

# INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E TECNOLOGIAS DIGITAIS EM INSPEÇÃO DE PAVIMENTOS URBANOS EM CIDADES INTELIGENTES

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado de cidades e a intensificação da mobilidade urbana têm imposto desafios à gestão pública, entre eles a manutenção da infraestrutura viária. A degradação de vias compromete a segurança de usuários, eleva custos e reduz a eficiência dos serviços urbanos (Wang et al., 2022; Osman et al., 2022). Métodos convencionais de inspeção, baseados em observações visuais de humanos, são limitados por demandarem elevada quantidade de profissionais e estarem sujeitos a falhas e subjetividade (Cubero-Fernandez et al., 2017).

O conceito de cidades inteligentes pressupõe a utilização intensiva de tecnologias digitais como Internet das Coisas, big data, computação em nuvem e Inteligência Artificial (IA), para otimizar processos, ampliar a eficiência dos serviços públicos e apoiar políticas de sustentabilidade (Li e Xuan, 2017; Englund et al., 2021; Shahat et al., 2021). Wang et al., (2022) afirmam que cidades inteligentes possibilitam a integração de dados e a criação de plataformas que auxiliam gestores na tomada de decisões, o que tornam espaços urbanos mais resilientes e inclusivos. Assim, o debate sobre cidades inteligentes vai além da adoção de ferramentas digitais, envolvendo também a construção de ecossistemas urbanos que conciliem inovação tecnológica, participação social e responsabilidade ambiental. Entre os eixos centrais desse paradigma, a mobilidade urbana destaca-se por impactar diretamente a economia, a segurança viária e a vida cotidiana (Kumar et al., 2020).

Tecnologias de Indústria 4.0 abre novas possibilidades para monitoramento e manutenção da infraestrutura urbana. Algoritmos de aprendizado de máquina associados a dispositivos de coleta de imagens mostram-se promissores para identificar patologias em pavimentos, como trincas e buracos, de forma mais rápida e precisa que métodos tradicionais (Ibrahim, Haworth e Cheng, 2021; Baduge et al., 2022). Essa inovação pode reduzir custos, aumentar a segurança viária e apoiar políticas de mobilidade sustentável.

Apesar dos avanços internacionais, observa-se no Brasil uma lacuna quanto à aplicação prática em larga escala, o que reforça a necessidade de estudos sobre sua viabilidade no contexto urbano nacional. Assim, este artigo tem como objetivo analisar, a partir da literatura científica, o uso da IA e de tecnologias digitais associadas a dispositivos de coleta de imagens no processo de inspeção de pavimentos, discutindo suas contribuições para a mobilidade e a sustentabilidade em cidades inteligentes. A pesquisa busca oferecer subsídios teóricos que superem limitações dos métodos convencionais e preencher uma lacuna da literatura nacional, ainda incipiente sobre o tema. Com isso, reforça-se o papel da academia na proposição de soluções inovadoras e sustentáveis para o planejamento urbano.

## 2 MÉTODO

Este estudo teórico-conceitual foi realizado por meio de uma revisão integrativa da literatura. Este método permite reunir e sintetizar resultados de pesquisas empíricas e teóricas para fornecer subsídios para o avanço do conhecimento em campos emergentes (Whittemore e Knafl, 2005; Torraco, 2005). A revisão integrativa da literatura é adequada para integrar diferentes abordagens e delinear tendências em áreas interdisciplinares, possibilitando identificar lacunas e propor direções para estudos futuros (Souza, Silva & Carvalho, 2010).

A busca de estudos foi realizada na base Web of Science. Um filtro foi acionado para delimitar a busca a publicações a partir de 2017 sobre inspeção de pavimentação de vias urbanas e tecnologias da Indústria 4.0. Foram considerados artigos e reviews relacionados a detecção

de danos, segmentação de imagens, diagnóstico de falhas, aprimoramento de imagem, aprendizado de máquina, visão computacional e aplicações da Indústria 4.0 em infraestrutura urbana.

Os estudos selecionados foram examinados por meio de análise de conteúdo para identificar padrões, tendências e implicações práticas relatadas na literatura. Essa investigação permitiu organizar uma síntese das tecnologias empregadas e suas vantagens, que fundamenta a discussão apresentada nos resultados e destaca as principais contribuições teóricas para a inovação em mobilidade e sustentabilidade nas cidades inteligentes.

### **3 RESULTADOS SOBRE O USO DE TECNOLOGIAS DIGITAIS EM INSPEÇÃO DE PAVIMENTOS**

Os achados da literatura revelam que a deterioração de pavimentos é um problema global, agravado por fatores estruturais, tráfego intenso e condições ambientais, o que torna indispensável a adoção de métodos de monitoramento mais eficazes (Hoang, 2018; Munawar et al., 2021). No Brasil, parte significativa da malha viária se encontra em estado crítico, o que eleva risco de acidentes e custos (CNT, 2023). Métodos tradicionais de inspeção, baseados em observação de humano, são limitados por sua subjetividade, alto custo e baixa escalabilidade (Coenen, Golroo, 2017; Cubero-Fernandez et al., 2017). Desta forma, o emprego de tecnologias digitais e de IA surge como alternativa promissora para aumentar a precisão, reduzir custos e agilizar intervenções em infraestrutura viária.

Avanços em aprendizado de máquina (machine learning) possibilitam o desenvolvimento de algoritmos capazes de aprender padrões a partir de dados históricos e aplicá-los a novas entradas. Técnicas supervisionadas, não supervisionadas e por reforço têm sido aplicadas na classificação de defeitos, detecção de anomalias e predição de falhas em pavimentos (Albatayneh, Forslöf & Ksaibati, 2020; Rampini et al., 2022). Redes neurais artificiais permitem analisar imagens digitais coletadas por câmeras, ampliando a confiabilidade do processo de inspeção (Hoang, 2018).

No campo do aprendizado profundo (deep learning), as redes neurais convolucionais ocupam papel de destaque. Essas arquiteturas, compostas por camadas de convolução, amostragem reduzida e totalmente conectadas, demonstraram alta capacidade de identificar fissuras superficiais, buracos e outras patologias em imagens de pavimentos (Baduge et al., 2022; Tabian, Fu & Sharif Khodaei, 2019). Sua principal vantagem está na habilidade de extrair padrões complexos e multidimensionais, superando limitações de algoritmos tradicionais. Aplicações confirmam sua eficácia na previsão de danos em pavimentos multipistas e na detecção de defeitos estruturais em túneis, quando combinadas a sensores e câmeras em veículos não tripulados (Osman et al., 2022; Shim et al., 2023).

A visão computacional também se consolidou como ferramenta estratégica. Ao transformar imagens e vídeos em dados estruturados, possibilita detectar, classificar e segmentar irregularidades de forma automatizada (Guzmán-Torres et al., 2023). Sensores de alta resolução permitem identificar fissuras milimétricas (Shim et al., 2023), enquanto técnicas de realidade mista, integradas a dispositivos holográficos, oferecem inspeções em tempo real com informações sobre a dimensão de rachaduras e áreas danificadas (Karaaslan, Bagci e Catbas, 2019).

A literatura destaca ainda a crescente aplicação da robótica e veículos autônomos. Robôs terrestres não tripulados e drones equipados com câmeras e sensores têm sido usados para capturar imagens e vídeos da superfície do pavimento, que posteriormente são analisados por algoritmos de IA (Peraka, Bibligiri e Kalidindi, 2021; Shim et al., 2023). Essa abordagem amplia a cobertura espacial e reduz riscos para trabalhadores.

Outros recursos tecnológicos reforçam o potencial da digitalização. O radar de penetração no solo combinado a câmeras gera perfis tridimensionais que permitem medir espessura do asfalto e estimar a gravidade de fissuras (Coenen, Golroo, 2017; Shim et al., 2023). Outra tecnologia, a termografia infravermelha, auxilia na identificação de delaminações internas em concreto, explorando diferenças de temperatura entre fissuras e superfícies (Karaaslan, Bagci e Catbas, 2019). Além disso, sensores 3D e nuvens de pontos processadas por aprendizado profundo possibilitam a segmentação e análise de defeitos em diferentes perspectivas, ampliando a base de dados e a precisão dos diagnósticos (Xu et al., 2021).

Os resultados da análise apresentada estão organizados no Quadro 1, que sintetiza as tecnologias digitais, as formas de aplicação e as contribuições relatadas na literatura.

Quadro 1 – Síntese de tecnologias digitais em inspeção de pavimentos urbanos.

<b>Tecnologia</b>	<b>Aplicações</b>	<b>Contribuições</b>	<b>Referências</b>
Inteligência Artificial	Integração de algoritmos para inspeção automatizada.	Base conceitual que sustenta a automação, reconhecimento de padrões e tomada de decisão.	Ibrahim, Haworth e Cheng (2021); Baduge et al. (2022); Osman et al. (2022)
Internet das Coisas	Conexão de sensores, câmeras e drones em tempo real.	Ampliação da coleta de dados, suporte à mobilidade inteligente e gestão integrada.	Li e Xuan (2017); Shahat et al. (2021); Englund et al. (2021)
Aprendizado de máquina	Classificação de defeitos; detecção de anomalias; predição de falhas em pavimentos.	Identificação de padrões a partir de dados; aumento da confiabilidade das análises.	Albatayneh, Forslöf & Ksaibati (2020); Rampini et al. (2022); Hoang (2018)
Aprendizado profundo / Redes neurais convolucionais	Processamento de imagens de pavimentos; detecção de fissuras, buracos e patologias estruturais.	Extração de padrões complexos; previsão de danos; maior precisão em rodovias e túneis.	Baduge et al. (2022); Tabian, Fu & Sharif Khodaei (2019); Osman et al. (2022); Shim et al. (2023)
Visão computacional	Transformação de imagens e vídeos em dados estruturados; segmentação automática de defeitos.	Detecção automatizada de irregularidades; análises em tempo real; inspeções com realidade mista.	Guzmán-Torres et al. (2023); Shim et al. (2023); Karaaslan, Bagci e Catbas (2019)
Robótica e veículos autônomos	Captura de imagens e vídeos da superfície de pavimentos.	Maior cobertura espacial; redução de riscos para trabalhadores; monitoramento em tempo real.	Peraka, Biblihiri e Kalidindi (2021); Shim et al. (2023)
Radar de penetração no solo	Geração de perfis 3D; medição da espessura do asfalto.	Avaliação mais completa da gravidade de fissuras; suporte a diagnósticos estruturais.	Coenen, Golroo (2017); Shim et al. (2023)
Termografia infravermelha	Identificação de delaminações internas em concreto.	Detecção precoce de danos ocultos; análise por diferença de temperatura.	Karaaslan, Bagci e Catbas (2019)

Sensores 3D e nuvens de pontos	Segmentação de defeitos em múltiplas perspectivas; ampliação de dados.	Precisão no diagnóstico; aumento da base de dados para aprendizado.	Xu et al. (2021)
--------------------------------	--	---	------------------

Fonte: autores.

Portanto, os achados da literatura mostram que a IA funciona como tecnologia estruturante, que reúne métodos como aprendizado de máquina, aprendizado profundo, visão computacional e redes neurais para ampliar a precisão e a eficiência da inspeção viária. De forma complementar, a Internet das Coisas viabiliza a integração de sensores, câmeras, drones e sistemas conectados, permitindo coleta de dados em tempo real e suporte à gestão pública. Assim, a combinação dessas tecnologias reforça o potencial de modernização da manutenção de pavimentos urbanos, oferecendo caminhos para maior sustentabilidade, segurança e qualidade de vida em cidades inteligentes.

#### 4 CONCLUSÃO

O objetivo da pesquisa foi alcançado ao investigar o uso de tecnologias digitais para modernizar a inspeção de pavimentos urbanos, com destaque para IA associada a dispositivos de coleta de imagens. Os achados indicam que as tecnologias podem ampliar a eficiência, reduzir custos e aumentar a precisão na identificação de anomalias.

A contribuição teórica deste estudo reside na consolidação de experiências encontradas na literatura sobre o tema, de forma a oferecer uma visão integrada de um tema ainda pouco explorado no Brasil. Para a prática da gestão pública e empresarial, os resultados dessa pesquisa revelam subsídios a gestores públicos e engenheiros no processo de adoção de métodos digitais de monitoramento da malha viária. Em termos do aspecto social, os achados reforçam o potencial dessas soluções para aumentar a segurança no trânsito, otimizar o uso de recursos públicos e melhorar a qualidade de vida nas cidades.

Embora IA seja o núcleo tecnológico que integra aprendizado de máquina, aprendizado profundo, visão computacional e redes neurais, o avanço da inspeção automatizada de pavimentos requer uma abordagem mais abrangente. Tecnologias complementares como Internet das Coisas, sensores 3D, radar de penetração no solo, termografia infravermelha e sistemas robóticos ampliam a coleta, a integração e a análise de dados em tempo real, o que fortalece o potencial de modernização da gestão viária.

Por fim, o trabalho reconhece limitações relacionadas ao estágio incipiente da aplicação dessas tecnologias no contexto brasileiro e à necessidade de infraestrutura adequada para sua adoção. Pesquisas futuras podem explorar estudos de caso, avaliar diferentes combinações de técnicas digitais e aprofundar a análise sobre os impactos socioeconômicos de sua implementação.

#### REFERÊNCIAS

ALBATAYNEH, Omar; FORSLÖF, Lars; KSAIBATI, Khaled. **Image retraining using Tensor Flow implementation of the pretrained inception-v3 model for evaluating gravel road dust.** Journal of Infrastructure Systems, v. 26, n. 2, p. 04020014, 2020.

BADUGE, Shanaka Kristombu et al. **Artificial intelligence and smart vision for building and construction 4.0: Machine and deep learning methods and applications.** Automation in Construction, v. 141, p. 104440, 2022.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Pesquisa CNT rodovias - Relatório Gerencial.** 2023. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/>.

COENEN, Tom BJ; GOLROO, Amir. **A review on automated pavement distress detection methods.** Cogent Engineering, v. 4, n. 1, p. 1374822, 2017.

CUBERO-FERNANDEZ, A. et al. **Efficient pavement crack detection and classification.** EURASIP Journal on Image and Video Processing, v. 2017, p. 1-11, 2017.

ENGLUND, Cristofer et al. **AI perspectives in Smart Cities and Communities to enable road vehicle automation and smart traffic control.** Smart Cities, v. 4, n. 2, p. 783-802, 2021.

GUZMÁN-TORRES, J. A. et al. **Damage detection on steel-reinforced concrete produced by corrosion via YOLOv3: A detailed guide.** Frontiers in Built Environment, v. 9, p. 1144606, 2023.

IBRAHIM, Mohamed R.; HAWORTH, James; CHENG, Tao. **URBAN-i: From urban scenes to mapping slums, transport modes, and pedestrians in cities using deep learning and computer vision.** Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, v. 48, n. 1, p. 76-93, 2021.

KARAASLAN, Enes; BAGCI, Ulas; CATBAS, Fikret Necati. **Artificial intelligence assisted infrastructure assessment using mixed reality systems.** Transportation Research Record, v. 2673, n. 12, p. 413-424, 2019.

KUMAR, Harish et al. **Moving towards smart cities: Solutions that lead to the Smart City Transformation Framework.** Technological forecasting and social change, v. 153, p. 119281, 2020.

LI, Chen; XUAN, Wangchen. **Green development assessment of smart city based on PP-BP intelligent integrated and future prospect of big data.** Acta Electronica Malaysia (AEM), v. 1, n. 1, p. 1-4, 2017.

MUNAWAR, Hafiz Suliman et al. **Image-based crack detection methods: A review.** Infrastructures, v. 6, n. 8, p. 115, 2021.

OSMAN, Sami Abdullah et al. **Intelligent Assessment of Pavement Condition Indices Using Artificial Neural Networks.** Sustainability, v. 15, n. 1, p. 561, 2022.

PERAKA, Naga Siva Pavani; BILIGIRI, Krishna Prapoorna; KALIDINDI, Satyanarayana N. **Development of a multi-distress detection system for asphalt pavements: Transfer learning-based approach.** Transportation Research Record, v. 2675, n. 10, p. 538-553, 2021.

RAMPINI, Luca; CECCONI, Fulvio Re. **Artificial intelligence in construction asset management**: A review of present status, challenges and future opportunities. *Journal of Information Technology in Construction*, v. 27, p. 884-913, 2022.

SHAHAT, Ehab; HYUN, Chang T.; YEOM, Chunho. **City digital twin potentials**: A review and research agenda. *Sustainability*, v. 13, n. 6, p. 3386, 2021.

SHIM, Seungbo; LEE, Seong-Won; CHO, Gye-Chun; KIM, Jin; KANG, Sung-Mo. **Remote robotic system for 3D measurement of concrete damage in tunnel with ground vehicle and manipulator**. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2023.

SOUZA, M. T., SILVA, M. D., & CARVALHO, R. (2010). **Integrative review**: whats is it? How to do it?. *Einstein (São Paulo)*, 8(1), 102–106. <https://doi.org/10.1590/s1679-45082010rw1134>

TORRACO, R. J. (2005). **Writing integrative literature reviews**: Guidelines and examples. *Human Resource Development Review*, 4(3), 356–367. <https://doi.org/10.1177/1534484305278283>

WANG, Ruiping; WU, Shihong; WANG, Xiaoping. **The Core of Smart Cities**: Knowledge Representation and Descriptive Framework Construction in Knowledge-Based Visual Question Answering. *Sustainability*, v. 14, n. 20, p. 13236, 2022.

WHITTEMORE, Robin; KNAFL, Kathleen. **The integrative review**: updated methodology. *Journal of advanced nursing*, v. 52, n. 5, p. 546-553, 2005.

XU, Yayin et al. **Machine learning in construction**: From shallow to deep learning. *Developments in the built environment*, v. 6, p. 100045, 2021.