

APLICAÇÃO DE SISTEMAS DE VISÃO COMPUTACIONAL NA INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

APPLICATION OF COMPUTER VISION SYSTEMS IN THE INSPECTION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

APLICACIÓN DE SISTEMAS DE VISIÓN COMPUTACIONAL EN LA INSPECCIÓN DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO

Rogério Nogueira Pereira¹
Janderson Carlos Geraldo Queiroz²

Resumo: Este estudo apresenta uma análise aprofundada da aplicação de sistemas de visão computacional na inspeção de estruturas de concreto armado, destacando o papel essencial da inteligência artificial, suas diversas vantagens e sua elevada capacidade de processamento, que têm promovido significativos avanços na engenharia civil contemporânea. No desenvolvimento da pesquisa, foi criado um modelo robusto utilizando linguagens de programação como Python e bibliotecas especializadas como OpenCV, capazes de identificar e classificar, com precisão, distintas patologias estruturais. Os resultados indicam que a integração dessa tecnologia inovadora pode transformar substancialmente as práticas tradicionais de inspeção, proporcionando diagnósticos mais precisos, expressiva redução de custos operacionais e maior segurança para os profissionais envolvidos.

Palavras-chave: inspeção de concreto armado; patologias; visão computacional.

Abstract: This study provides an in-depth analysis of applying computer vision systems to the inspection of reinforced concrete structures, underscoring the essential role of artificial intelligence, its various advantages, and its high processing capacity, all of which have led to significant advancements in contemporary civil engineering. During the research, a robust model was developed using programming languages such as Python and specialized libraries like OpenCV, enabling the accurate identification and classification of various structural pathologies. The findings suggest that integrating this innovative technology can substantially transform traditional inspection practices, offering more precise diagnostics, a notable reduction in operational costs, and improved safety for the professionals involved.

Keywords: reinforced concrete inspection; pathologies; computer vision.

Resumen: Este estudio presenta un análisis detallado de la aplicación de sistemas de visión computacional en la inspección de estructuras de hormigón armado, destacando el papel esencial de la inteligencia artificial, sus múltiples ventajas y su elevada capacidad de procesamiento, que han impulsado avances significativos en la ingeniería civil contemporánea. En el desarrollo de la investigación, se creó un modelo robusto utilizando lenguajes de programación como Python y bibliotecas

¹ Docente dos cursos de Engenharia Civil e de Produção nas Instituições de Ensino Superior Centro Universitário de Volta Redonda - UniFOA e Estácio de Sá. E-mail: rogerionp86@gmail.com.

² Universidade Estácio de Sá. E-mail: jancgqengcivil@gmail.com.

especializadas como OpenCV, capazes de identificar y clasificar, con precisión, distintas patologías estructurales. Los resultados indican que la integración de esta tecnología innovadora puede transformar sustancialmente las prácticas tradicionales de inspección, proporcionando diagnósticos más precisos, una notable reducción de costos operativos y mayor seguridad para los profesionales involucrados.

Palabras clave: inspección de hormigón armado; patologías; visión computacional.

Data de submissão: 30.10.2024

Data de aprovação: 28.04.2025

Identificação e disponibilidade:

(<https://revista.univap.br/index.php/revistaunivap/article/view/4663>,
<http://dx.doi.org/10.18066/revistaunivap.v31i72.4663>).

1 INTRODUÇÃO

A inspeção de estruturas de concreto armado é um ponto importante na engenharia civil, extremamente essencial para resguardar e garantir segurança, durabilidade e desempenho das construções ao longo do tempo. Essas estruturas estão sujeitas a uma série de ações ou fatores que podem comprometer sua integridade, tais como cargas externas, exposição a agentes ambientais e defeitos provindos de construções irregulares. A identificação precoce e a correção eficaz desses problemas são importantes para a conservação das edificações, além de garantir a segurança das pessoas que nelas habitam, frequentam ou transitam.

Tradicionalmente, o processo de levantamentos patológicos nas estruturas tem sido conduzido manualmente, com inspetores humanos realizando avaliações visuais e táteis para identificar defeitos, danos ou deteriorações. Esse processo muitas vezes envolve o uso de plataformas elevatórias articuladas para alcançar grandes alturas.

Mais recentemente a utilização solitária de drones foi adotada na tentativa de facilitar a aproximação a áreas remotas. Porém esses métodos apresentam diversas limitações, muitas de maneira significativa, como a subjetividade das observações e a incapacidade de avaliar completamente locais de difícil acesso, ocultos ou inacessíveis, requerendo que o inspetor tenha ampla experiência para exercer sua função com excelência e de maneira eficaz.

Diante dessas dificuldades e desafios aparentes, a aplicação de sistemas de visão computacional surge como uma premissa inovadora e promissora para a inspeção de estruturas de concreto armado. A visão computacional, que combina conhecimentos de visão artificial, processamento de imagens de diferentes maneiras e utilizando métodos como o thresholding, machine learning e reconhecimento de padrões, oferece um conjunto diversificado de ferramentas e técnicas para analisar de forma objetiva e precisa a condição estrutural. Além disso, essa tecnologia ajuda a evitar a exposição dos profissionais inspetores a situações de riscos, muitas vezes enfrentadas nos métodos tradicionais de inspeção.

Esta tecnologia também permite que sejam detectados, de maneira rápida, diversos problemas estruturais, como fissuras, trincas ou rachaduras, além de poder estimar com mais precisão a extensão e a gravidade desses danos. Com a evolução do algoritmo/modelo e a crescente disponibilidade e aprendizado de grandes volumes

de dados, a aplicação de técnicas de machine learning em visão computacional irá gerar diversos benefícios para o setor da construção civil.

O caminho central deste artigo é aprofundar na literatura e explorar um tema pouco disseminado na engenharia civil, proporcionando informações importantes que ajudem a formar uma base teórica rica neste assunto.

2 METODOLOGIA

No cumprimento dos objetivos propostos para este artigo, fez-se necessária uma ampla e aprofundada pesquisa na literatura, principalmente a vigente, acerca do funcionamento e incorporação da inteligência artificial na engenharia civil, retratando o quão estes ramos possuem total sinergia. Trata-se de uma escrita de natureza exploratória, com abordagem qualitativa e de estudo transversal no que diz respeito ao período.

O público-alvo do estudo são os estudantes e profissionais de engenharia civil, com foco nos atuais e futuros vistoriadores de construções de concreto armado, bem como as organizações que compõem este setor, e a partir de uma análise prescritiva foi possível fazer projeções sobre o funcionamento da visão computacional em comunhão com a inspeção deste sistema.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 PATOLOGIAS DAS CONSTRUÇÕES E MÉTODOS TRADICIONAIS DE INSPEÇÃO: UMA VISÃO GERAL

Segundo Bolina et al. (2019), define-se patologia das construções como sendo a ciência que busca estudar e compreender os fenômenos anômalos que acometem os sistemas estruturais de concreto, e a construção como um todo, visionando assim uma forma de investigar como surge e desencadeia a infecção patogênica por esses sistemas, a fim de mitigá-los.

Uma dessas manifestações patológicas se dá por conta da carbonatação, a qual Ribeiro (2018), ao abordar os aspectos ambientais, enfatiza como sendo o problema causado pela alta alcalinidade resultante da hidratação do cimento, que forma o composto químico hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). Esse hidróxido quando entra em contato e reage ao dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera, tem-se início a um processo de neutralização que resulta na formação de ácido carbônico (H_2CO_3). Ainda segundo Ribeiro (2018):

A carbonatação do concreto é facilitada quando a qualidade do concreto não é a adequada. Pequenas espessuras de recobrimento, elevada relação água/cimento, reduzidas quantidades de cimento e ciclos de umedecimento e secagem são condições que favorecem a velocidade de carbonatação. Pelo contrário, elevadas reservas de hidróxido de cálcio, boa compactação e adequado processo de cura retardam o processo.

Meira (2017) esclarece que após a despassivação do aço da armadura do concreto, por parte do processo de carbonatação, também explicitado pela norma 6118, há o desencadeamento da corrosão na referida armadura, comprometendo ainda mais a qualidade e segurança da estrutura.

Além disso, o autor detalha as etapas a serem seguidas para diagnosticar o problema patológico na armadura, envolvendo uma análise inicial onde é identificado visualmente a patologia, a etapa de pré-diagnóstico ao qual o profissional inspetor realiza um levantamento das causas para a corrosão estar se desenvolvendo, e concluindo no diagnóstico propriamente dito, onde é confirmado ou não o trabalho feito no pré-diagnóstico.

Bolina et al. (2019) também destacam a importância de uma regular e boa inspeção em estruturas de concreto armado, com o objetivo de evitar que problemas patológicos diminuam a vida útil de edificações, expondo que tais inspeções devem ser conduzidas por um profissional capacitado e experiente, o que pode ser muito mais assertivo com o auxílio de novas e avançadas tecnologias, como a visão computacional.

A inspeção tradicional de estruturas de concreto, bem como sua recuperação em caso de patologias, traz desafios substanciais aos profissionais inspetores, no que tange a precisão da inspeção, além de consumir um elevado volume de custos para a solução do problema.

De acordo com Gomide et al. (2020), trazendo uma análise no âmbito de edificações de concreto armado e fazendo uma analogia com as ciências médicas, o objetivo primordial da realização de inspeções é a determinação de possíveis irregularidades que possam estar contribuindo para o desenvolvimento de patologias, evitando que tais problemas possam reduzir drasticamente a vida útil das construções.

Para um trabalho que requer a extrema precisão e destreza, a fim de ter um adequado diagnóstico, tal qual os médicos realizam ao tratar seus pacientes com avançadas tecnologias, como quando utilizam robôs em cirurgias de alta complexidade, os inspetores de estruturas de concreto armado necessitam imergir em tecnologias promissoras, para buscarem a maior assertividade.

Ao unirmos visão computacional e engenharia civil, duas áreas que aparentam ser distintas, mas que possuem específicos pontos em comum, há o benefício de se aproveitar o rápido processamento das tecnologias de Inteligência Artificial. Esta combinação possibilita a criação de soluções inovadoras que alcançam eficiência operacional, redução significativa de custos, aprimoramento das condições de segurança, práticas mais sustentáveis e uma tomada de decisão mais informada e baseada em dados concretos.

A sinergia entre essas áreas permite a implementação de métodos avançados de monitoramento e manutenção, aumentando a durabilidade e a resiliência das estruturas de concreto armado. Além disso, a capacidade de realizar análises detalhadas e em tempo real contribui para uma gestão mais proativa e eficaz dos projetos, resultando, em última análise, na entrega bem-sucedida de projetos de infraestrutura de alta qualidade, atendendo às necessidades contemporâneas e futuras da sociedade (Lagaros & Plevris, 2022).

Majoritariamente, para a inspeção de estruturas, são adotadas as técnicas ENDS, sigla para “Ensaio Não Destrutivo”, sendo o ensaio primário e mais utilizado, a inspeção visual, por se tratar da maneira mais fácil de identificar problemas estruturais, porém a subjetividade é uma limitação clara deste ensaio. Outro ensaio tradicional é o ultrassom, método que identifica problemas no concreto por meio do pulso ultrassônico, ondas de sons acima da frequência de 25 MHz, faixa audível pelos humanos. Essas ondas são emitidas e captadas através de um transdutor especial, além de serem aplicadas na medição de espessuras, determinação de corrosão no aço, e na inspeção de trincas e/ou fissuras (Mazer, 2012).

A gamagrafia é mais um ensaio não destrutivo, ao qual foi utilizado por anos sem discriminação, mas que atualmente tem sua frequência cada vez mais escassa. Com este ensaio é possível avaliar o aço no concreto armado por meio do manuseio, de maneira remota para diminuir a exposição dos profissionais ao composto, de isótopos radioativos, como Iridio 192, Césio 137 e Cobalto 60. Como exposto por Mazer (2012), esse ensaio, apesar de sua efetividade, foi proibido por diversas nações ocidentais e orientais, uma vez que o contato com radiação gama apresenta flagrantes perigos para os seres-humanos.

Um END utilizado para determinar a resistência à compressão do concreto é a “resistência à penetração de pinos”. Esse ensaio é aplicável em concretos contendo agregados, miúdos e graúdos, com tamanho máximo característico de até 50 mm, independentemente da textura da superfície. Ele possibilita a avaliação do concreto em profundidades que variam de 25 mm a 75 mm. Utilizando uma Pistola de Windsor, o profissional inspetor dispara pinos de 7,9mm de diâmetro e 79,5mm de comprimento, contra o concreto. Estima-se a resistência do concreto, com auxílio de curvas de calibração, a partir da profundidade que o pino ocasionou na região atingida.

Pode-se destacar também a pacometria, um END que envolve identificar a posição das armaduras. A técnica de medição do recobrimento por pacometria baseia-se na avaliação das alterações causadas pela presença de um objeto metálico dentro de um campo eletromagnético gerado por um conjunto de bobinas. O dispositivo analisa os sinais gerados por esse campo e, a partir disso, estima a cobertura e/ou o diâmetro dos elementos metálicos localizados na direção do sensor (Mazer, 2012).

3.2 INSPECIONANDO ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO POR MEIO DE VISÃO COMPUTACIONAL

Para o desbravamento de um complexo e pouco conhecido tema, em busca de uma nova tecnologia para alinhar a engenharia civil, um setor dito “conservador”, no caminho da modernidade, Kung et al. (2021) traz uma luz no uso de deep learning, ou aprendizado profundo, a base da visão computacional, para o setor civil, por meio de VANTs, sigla para “veículos aéreos não tripulados”, popularmente conhecidos como Drones. Em seu estudo de caso o autor enfatiza que técnicas de deep learning, como redes neurais convolucionais (CNNs), podem ser empregadas para detectar e localizar automaticamente patologias importantes em edificações de concreto armado, como trincas, fragmentação, eflorescência e desfiguração.

Tendo 5680 imagens, coletadas em campo por drones, de diferentes maneiras, desde canteiros de obras a estruturas propriamente ditas, e realizando 500 repetições de treinamento, o estudo apresentou uma acurácia na detecção de trincas em 86%, na detecção de eflorescência nos revestimentos em 91%, 98% na detecção de desfiguração e 76% na detecção de fragmentação.

Em sua perspectiva, ao tratar dos aspectos ambientais e econômicos, Kung et al. (2021) aborda que o uso de aprendizado profundo alinhado com VANTs e visão computacional, pode reduzir os custos associados às inspeções manuais de edifícios de concreto armado, e minimizar os riscos para os inspetores humanos, principalmente no caso de estruturas de média a grande altura.

Outrossim, Kung et al. (2021) destaca que a integração de ambas as áreas, podem simplificar os processos de manutenção de edifícios e detectar patologias de forma mais eficiente, por conseguinte melhorar a sustentabilidade geral das edificações.

Na sua pesquisa, com foco na detecção de trincas, Choi et al. (2021) também utilizou as CNNs e seguiu na linha de abordagem do Kung et al. (2021). Em seu estudo, com o auxílio de VANTs, o autor conseguiu obter alto desempenho e precisão, especialmente quando as imagens foram treinadas em conjuntos diversificados.

Adicionalmente, Choi et al. (2021) destacam pontos positivos da utilização de visão computacional/aprendizado profundo, alinhado ao uso de drones, na inspeção de estruturas de concreto armado, como a detecção precoce de trincas, pois inspetores podem detectar essa patologia em estágio inicial, permitindo reparos e manutenção imediatos para evitar deterioração adicional.

Os autores apontam sobre a economia de custos, pois a detecção e manutenção oportuna agilizada podem resultar em uma diminuição de gastos ao prevenir danos extensos que podem exigir reparos ou substituições dispendiosas, e mitigação de riscos, porque assim, os inspetores podem avaliar a integridade estrutural e identificar potenciais riscos de segurança causados por trincas, permitindo medidas proativas e garantir a segurança do público.

Ao aproveitar a tecnologia de visão computacional e VANTs, os gestores e inspetores de construções de concreto armado, podem abordar dinamicamente os problemas estruturais, priorizar tarefas de manutenção e garantir a segurança e a integridade a longo prazo de estruturas envelhecidas de maneira mais eficiente e eficaz (Choi et al., 2021).

Em um panorama semelhante, Munawar et al. (2022) enfatizam, em seu estudo, que os sistemas baseados nas ENDS, destacando a inspeção visual, possuem subjetividade e podem levar a resultados variáveis, ressaltando a necessidade de métodos de detecção mais objetivos e confiáveis. Na visão dos autores, estes destacam que algoritmos como as redes neurais convolucionais (CNNs), podem analisar grandes quantidades de dados e identificar padrões que podem não ser facilmente reconhecidos por inspetores humanos, levando a uma detecção de danos mais precisa.

Munawar et al. (2022) também deixam explicitadas que técnicas avançadas de aprendizado de máquina, como redes adversárias generativas (CycleGANs), uma das mais modernas da atualidade, oferecem estratégias inovadoras para treinar modelos e melhorar a precisão da detecção de corrosão em superfícies.

Ainda, ao automatizar o processo de detecção, as tecnologias de aprendizado de máquina podem ajudar a reduzir os custos de inspeção associados aos métodos tradicionais que dependem de sistemas baseados em sensores ou trabalho manual.

3.3 MODELO PRÓPRIO DE VISÃO COMPUTACIONAL PARA IDENTIFICAÇÃO DE RACHADURAS EM CONCRETO ARMADO

A luz de, futuramente, chegar a um poderoso sistema de visão computacional, apto a englobar e identificar todos os tipos de análises estruturais, tanto os descritos anteriormente, quanto os diversos existentes, além de salvaguardar a integridade de cada profissional envolvido, foi desenvolvido pelos autores do presente artigo, em caráter exploratório, um modelo de aprendizado de visão computacional, com a capacidade de aplicação prática, tendo a aptidão de identificar rachaduras em estruturas de concreto armado de forma binária, ou seja, defeituoso ou não defeituoso, buscando assim um aprofundamento aos estudos realizados por Kung et al. (2021), Choi et al. (2021) e Munawar et al. (2022), e colaborando com um avanço para a área da engenharia civil.

Para a criação do algoritmo foi utilizado a linguagem Python, que possui a capacidade de criar e treinar um modelo de machine learning, configurado para classificar e avaliar imagens de estruturas de concreto em tempo real.

Ao todo, utilizou-se 10 imagens de patologias que acometem estruturas, entre trincas e rachaduras, além de estruturas em boa qualidade, para a realização do treinamento da linguagem, obtendo êxito satisfatório, mesmo sem um refinamento maior nas imagens e um número maior de treinamento, constatando, assim, que um modelo de visão computacional, integrado a uma interface gráfica amigável que permita aos usuários finais interagirem com o modelo de forma intuitiva, pode ser uma importante ferramenta no auxílio da inspeção de estruturas de concreto armado, reduzindo custos, aumentando a eficiência e a segurança dos processos.

As Figuras 1 e 2 apresentam imagens processadas por três configurações diferentes. A imagem à esquerda corresponde à versão original, enquanto as imagens ao centro e à direita representam dois processos distintos de refinamento desenvolvidos pelos autores para otimizar a captação pelo modelo utilizado nos testes. Essa mesma lógica aplica-se também às Figuras 3 e 4. Essas configurações foram elaboradas como parte da metodologia proposta neste estudo. Ambas as Figuras ilustram estruturas de concreto armado em um estado ideal de conservação, servindo como referência para a análise do desempenho do modelo. Ressalta-se que o algoritmo empregado foi desenvolvido pelos autores, representando uma contribuição original deste trabalho para a área de estudo.

Figura 1 - Estrutura de concreto armado em estado ideal com três processamentos diferentes.



Fonte: Adaptado de Alesia Kozik, Pexels (2021).

Separadas em multiclass, as imagens foram introduzidas em um subdiretório denominado "nao_defeituoso", para que assim o modelo as identificasse corretamente. Ao executar o modelo, as imagens utilizadas foram automaticamente redimensionadas para uma altura e largura de 1000 pixels. Esse procedimento visou maximizar a precisão da análise e minimizar a perda de informações, algo que poderia ocorrer em resoluções menores. No entanto, é importante ressaltar que imagens com maior quantidade de pixels demandam um maior consumo de memória e tempo de processamento, especialmente em computadores com menor capacidade computacional. Além disso, todo o processo foi repetido pelo sistema por 20 vezes, número esse que foi definido para apenas uma pequena rodada de testes, e é facilmente adaptável de acordo com o desejável.

Figura 2 - Estrutura de concreto armado em estado ideal com três processamentos diferentes.



Fonte: Adaptado de Philipp Dümcke, Pixabay (2016).

De forma semelhante, em um subdiretório nomeado de “defeituoso”, foi possível introduzir imagens de estruturas patologicamente afetadas por rachaduras, exibidas nas Figuras 3 e 4. Importante ressaltar que as imagens utilizadas nesse estudo possuem poucos ajustes nas condições de iluminação. A implementação de técnicas avançadas de pré-processamento, redução de ruídos e correção de distorções, podem melhorar o treinamento de aprendizagem profunda. Explorar um estudo de caso, com o objetivo de se inteirar na dinâmica e funcionamento de um canteiro de obras, é importante para entender algumas causas patológicas e aprimorar o modelo proposto, tornando-o mais robusto e completo.

Figura 3 - Estrutura de concreto armado em estado não ideal com três processamentos diferentes.



Fonte: Adaptado de wal_172619, Pixabay (2021).

Durante o processo, o console do Spyder/Python exibiu a mensagem *found 30 images belonging to 3 classes*, confirmando que as imagens, com as diferentes configurações, foram corretamente identificadas e classificadas pelo protótipo. Esse resultado inicial já demonstra a capacidade do sistema em realizar a distinção básica entre estados saudáveis e comprometidos de estruturas de concreto armado.

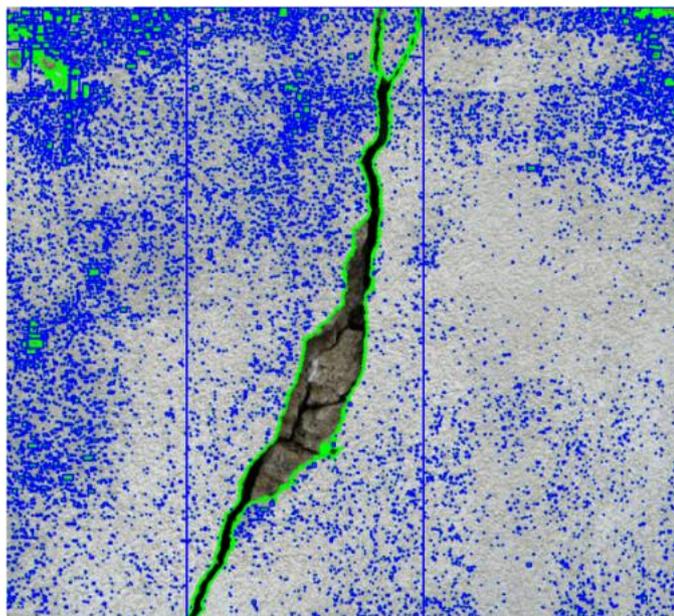
Figura 4 - Estrutura de concreto armado em estado não ideal com três processamentos diferentes.



Fonte: Adaptado de Michael Krause, Pixabay (2015a).

Como explicitado na Figura 5, o código automaticamente conseguiu detectar diversos contornos na imagem, e ao analisar como sendo muito pequenos, ele isolou a real patologia e classificou os pequenos pontos como possíveis ruídos, o que está correlato com a realidade observada. Posteriormente, houve o delineamento preciso da patologia identificada. O algoritmo traçou os limites da falha e, a partir disso, foi destacada centralmente em cor verde na imagem processada, permitindo uma visualização clara e imediata do dano. Observa-se que a Figura 5 representa o resultado da identificação realizada pelo modelo, a partir da versão original apresentada na Figura 4.

Figura 5 - Resultado obtido pelo modelo de visão computacional na identificação da estrutura com rachadura.



Fonte: Adaptado de Michael Krause, Pixabay (2015b).

Vale destacar que todas as 10 imagens utilizadas por nós nos treinamentos do algoritmo desenvolvido, incluindo as fotos originais apresentadas anteriormente nas Figuras 1, 2, 3 e 4, foram obtidas a partir de bancos de imagens de acesso público. A seleção dessas imagens visou garantir um treinamento inicial preciso e rápido, permitindo a avaliação da capacidade do modelo na identificação de padrões distintos,

mesmo em condições adversas de visibilidade, como baixa iluminação e presença de pequenos ruídos ou irregularidades na superfície do concreto armado e das imagens, buscando garantir que o modelo estivesse exposto a cenários realistas.

4 CONCLUSÃO

Promissor e inovador, a utilização de sistemas de visão computacional para inspeção de estruturas de concreto armado, se mostra bastante benéfica para o presente e futuro da engenharia civil, pois não apenas moderniza o processo de inspeção, mas também contribui para a longevidade e segurança das construções de concreto armado. A acurácia do modelo de visão computacional, desenvolvido pelos autores deste artigo, até por conta do baixo número de testes, chegou próximo a perfeição, entretanto o principal objetivo, cerne de todo o estudo exploratório, funcionou de maneira completamente satisfatória, identificando a rachadura.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2023), a NBR 6118 classifica as rachaduras como aberturas que variam de 1,5 mm a 5 mm de extensão. Porém, o sistema de visão computacional desenvolvido ainda não é capaz de dimensioná-las individualmente. Sua identificação baseia-se nos padrões de abertura presentes nas imagens utilizadas no treinamento, reconhecendo características específicas dessa patologia, como a forma alongada da ruptura, que a diferencia de fissuras e trincas.

Os resultados deste estudo enfatizam a importância da inovação tecnológica na engenharia civil. A combinação de captação de imagens por drones e visão computacional não só melhora a precisão e a eficiência das inspeções, mas também abre novas possibilidades para a monitorização contínua da integridade estrutural.

Através da implementação de modelos de aprendizado profundo, a detecção automática de defeitos como trincas, eflorescência, desfiguração e rachaduras se mostrou eficaz, aumentando a confiabilidade das inspeções e proporcionando dados mais precisos para a manutenção e reparo das estruturas, evidenciando a completa sinergia entre inteligência artificial e engenharia civil. Este estudo deixa uma contribuição sólida para o avanço no setor, além de destacar a importância contínua da pesquisa e do desenvolvimento de tecnologias inovadoras para enfrentar os desafios estruturais, promovendo uma construção mais segura e eficiente.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2023). *ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento*.
<https://www.abntcatalogo.com.br/pnm.aspx?Q=SEFwTjVPK1ozTnFsMWE1M2NRdVhVcUI3eW5lRFZveG9sVys4WWFMOFZERT0=>
- Bolina, F. L., Tutikian, B. F., & Helene, P. (2019). *Patologia de estruturas* (1. ed.). Oficina de Textos.
- Choi, D., Bell, W., Kim, D., & Kim, J. (2021). UAV-Driven Structural Crack Detection and Location Determination Using Convolutional Neural Networks. *Sensors*, 21(8), 1–20. <https://mdpi.com/1424-8220/21/8/2650>

- Dümcke, P. (2016). *[Fotografia de uma estrutura de concreto armado com textura suave]*. Pixabay. <https://pixabay.com/pt/photos/concreto-muro-estrutura-urbano-1840731/>
- Gomide, T. L. F., Gullo, M. A., Neto, J. C. P. F., & Flora, S. M. D. (2020). *Inspeção predial total* (3. ed.). Oficina de Textos.
- Kozik, A. (2021). *[Fotografia de uma estrutura de concreto armado com textura áspera]*. Pexels. <https://www.pexels.com/pt-br/foto/sujo-manchado-textura-parede-7911699/>
- Krause, M. (2015a). *[Foto de uma estrutura de concreto armado com abertura patológica]*. Pixabay. <https://pixabay.com/pt/photos/rachadura-muro-concreto-textura-695010/>
- Krause, M. (2015b). *[Imagem segmentada de uma estrutura de concreto armado com manifestação patológica]*. Pixabay. <https://pixabay.com/pt/photos/rachadura-muro-concreto-textura-695010/>
- Kung, R., Pan, N., Wang, C. C. N., & Lee, P. (2021). Application of Deep Learning and Unmanned Aerial Vehicle on Building Maintenance. *Advances in Civil Engineering*, 2021(5598690), 1–12. <https://doi.org/10.1155/2021/55986900>
- Lagaros, N. D., & Plevris, V. (2022). *Artificial Intelligence (AI) Applied in Civil Engineering* (1. ed.). MDPI AG.
- Mazer, W. (2012). *Inspeção e ensaios em estruturas de concreto*. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- Meira, G. R. (2017). *Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: Fundamentos, diagnóstico e prevenção* (1. ed.). Editora IFPB.
- Munawar, H. S., Ullah, F., Shahzad, D., Heravi, A., Qayyum, S., & Akram, J. (2022). Civil Infrastructure Damage and Corrosion Detection: An Application of Machine Learning. *Buildings*, 12(2), 1-156. <https://www.mdpi.com/2075-5309/12/2/15>
- Ribeiro, D. (2018). *Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto* (2. ed.). Grupo GEN. <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9788595152359>
- Wal_172619. (2021). *[Fotografia de uma estrutura de concreto armado com rachadura]*. Pixabay. <https://pixabay.com/pt/photos/rachadura-muro-concreto-superf%C3%ADcie-6815038/>