos de degradação e orientar estratégias de reparo.

O aumento no número de publicações encontrado nesta revisão confirma essas observações e demonstra um interesse crescente da comunidade científica pela aplicação de novas tecnologias no estudo do patrimônio edificado. As técnicas de fotogrametria digital, termografia infravermelha, escaneamento a laser 3D (TLS) e uso de drones amplamente descritas por Maldague (2001), Bertolini (2010), Melo e Melo (2023) e Alencastro et al. (2019) aparecem como ferramentas consolidadas no mapeamento de manifestações patológicas. Sua adoção tem permitido análises mais rápidas, seguras e precisas, contribuindo para diagnósticos mais robustos e alinhados com padrões internacionais de conservação.

Outro ponto marcante nos resultados diz respeito à crescente inserção de modelos BIM e, especialmente, HBIM, como forma de integrar dados de inspeção, histórico construtivo e registros de manutenção em um ambiente digital unificado. Trabalhos como os de Sacks et al. (2018), Penjor et al. (2024) e Cui et al. (2025) reforçam a importância desses modelos para a documentação e gestão inteligente de edificações históricas, destacando desafios de interoperabilidade, padronização e atualização contínua dos modelos. O alinhamento dessas tecnologias com habilitadores da Indústria 4.0, especialmente sensoriamento remoto, análise massiva de dados e automação, é amplamente discutido por Deng et al. (2021) e Hu et al. (2022), o que ajuda a explicar o expressivo crescimento de publicações sobre esse eixo temático.

Apesar desse cenário promissor, a análise dos resultados revelou uma lacuna científica relevante: a escassez de estudos que relacionem diretamente técnicas de segmentação semântica em especial redes neurais convolucionais e aprendizado profundo com a identificação automática de manifestações patológicas em fachadas de prédios históricos. Embora o uso de inteligência artificial esteja amplamente difundido em outras áreas da engenharia, sua aplicação específica ao contexto de edificações históricas ainda apresenta limitações, como indicam Ferreira (2017), Fleck et al. (2016), Vargas, Paes e Vasconcelos (2016) e Juraszek et al. (2014). A baixa quantidade de artigos relevantes encontrados após os filtros aplicados nesta revisão comprova que, apesar do potencial reconhecido, a segmentação semântica ainda não se consolidou como ferramenta amplamente utilizada no diagnóstico de patologias construtivas, sobretudo em ambientes com alto grau de particularidade, como o patrimônio tombado.

Essa lacuna ganha ainda mais relevância ao se considerar que inspeções em edificações históricas frequentemente envolvem riscos, custos elevados, acesso restrito e necessidade de alta precisão características que tornam as técnicas de IA especialmente promissoras. A escassez de estudos que integrem IA, patrimônio histórico e engenharia diagnóstica reforça a necessidade de aprofundamento teórico e experimental nessa área, algo também apontado por trabalhos recentes sobre automação e digital twins na construção, como Baghdadi (2025) e Ma et al. (2025).

Diante desse panorama, os resultados da presente revisão demonstram que o objetivo inicial identificar, sistematizar e analisar criticamente a produção científica sobre mapeamento de manifestações patológicas em fachadas de edificações históricas, com foco em tecnologias digitais foi plenamente alcançado. A análise do material selecionado permitiu construir um retrato abrangente do estado da arte, evidenciando o avanço significativo das técnicas de documentação digital, a consolidação de metodologias tradicionais da engenharia diagnóstica e, sobretudo, a existência de uma lacuna científica persistente no que se refere ao emprego de modelos avançados de segmentação semântica e inteligência artificial para a detecção automática de patologias em edificações tombadas. Esse achado reforça que, embora as tecnologias de aprendizado profundo estejam amplamente difundidas em diversos ramos da engenharia, sua adoção no contexto do patrimônio histórico permanece incipiente e carece de maior aprofundamento teórico e experimental.

Além disso, a síntese dos estudos analisados evidencia que a integração entre métodos tradicionais de inspeção e ferramentas digitais emergentes da Indústria 4.0 não apenas é tecnicamente viável, mas se mostra cada vez mais necessária diante das demandas contemporâneas por processos de diagnóstico mais eficientes, seguros, reprodutíveis e baseados em dados. A aplicação de técnicas como fotogrametria digital, termografia, escaneamento a laser 3D, plataformas UAV e modelos BIM/HBIM revela um movimento consistente da literatura em direção à digitalização do ciclo de vida das edificações históricas, contribuindo para documentação mais precisa e para intervenções compatíveis com diretrizes de conservação, especialmente no que se refere à rastreabilidade e historicidade das soluções adotadas.

Assim, esta revisão contribui ao organizar criticamente o cenário científico atual e oferecer uma base teórica robusta para pesquisadores, profissionais e instituições que atuam no campo da conservação do patrimônio edificado. Os resultados demonstram que ainda existe amplo espaço para desenvolvimento de soluções inovadoras, sobretudo aquelas que aproximem a engenharia diagnóstica dos sistemas inteligentes de apoio à decisão, da automação e dos modelos preditivos. Os achados reforçam, portanto, a importância estratégica da aplicação de tecnologias digitais e de IA no estudo de edificações históricas, apontando caminhos promissores para a modernização das práticas de inspeção, o fortalecimento da

gestão documental e a preservação qualificada do patrimônio cultural em um contexto global de transformação digital.

### **Considerações Finais/Conclusões**

A presente revisão sistemática da literatura evidenciou uma expressiva produção científica relacionada aos temas tombamento histórico, processo de restauração, patologia das construções, engenharia diagnóstica aplicada a prédios históricos, mapa de danos, Indústria 4.0 e segmentação semântica. A elevada quantidade de publicações encontradas demonstra o crescente interesse da comunidade científica por abordagens que integrem preservação do patrimônio construído, diagnóstico técnico e o uso de tecnologias avançadas no contexto da engenharia e da arquitetura.

Observou-se, ainda, que o ano de 2024 concentrou o maior número de publicações, indicando uma intensificação recente das pesquisas nessas áreas. Esse aumento pode ser associado à ampliação do uso de ferramentas digitais, técnicas de automação, inteligência artificial e metodologias inovadoras aplicadas ao diagnóstico, monitoramento e conservação de edificações históricas, especialmente no contexto da Indústria 4.0.

Outro aspecto relevante identificado foi a diversidade de periódicos e editoras que abordam a temática, o que evidencia o caráter multidisciplinar do assunto e sua relevância tanto no campo da engenharia civil quanto nas áreas de patrimônio histórico, arquitetura, ciência dos materiais e tecnologias computacionais. Essa variedade de fontes reforça a consolidação do tema no cenário científico e demonstra seu potencial de aplicação em diferentes contextos acadêmicos e profissionais.

Dessa forma, conclui-se que a literatura analisada confirma a importância e atualidade do tema, além de indicar um campo fértil para futuras pesquisas, especialmente aquelas que integrem métodos tradicionais de análise com ferramentas digitais avançadas. A consolidação desses estudos contribui significativamente para a preservação do patrimônio histórico, o aprimoramento dos processos de diagnóstico construtivo e o avanço tecnológico no setor da construção civil.

### **REFERÊNCIAS**

- ABNT, A. B. de N. T. (2020). *NBR 16747/2020 - INSPECÇÃO PREDIAL: Diretrizes, Conceitos, Terminologia e Procedimento/ Predial Inspection - Guidelines, concepts, terminology and procedure* (1ª edição). <https://sindicolegal.com/abnt-nbr-16747-2020-inspeção-predial-diretrizes-conceitos-terminologias-e-procedimentos/>
- Alencastro, Y. O., Dantas, P. V. de F., Silva, F. P. da, & Jacques, J. J. de. (2019). Ferramentas de digitalização 3D faça-você-mesmo na preservação do patrimônio cultural. *Interações (Campo Grande)*, 20, 435–448. <https://doi.org/10.20435/INTER.VO10.1744>
- Booth, A., Sutton, A., & Papaioannou, D. (2016). *Systematic Approaches to a Successful Literature Review* (Second Edition). SAGE Publications Inc. <https://www.researchgate.net/profile/Andrew-Booth->

- 2/publication/235930866\_Systematic\_Approaches\_to\_a\_Successful\_Literature\_Review/links/5da06c7f45851553ff8705fa/Systematic-Approaches-to-a-Successful-Literature-Review.pdf
- Antunes, G. R. (2010). *Estudo de manifestações patológicas em revestimento de fachada em Brasília - sistematização da incidência de casos*. <https://repositorio.unb.br/handle/10482/8932>
- Baghdadi, A. (2025). A comprehensive review of digital twin implementation in construction: current trends and future directions. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. <https://doi.org/10.1080/13467581.2025.2517242>
- Bai, R., Wang, M., Zhang, Z., Lu, J., & Shen, F. (2023). Automated Construction Site Monitoring Based on Improved YOLOv8-seg Instance Segmentation Algorithm. *IEEE Access*, *11*, 139082–139096. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3340895>
- Barbosa, F. M., & Osório, F. S. (2021). Um Estudo Comparativo De Métodos De Deep Learning Aplicados À Segmentação Semântica De Obstáculos, Zonas Seguras E Não Seguras Para Navegação A Partir De Dados RGB-D. *Metodologia e Técnicas Da Computação*.
- Bauer, E., Bezerra, N. M., & Castro, E. K. De. (2006). *Relatório técnico: n.º 06050020-a*.
- Bertolini, L. (2010). *Materiais de construção: patologia, reabilitação e prevenção* (1ª ed). Grupo A. <https://www.bvirtual.com.br/NossoAcervo/Publicacao/180525>
- Birch, J. (2006). Using 3DM Analyst Mine Mapping Suite for Rock Face Characterisation. *Laser and Photogrammetric Methods for Rock Face Characterization*, (ii), 13–32.
- Boccacci, G., Frasca, F., Bertolin, C., & Siani, A. M. (2024). Diagnosis of Historic Reinforced Concrete Buildings: A Literature Review of Non-Destructive Testing (NDT) Techniques. *Procedia Structural Integrity*, *55*(2), 160–167. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.02.021>
- Bordalo, R., De Brito, J., Gaspar, P. L., & Silva, A. (2010). Service life prediction modelling of adhesive ceramic tiling systems. *Http://Dx.Doi.Org/10.1080/09613218.2010.532197*, *39*(1), 66–78. <https://doi.org/10.1080/09613218.2010.532197>
- Cardoso, M. S. (2020). *Segmentação de veias do pulso com uso de segmentação semântica*. <https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/390>
- Cerri, R., & Carvalho, C. A. P. de L. F. de. (2017). Aprendizado De Máquina: Breve Introdução E Aplicações. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, *34*, 297–313. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/184785/1/Aprendizado-de-maquina-breve-introducao.pdf>
- Creswell, J. W., & Clark, V. L. (2017). *Designing and conducting mixed methods research* (3 ed.). SAGE. <https://www.gov.br/anatel/pt-br/composicao/ceadi/repositorio/designing-and-conducting-mixed-methods-research>
- Cui, H., & Wu, J. (2025). How Architectural Heritage Is Moving to Smart: A Systematic Review of HBIM. *Buildings 2025, Vol. 15, 15*(15). <https://doi.org/10.3390/buildings15152664>
- Cunha, L. C. da. (2020). *Redes neurais convolucionais e segmentação de imagens : uma revisão bibliográfica*. [Universidade Federal de Ouro Preto]. <http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/2872>
- Deng, M., Menassa, C. C., & Kamat, V. R. (2021). From BIM to digital twins: a systematic review of the evolution of intelligent building representations in the AEC-FM industry. *Journal of Information Technology in Construction*, *26*(5), 58–83. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.005>
- Falagas, M. E., Pitsouni, E. I., Malietzis, G. A., & Pappas, G. (2008). Comparison of PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar: strengths and weaknesses. *FASEB Journal : Official Publication of the Federation of American Societies for Experimental Biology*, *22*(2), 338–342. <https://doi.org/10.1096/fj.07-9492lsf>
- Farahat, L., & Rezazadeh Azar, E. (2024). Content annotation in images from outdoor construction jobsites using YOLO V8 and Swin transformer. *Smart Construction and Sustainable Cities 2024 2:1, 2*(1), 10-. <https://doi.org/10.1007/s44268-024-00036-4>
- Ferreira, A. dos S. (2017). *Redes Neurais Convolucionais Profundas na Detecção de Plantas Daninhas em Lavoura de Soja*. Universidade Federal do Mato Grosso do Sul.

- Fleck, L., Tavares, M. H. F., Eyng, E., Helmann, A. C., & Andrade, M. A. de M. (2016). Redes neurais artificiais: princípios básicos. *Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia*, 7(15), 47–57. <https://doi.org/10.3895/RECIT.V7I15.4330>
- Ge, K., Wang, C., Guo, Y., Tang, Y., Hu, Z., & Chen, H. (2024). Fine-tuning vision foundation model for crack segmentation in civil infrastructures. *Construction and Building Materials*, 431. <http://arxiv.org/abs/2312.04233>
- Gil, A. C. (2019). *Metodos E Tecnicas De Pesquisa Social* (7<sup>a</sup> Ed). Atlas. <https://www.disal.com.br/produto/5684021-Metodos-E-Tecnicas-De-PesquisaSocial>
- Gomes, D. dos S. (2010). Inteligência Artificial: Conceitos e Aplicações. *Revista Olhar Científico*, 1.
- Gough, D., Thomas, J., & Oliver, S. (2012). Clarifying differences between review designs and methods. *Systematic Reviews* 2012 1:1, 1(1), 28-. <https://doi.org/10.1186/2046-4053-1-28>
- Hachisuka, S. (2018). *NeRF-to-BIM : Semantic Segmentation for Construction Project with Neural Radiance Fields*. [https://cs230.stanford.edu/projects\\_fall\\_2022/reports/31.pdf](https://cs230.stanford.edu/projects_fall_2022/reports/31.pdf)
- Haddaway, N. R., Collins, A. M., Coughlin, D., & Kirk, S. (2015). The Role of Google Scholar in Evidence Reviews and Its Applicability to Grey Literature Searching. *PLOS ONE*, 10(9), e0138237. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138237>
- He, L., Zhou, Y., Liu, L., & Ma, J. (2024). Research and Application of YOLOv11-Based Object Segmentation in Intelligent Recognition at Construction Sites. *Buildings* 2024, Vol. 14, 14(12). <https://doi.org/10.3390/buildings14123777>
- Helene, P. R. L. (1981). Patologia das construções de concreto. *Construção Pesada*, 112–122.
- Hook, D. W., Porter, S. J., & Herzog, C. (2018). Dimensions: Building Context for Search and Evaluation. *Frontiers in Research Metrics and Analytics*, 3, 386181. <https://doi.org/10.3389/frma.2018.00023>
- Hu, W., Lim, K. Y. H., & Cai, Y. (2022). Digital Twin and Industry 4.0 Enablers in Building and Construction: A Survey. *Buildings* 2022, Vol. 12, 12(11). <https://doi.org/10.3390/buildings12112004>
- Hussain, A., & Akhtar, S. (2017). Review of Non-Destructive Tests for Evaluation of Historic Masonry and Concrete Structures. *Arabian Journal for Science and Engineering* 2017 42:3, 42(3), 925–940. <https://doi.org/10.1007/s13369-017-2437-y>
- IPHAN, I. do P. H. e A. N. (2015). *INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 001, DE 25 DE MARÇO DE 2015*. [http://portal.iphan.gov.br/uploads/legislacao/INSTRUCAO\\_NORMATIVA\\_001\\_DE\\_25\\_DE\\_MARCO\\_DE\\_2015.pdf](http://portal.iphan.gov.br/uploads/legislacao/INSTRUCAO_NORMATIVA_001_DE_25_DE_MARCO_DE_2015.pdf)
- Silva Junior, D. de S., Santos, R. C. dos, & Santos, I. L. dos. (2020). Industry Innovations 4.0 Process Management In The Provision Of Services In The Construction Industry. *Future Studies Research Journal: Trends and Strategies*, 12(3), 394–415. <https://doi.org/10.24023/futurejournal/2175-5825/2020.v12i3.500>
- Pereira Junior, W. M., Silva, S. F. da, Silva, A. R. e, Rezio, L. H. F., Silva, M. P. da, Guimarães, N. R. da S., & Canuto, S. D. C. (2024). Avaliação da presença de fissuras em imagens de estruturas de concreto através do uso de redes neurais profundas. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 29(4), e20240354. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-rmat-2024-0354>
- Juraszek, G., Silva, A. G., & Silva, A. T. de. (2014). *Reconhecimento de Produtos por Imagem Utilizando Palavras Visuais e Redes Neurais Convolucionais*. [https://www.researchgate.net/publication/283213966\\_Reconhecimento\\_de\\_Produtos\\_por\\_Imagem\\_Utilizando\\_Palavras\\_Visuais\\_e\\_Redets\\_Neurais\\_Convolucionais](https://www.researchgate.net/publication/283213966_Reconhecimento_de_Produtos_por_Imagem_Utilizando_Palavras_Visuais_e_Redets_Neurais_Convolucionais)
- Kitchenham, B., & Charters, S. (2007). *Guidelines for Performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering*. <https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers?ReferenceID=1555797>
- Tinoco, J. E. L. (2009). *Mapa de Danos Recomendações Básicas*. [www.ceci-br.org](http://www.ceci-br.org)
- Ludermir, T. B. (2021). Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina: estado atual e tendências. *Estudos Avançados*, 35(101), 85–94. <https://doi.org/10.1590/S0103-4014.2021.35101.007>
- Ma, Y., Tong, Q., He, X., & Su, B. (2025). Exploring virtual restoration of architectural heritage through a systematic review. *Npj Heritage Science* 2025 13:1, 13(1), 167-. <https://doi.org/10.1038/s40494-025-01688-w>

- Maldague, X. (2001). Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. In *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing* (9). Wiley-Interscience. <https://www.wiley.com/en-us/Theory+and+Practice+of+Infrared+Technology+for+Nondestructive+Testing-p-9780471181903>
- Marconi, M. de A., & Lakatos, E. M. (2017). *Fundamentos de Metodologia Científica* (8. ed.). Atlas. [https://ia600709.us.archive.org/26/items/Fundamentos\\_de\\_metodologia\\_cientifica\\_8\\_ed.\\_-\\_\\_www.meulivro.biz/Fundamentos\\_de\\_metodologia\\_cientifica\\_8\\_ed.\\_-\\_\\_www.meulivro.biz.pdf](https://ia600709.us.archive.org/26/items/Fundamentos_de_metodologia_cientifica_8_ed._-__www.meulivro.biz/Fundamentos_de_metodologia_cientifica_8_ed._-__www.meulivro.biz.pdf)
- Melo, A., & Melo, M. (2023). Utilização De Vant Para Inspeção De Patologias Em Fachadas: Uma Análise Entre Metodologias. *Revista de Engenharia Da Universidade Católica de Petrópolis*, 17(2), 50–61. <https://seer.ucp.br/seer/index.php/REVCEC/article/view/2882>
- Miyamoto, S. S. D. T. O. (2004). Fuzzy c-Means Classifier for Relational Data. *IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*.
- Mongeon, P., & Paul-Hus, A. (2015). The journal coverage of Web of Science and Scopus: a comparative analysis. *Scientometrics* 2015 106:1, 106(1), 213–228. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1765-5>
- Oliveira, J. P. de. (2021). *Metodologia de Fusão de Dados usando aprendizado profundo para segmentação semântica de usos de solo na Amazônia* [Universidade Federal do Amazonas]. <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/8138>
- Oliveira, R. P. C. de, Mauricio, C. R. M., Santos, V. N. dos, & Peres, F. F. F. (2021). Detecção de Fissuras Utilizando Redes Neurais Convolucionais. *Anais Estendidos Da XXXIV Conference on Graphics, Patterns and Images (SIBRAPI Estendido 2021)*, 212–217. <https://doi.org/10.5753/sibgrapi.est.2021.20041>
- Özgenel, Ç. F. (2019). *Concrete Crack Images for Classification. 2*. <https://doi.org/10.17632/5Y9WDSG2ZT.2>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Park, S., & Kim, S. (2024). Semantic Segmentation of Heavy Construction Equipment Based on Point Cloud Data. *Buildings* 2024, Vol. 14, 14(8). <https://doi.org/10.3390/buildings14082393>
- Penjor, T., Banihashemi, S., Hajirasouli, A., & Golzad, H. (2024). Heritage building information modeling (HBIM) for heritage conservation: Framework of challenges, gaps, and existing limitations of HBIM. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 35, e00366. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2024.e00366>
- Pereira, W. F. (2023). *Identificação automatizada de manifestações patológicas por meio de segmentação semântica: fissuras, rachaduras, trincas e fendas*. <http://rosario.ufma.br:8080/jspui/handle/123456789/6731>
- Rauber, T. W. (2005). *Redes Neurais Artificiais*.
- Rauch, L., & Braml, T. (2023). Semantic Point Cloud Segmentation with Deep-Learning-Based Approaches for the Construction Industry: A Survey. *Applied Sciences* 2023, Vol. 13, 13(16). <https://doi.org/10.3390/app13169146>
- Ruiz, R. D. B., Lordsleem Junior, A. C., Sousa Neto, A. F. de, & Fernandes, B. J. T. (2021). Processamento digital de imagens para detecção automática de fissuras em revestimentos cerâmicos de edifícios. *Ambiente Construído*, 21(1), 139–147. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000100498>
- Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2018). BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers. In *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers* (Third Edition). Wiley.
- Salimi, M., Loni, M., Afshar, S., Cicchetti, A., & Sirjani, M. (2025). ConstScene: A Dataset and Model for Advancing Robust Semantic Segmentation in Construction Environment. *Lecture Notes in*

- Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 14893 LNCS, 242–253. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-8705-0\\_16](https://doi.org/10.1007/978-981-97-8705-0_16)
- Salimi, M., Loni, M., Cicchetti, A., & Sirjani, M. (2025). Robust Few-Shot Semantic Segmentation for Blurred and Occluded Objects in Construction Environments. *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*. <https://doi.org/10.1109/IJCNN64981.2025.11227444>
- Silva, J. A. S. da, & Mairink, C. H. P. (2019). Inteligência artificial: aliada ou inimiga. *Libertas: Revista de Ciências Sociais Aplicadas*, 9, 64–85. <https://famigvirtual.com.br/famig-libertas/index.php/libertas/article/view/247>
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104(1), 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Souza, V. C. M. de, & Ripper, T. (1998). *Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto* (1 ed., Ed.). Pini. <https://lucasmonteirostite.wordpress.com/wp-content/uploads/2017/08/vicente-custc3b3dio-e-thomaz-ripper-patologia-recuperacao-e-reforco-de-estruturas-de-concreto.pdf>
- Tarutani, A., & Himuro, F. (2025). *Zero-Shot Object Detection And Segmentation For Construction Sites Through Multi-Model Integration*. <https://doi.org/10.22260/ccc2025/0023>
- Tashakkori, A., & Teddlie, C. (2015). SAGE Handbook of Mixed Methods in Social & Behavioral Research. *SAGE Handbook of Mixed Methods in Social & Behavioral Research*. <https://doi.org/10.4135/9781506335193>
- Teixeira, F. dos S., Teixeira, P. dos S., & Rocha, C. A. M. da. (2020). Estudo Prospectivo Sobre Inteligência Artificial Aplicado ao Setor da Construção Civil. *Cadernos de Prospecção*, 13(4), 1134–1134. <https://doi.org/10.9771/CP.V13I4.32975>
- Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. *British Journal of Management*, 14(3), 207–222. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>
- Vargas, A. C. G., Paes, A., & Vasconcelos, C. N. (2016). Um Estudo sobre Redes Neurais Convolucionais e sua Aplicação em Detecção de Pedestres. *Proceedings of the Xxix Conference on Graphics, Patterns and Images*, 1. <http://sibgrapi.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sibgrapi/2016/09.12.15.44/doc/um-estudo-sobre.pdf?languagebutton=en>
- Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - Literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38, 109–127. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>
- Wang, Z., Zhang, Y., Mosalam, K. M., Gao, Y., & Huang, S. L. (2022). Deep semantic segmentation for visual understanding on construction sites. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 37(2), 145–162. <https://doi.org/10.1111/mice.12701>
- Waziri, B. S., Bala, K., & Bustani, S. A. (2017). Artificial Neural Networks in Construction Engineering and Management. *International Journal of Architecture, Engineering and Construction*, 6(1). <https://doi.org/10.7492/IJAEC.2017.006>
- Zhang, L., Yang, F., Daniel Zhang, Y., & Zhu, Y. J. (2016). Road crack detection using deep convolutional neural network. *Proceedings - International Conference on Image Processing, ICIP, 2016-August*, 3708–3712. <https://doi.org/10.1109/ICIP.2016.7533052>