

Submetido 03/02/2025. Aprovado 03/09/2025

Avaliação: revisão duplo-anônimo

Principais ensaios não destrutivos utilizados para inspeção de estruturas de concreto: uma revisão sistemática da literatura – usos e tendências

MAIN NON-DESTRUCTIVE TESTS USED FOR INSPECTION OF CONCRETE STRUCTURES: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW – USES AND TRENDS

PRINCIPALES ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS UTILIZADOS PARA LA INSPECCIÓN DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA LITERATURA: USOS Y TENDENCIAS

Oswaldo Cascudo

Universidade Federal de Goiás (UFG)
ocascudo@ufg.br

Antônio Carlos de A. Leonel

Universidade Federal de Goiás (UFG)
antonioleonel.eng@gmail.com

Andrielli Moraes de Oliveira

Universidade Federal de Goiás (UFG)
andriellimoraes@ufg.br

Resumo

Em um contexto de cidades tecnológicas, programas de inspeção periódicos em estruturas de concreto são muito úteis em um plano estratégico de manutenções preventivas e corretivas. Nesse sentido, ensaios não destrutivos são ferramentas importantes para o monitoramento da integridade e vida útil dessas estruturas. Assim, este trabalho tem como objetivo apresentar e discutir, por meio de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), os principais ensaios não destrutivos utilizados para inspeção de estruturas de concreto. Técnicas como as de eco impacto, radiografia, radar de penetração (GPR), resposta ao impulso e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas apresentaram boas respostas relacionadas ao tempo de ensaio, custo, precisão, repetibilidade e facilidade de uso. Outras técnicas, como a termografia infravermelha e o vazamento de fluxo magnético, também demonstraram elevados potenciais para investigação estrutural, dentro dessa perspectiva não destrutiva. Com todo esse ferramental, os principais defeitos detectáveis em elementos estruturais em concreto são as delaminações, fissuras e vazios no concreto, além da corrosão das armaduras.

Palavras-chave: ensaios não destrutivos; estruturas de concreto; inspeção em estruturas; revisão sistemática da literatura; manifestações patológicas em estruturas.

Abstract

In a context of technological cities, periodic inspection programs of concrete structures are very useful in a strategic plan of preventive and corrective maintenance. In this sense, non-destructive tests are important

tools for monitoring the integrity and service life of these structures. Thus, this work aims to present and discuss, through a Systematic Review of Literature (SRL), the main non-destructive tests used for inspection of concrete structures. The impact echo, radiographic, ground-penetrating radar, impulse response, and ultrasound techniques showed good responses related to test speed, cost, accuracy, repeatability, and ease of use. Other techniques, such as infrared thermography and magnetic flux leakage, also demonstrated high potential for structural investigation, within this non-destructive perspective. With all this tooling, the main detectable defects in concrete structural elements were delamination, cracks, and voids in the concrete, in addition to the reinforcement corrosion.

Keywords: non-destructive tests; concrete structures; inspection of structures; systematic literature review; pathological problems in structures.

Resumen

En un contexto de ciudades tecnológicas, los programas de inspección periódica en estructuras de hormigón son de gran utilidad en un plan estratégico de mantenimiento preventivo y correctivo. En este sentido, los ensayos no destructivos son herramientas importantes para monitorear la integridad y vida útil de estas estructuras. Por lo tanto, este trabajo busca presentar y discutir, mediante una Revisión Sistemática de la Literatura (RSL), los principales ensayos no destructivos utilizados para la inspección de estructuras de hormigón. Las técnicas de eco de impacto, radiografía, georradar (GPR), respuesta al impulso y velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas presentaron buenos resultados en cuanto a velocidad, costo, precisión, repetibilidad y facilidad de uso. Otras técnicas, como la termografía infrarroja y la fuga de flujo magnético, también demostraron un gran potencial para la investigación estructural, dentro de esta perspectiva no destructiva. Con todas estas herramientas, los principales defectos detectables en elementos estructurales de hormigón son delaminaciones, grietas y huecos (vacíos) en el hormigón, además de la corrosión de las armaduras.

Palabras clave: ensayos no destructivos; estructuras de hormigón; inspección de estructuras; revisión sistemática de la literatura; manifestaciones patológicas en estructuras.

Introdução

Estruturas de concreto armado projetadas com base em uma abordagem de desempenho e durabilidade têm direção especial e adequada no que tange aos níveis de agressividade ambiental no macro e microclima local, modelagem e definições de vida útil, de indicadores de durabilidade e especificações da composição do concreto (Baroghel-Bouny; Capra; Laurens, 2014). Já estruturas de concreto mais antigas e não arquitetadas conforme esse conceito, com destaque àquelas de maior impacto socioeconômico como as estruturas típicas de obras especiais de infraestrutura e de arte, assim como as de edifícios altos em centros urbanos, podem apresentar diversas vulnerabilidades em relação ao cobrimento da armadura, qualidade do concreto e presença de agentes agressivos e isso pode comprometer a vida em serviço, sobretudo em um cenário de intensas alterações no clima. Essas estruturas requererão ações de manutenção corretiva (não programadas) em idades prematuras de sua vida útil, em função da ocorrência de problemas patológicos, tais como fissuras, ninhos de concretagem, deslocamentos, corrosão das armaduras, lixiviação, dentre outros.

Ao mesmo tempo, sabe-se que o aquecimento global pode transformar modalidades de classes de agressividade ambiental do concreto, em decorrência da maior frequência de inundações e enchentes, formação de ilhas de calor e períodos de maior estiagem de chuvas, eventos frequentes de chuvas ácidas, aumento

de poluição atmosférica (com consequente aumento na concentração de CO₂) e da elevação do nível dos oceanos, que intensifica a incidência de névoa salina nos limites urbanos, por exemplo.

Nesse sentido, cabe destacar que a inteligência artificial e a ciência de dados e da informação, sobretudo no âmbito das cidades inteligentes (*smart cities*), são capazes de auxiliar na perspectiva de um eficiente planejamento estratégico de inspeção e de manutenção de estruturas de concreto armado, na medida em que possibilita um controle mais confiável dos riscos e danos, por meio de uma avaliação precisa do comprometimento estrutural, de durabilidade e de desempenho dessas estruturas. Também, uma abordagem nessa linha vislumbra uma programação racionalizada de aportes financeiros e o mínimo de transtornos à rotina da população, tendo em vista desvios, paradas, uso e operação de vias e acessos.

Além disso, nas inspeções de estruturas de concreto armado, os ensaios não destrutivos são ferramentas complementares e importantes para o monitoramento de sua integridade e vida útil. Como destacado por Rehman *et al.* (2016) e Mehrabi e Farhangdoust (2018), os ensaios não destrutivos têm sido utilizados principalmente para detecção de danos locais, dentro de uma perspectiva simples e direta. Adicionalmente, eles podem ser aplicados em situações mais complexas para alinhar um diagnóstico e prognóstico mais assertivo e sistêmico.

Sabe-se que, embora uma variedade razoável de técnicas venha sendo utilizada historicamente na avaliação de elementos de estruturas de concreto, não há ainda um guia unificado brasileiro sobre os métodos não destrutivos com foco no problema. Ademais, ensaios não destrutivos raramente resultam em um “número” que pode ser interpretado de forma inequívoca, ou seja, é necessário sempre uma análise técnica de engenharia (Neville, 2016), além de contabilizar a elevada heterogeneidade do concreto (Mehta; Monteiro, 2014).

Assim, em situações mais delicadas e que exijam uma maior acurácia nos resultados, é imperativa a proposição de um programa criterioso de avaliação estrutural, de durabilidade e de desempenho que considere a variabilidade de resultados no amplo contexto de ensaios destrutivos e não destrutivos.

Dentro desse contexto, o presente artigo tem por objetivo identificar os principais ensaios não destrutivos aplicáveis às inspeções de estruturas de concreto, por meio de revisão da literatura, produzindo uma discussão das potencialidades de cada técnica em mapear e correlacionar danos estruturais. Este trabalho faz parte do projeto de P&D – PD. 0394-1704-2017, regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e desenvolvido pela UFG em conjunto com a empresa Eletrobras FURNAS. Os autores expressam agradecimentos a essas empresas e instituições envolvidas.

Dentre várias alternativas metodológicas de análise consideradas, o artigo dá ênfase a algumas técnicas bastante contemporâneas, contribuindo assim com o estado da arte dos ensaios para avaliações estruturais em campo. Sabe-se que a etiologia dos danos pode ajudar na seleção dos métodos de ensaio que melhor atendam ao propósito de monitoramento e avaliação das estruturas. É nessa linha de raciocínio que se desenvolve o presente artigo, com contribuições efetivas ao diagnóstico provável de problemas “alimentando” a seleção de ensaios e vice-versa, ou seja, as técnicas de inspeção auxiliando no entendimento e compreensão das manifestações patológicas incidentes.

Metodologia

Para o desenvolvimento deste artigo, foi utilizada a metodologia de Revisão Sistemática de Literatura (RSL), que corresponde a um estudo detalhado utilizado para mapear, descobrir, selecionar, avaliar de forma crítica, sintetizar e agrupar resultados e discussões de estudos anteriores que abordam assuntos e informações relevantes ao tema em análise.

A RSL constitui uma metodologia estruturada e rigorosa, voltada à identificação, avaliação e síntese das evidências científicas disponíveis sobre um determinado tema. Ao seguir etapas metodológicas bem-definidas, a RSL visa minimizar vieses e assegurar a transparência, reprodutibilidade e confiabilidade dos resultados. Em contraste às revisões narrativas, que são mais suscetíveis à subjetividade, a RSL oferece uma análise crítica e abrangente da produção científica, sendo amplamente adotada com o propósito de consolidar o conhecimento existente, identificar lacunas e orientar futuras pesquisas (Kitchenham, 2009).

Com o objetivo de maior aprofundamento sobre o tema e preenchimento das lacunas da pesquisa acerca da utilização de técnicas não destrutivas em inspeções, conduziu-se, então, uma Revisão Sistemática da Literatura seguindo três etapas básicas. Normalmente, como destacado na literatura (Grant; Booth, 2009; Tranfield *et al.*, 2003; Dresch *et al.*, 2015), a primeira etapa é a de planejamento, em que as orientações de pesquisa são reunidas em um protocolo. A segunda etapa é a de condução, que consiste na realização de busca e seleção de estudos aderentes de acordo com os critérios de inclusão e exclusão definidos no protocolo. Finalmente, a terceira etapa prevê a extração e análise dos dados, o que possibilita compreender o estado da arte do tema objeto da investigação.

A questão de pesquisa proposta na RSL foi a seguinte: *Quais são os ensaios não destrutivos recomendados para avaliação do estado de conservação de estruturas em concreto?* Como critérios de inclusão, foram considerados estudos que tratavam de inspeções em estruturas de concreto de obras de infraestrutura (pontes, barragens, viadutos etc.) e estudos que relataram exclusivamente a utilização de ensaios não destrutivos. Já os critérios de exclusão adotados foram estudos com base em ensaios laboratoriais, pesquisas voltadas a estruturas que não fossem concretos, trabalhos não publicados em língua inglesa e estudos repetidos entre as fontes consultadas.

A coleta dos dados ocorreu em março de 2021, sem recorte temporal, nas seguintes bases de dados: *Scopus*, *Web of Science*, *Engineering Village* e *Science Direct*. A *string* (conjunto de palavras-chave) de busca utilizada foi: *inspection* AND concrete AND structure* AND test* AND (non-destructive OR "non-destructive" OR NDT)*. O objetivo foi de selecionar artigos que pudessem tratar exclusivamente de atividades de inspeções ou vistorias em estruturas de concreto armado com a utilização de ensaios não destrutivos.

Resultados

Os resultados serão apresentados em termos de resultados bibliométricos e resultados de engenharia.

Resultados bibliométricos

Foram considerados todos os estudos relacionados à área de pesquisa, independentemente do ano de publicação. A busca resultou, inicialmente, em 1042 estudos. Após a leitura dos títulos e exclusão de artigos repetidos, foram obtidos 364 estudos.

Após a leitura dos resumos, 67 estudos foram selecionados para análise mais profunda. Por fim, a leitura final de todos os estudos resultou em 50 trabalhos aderentes ao tema pesquisado. As técnicas de ensaios não destrutivos mais utilizadas foram sistematizadas em tabelas e, ao final da revisão da literatura, foi realizada uma análise das vantagens e desvantagens de cada método. Os mais promissores foram comparados e avaliados com base em sua aplicabilidade para detecção de danos à estrutura de concreto.

Os resultados bibliométricos apresentam um panorama dos artigos estudados, disponíveis com base nos critérios estabelecidos. No tocante à produção cronológica dos artigos, os resultados do Gráfico 1 destacam o número de publicações agrupadas a cada cinco anos. Desse levantamento, é possível observar que a pesquisa mais antiga obtida é oriunda do ano de 1990. É notável o crescimento ao longo dos anos do número de publicações acerca do tema, sendo mais predominante nos períodos de 2006 a 2010 e de 2011 a 2015. Os anos de 2008 e 2013 tiveram o maior número de publicações aderentes, com cinco trabalhos cada.

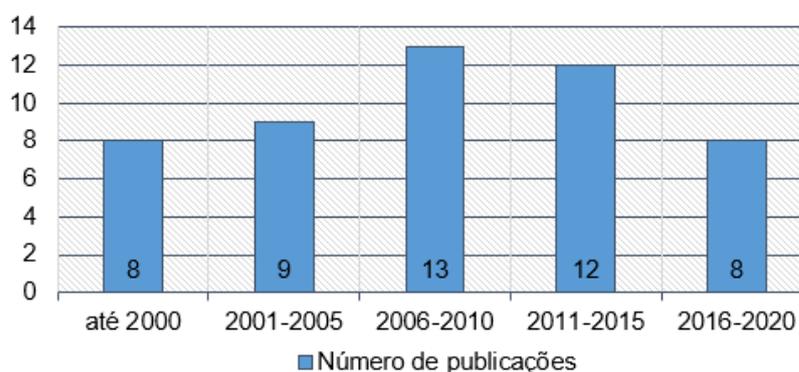


Gráfico 1 – Número de publicações agrupadas por período

Fonte: Elaborado pelo/os autores/as (2025).

Nota-se também que nos últimos cinco anos houve um decréscimo dos estudos realizados acerca do tema. Uma justificativa para isso pode estar atrelada à pandemia de Covid-19, quando países de todo o mundo adotaram políticas para distanciamento social e, assim, as pesquisas de campo relacionadas a inspeções de estruturas em concreto não foram desenvolvidas ou tiveram reduções muito significativas. Muitas universidades e centros de pesquisa tiveram que desenvolver seus trabalhos remotamente, com exceção das pesquisas relacionadas especificamente ao estudo da doença, como aquelas voltadas ao desenvolvimento de antígenos, por exemplo.

O Gráfico 2 exibe a quantidade de publicações por países. É evidente a predominância de publicações sobre o tema por autores dos Estados Unidos, cuja justificativa para o resultado encontra respaldo no relevante trabalho do Departamento de Transportes do país (USDOT), em ações volumosas de recuperação e reforma do seu sistema de infraestrutura viária, incluindo a manutenção de suas pontes e rodovias de concreto. Em 1997, por exemplo, os custos chegaram a atingir 212 bilhões de dólares (Mehta; Monteiro, 2014). Nota-se, também, que a maioria dos autores que publicaram

dois ou mais trabalhos sobre o tema é de origem norte-americana (Gráfico 3) e que a *Revista NDT&E International* tem um destaque nas publicações, com nove artigos veiculados (Gráfico 4).



Gráfico 2 – Número de publicações por países

Fonte: Elaborado pelo/os autores/as (2025).

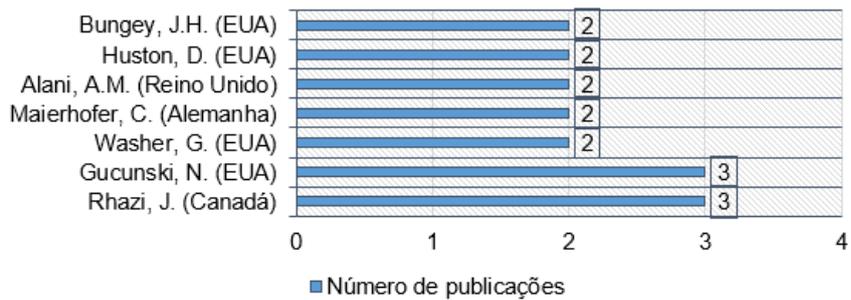


Gráfico 3 – Número de publicações por autores e países

Fonte: Elaborado pelo/os autores/as (2025).

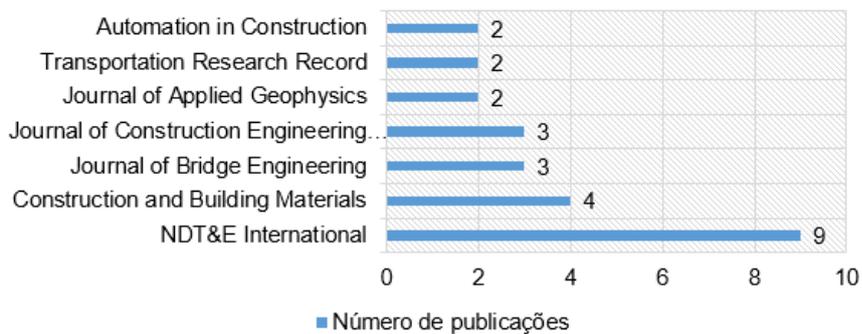


Gráfico 4 – Número de publicações por periódicos

Fonte: Elaborado pelo/os autores/as (2025).

Resultados de engenharia: principais ensaios não destrutivos levantados pela RSL aplicáveis à avaliação das estruturas de concreto

Este item lista e resume os vários métodos de ensaios não destrutivos aplicáveis ao monitoramento da integridade de estruturas de concreto, principalmente em obras de arte e de infraestrutura, extraídos da RSL.

Ensaio de eco de impacto (IE) - *Impact Echo Test (IE)*

O ensaio de eco de impacto é realizado pela propagação e captação de ondas de tensão sonora com uso de um transdutor que capta variações de ondas ocasionadas por vazios ou defeitos internos da estrutura de concreto. O impacto na superfície é produzido por haste metálica com uma esfera na extremidade, podendo ser utilizadas outras esferas com diâmetros diferentes, de acordo com as características do elemento em estudo (No, 2002; Avaliação [...], 2021). O receptor é um transdutor de deslocamento contendo uma pequena ponta cônica piezoelétrica.

O ensaio é aplicável para determinação da condição e espessura de elementos estruturais em concreto quando espaços vazios, ninhos de concretagem ou fissuras são esperados. Os sistemas de eco de impacto podem fornecer informações sobre a profundidade de uma falha ou defeito em elementos de concreto acessíveis apenas por um lado sobre a superfície (No, 2002; Ensaio [...], 2021; Ramos *et al.*, 2012).

Em suma, a técnica consiste na ocorrência de uma perturbação elástica introduzida no elemento em estudo, por meio de um impacto mecânico na sua superfície. Essa perturbação propaga-se através do elemento sob a forma de ondas de Rayleigh (ondas R), ondas de compressão (ondas P) e ondas de corte (ondas S). Quando a superfície do elemento estrutural em estudo recebe o impacto, é de imediato registrada a passagem da onda R pelo transdutor. A onda P propaga-se, entretanto, no interior do elemento, sendo sucessivamente refletida para a superfície. Assim, em estruturas de concreto, estuda-se com mais efetividade a propagação das ondas P no material, uma vez que elas se dissipam por frentes esféricas, sendo refletidas pelos contornos do elemento em estudo ou por discontinuidades existentes no seu interior (vazios). Um transdutor localizado próximo do ponto de impacto monitora os deslocamentos da superfície do elemento, provocados pela chegada das ondas refletidas.

Essas ondas são, por sua vez, refletidas pela superfície e propagam-se novamente para o interior do elemento, sendo, de novo, refletidas pelos contornos ou discontinuidades. Estabelece-se assim, no local em estudo, uma ressonância transiente resultante das múltiplas ondas refletidas entre a superfície livre e as discontinuidades internas (Ramos *et al.*, 2012). A frequência da chegada das ondas P ao receptor é determinada transformando o registo no tempo das ondas de deslocamento em frequências, ou seja, em espectros de amplitude e fase.

Ensaio Radiográfico (RT - *Radiographic Testing*)

O ensaio radiográfico baseia-se no gradiente de absorção de radiação penetrante no elemento inspecionado. Devido às diferenças de densidade e homogeneidade do material, distintas regiões do elemento absorvem quantidades diferentes de radiação penetrante. Essa absorção é detectada por um filme radiográfico, detectores eletrônicos ou tubos de imagem. Assim, a variação de radiação absorvida indica uma provável

falha interna, descontinuidade ou uma não homogeneidade do material (Büyükoztürk, 1998; Oliveira; Almeida, 1987).

O ensaio pode ser realizado em estruturas de concreto para analisar a homogeneidade, posição e corrosão de armaduras, assim como para detectar descontinuidades como vazios, segregações e trincas. A capacidade da detecção dos defeitos com pequenas espessuras em planos perpendiculares ao feixe de realização dependerá da técnica do ensaio (Oliveira; Almeida, 1987). Dessa forma, defeitos com espessuras variáveis em diversas dimensões são detectados com maior facilidade. A Figura 1 ilustra o resultado obtido nos estudos de Mello *et al.* (2017), em que se observa a posição das armaduras no concreto (1-a) e pontos de corrosão localizada (1-b).

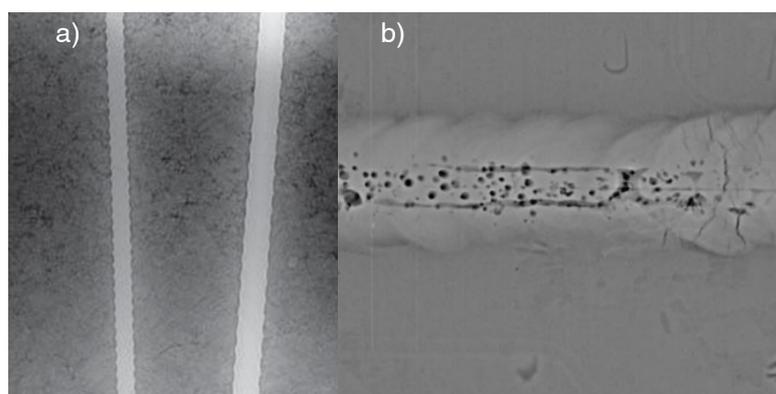


Figura 1 – Ensaio de radiografia no concreto: (a) identificação de barras de aço; (b) evidência de corrosão da armadura

Fonte: Mello *et al.* (2017).

Ensaio de radar de penetração (GPR – *Ground Penetration Radar*)

O ensaio de radar de penetração é um método geofísico em que se tem a propagação de ondas eletromagnéticas de alta frequência pelo material analisado. Assim, quando a onda atinge uma interface entre materiais com diferentes níveis de permissividade dielétrica, parte da onda é refletida e parte é refratada. O sinal detectado é amplificado e gravado (Maierhofer, 2003; No, 2002; Barbosa; Nóbrega, 2017).

A técnica baseia-se no princípio ativo de emissão de ondas de rádio e pode ser utilizada também para a detecção de armaduras ou “corpos estranhos” no interior do concreto. As ondas eletromagnéticas são emitidas e captadas pelas antenas do GPR, em frequências superiores a 2000 MHz, que passam pela camada superficial do concreto detectando barras e outros materiais. Além da posição, diâmetro e cobrimento das armaduras, é possível identificar vazios ou possíveis descontinuidades no elemento estrutural. Como aplicação alternativa, essa técnica também é utilizada para detecção de dutos no solo (Sun *et al.*, 2018; No, 2002; Barbosa; Nóbrega, 2017; Hamasaki *et al.*, 2003).

Dependendo do equipamento utilizado e dos *softwares* de análise de dados, pode-se gerar superfícies tridimensionais oriundas da movimentação das antenas receptoras sobre o elemento em análise. A visualização em tempo real também é possível dependendo do tipo de equipamento utilizado. Como limitação do método, destaca-se que a utilização em concretos com idades baixas pode afetar os resultados em função de suas características de condução, o que torna imprescindível uma certa *expertise* na realização do ensaio, seja na execução propriamente dita, seja na interpretação

dos resultados obtidos (Rhazi *et al.*, 2003; Rhazi *et al.*, 2007; Hamasaki *et al.*, 2003). Na Figura 2 é apresentado um exemplo de aplicação do radar GPR para identificação de barras de aço no interior de uma laje de concreto armado, conforme descrito no trabalho desenvolvido por Leonel (2022).

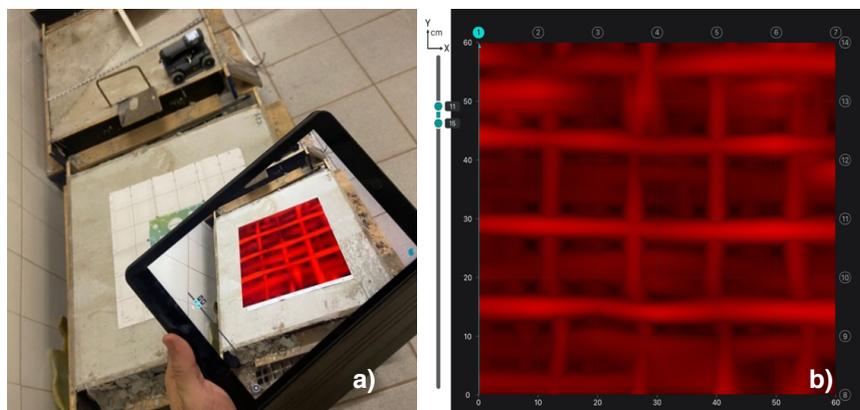


Figura 2 – Realização do ensaio de radar GPR em laje de concreto (a) e (b) armaduras identificadas. Fonte: Leonel (2022).

Ensaio de resposta ao impulso (IRT - *Impulse Response Test*)

O ensaio de resposta ao impulso consiste na emissão e captação de ondas de frequência até 3000 Hz na superfície do material. O método permite avaliar a homogeneidade do material por sua mobilidade sônica. Como resultado, os sinais de retorno são coletados pelo sistema de aquisição de dados e os dados registrados são interpretados para detecção de defeitos na estrutura de concreto (No, 2002; Lin *et al.*, 2018).

A aplicação dos ensaios de IRT em estruturas de concreto é menos conhecida, uma vez que a técnica é mais utilizada na avaliação de componentes metálicos usados na indústria aeronáutica (Davis, 2003; Lin *et al.*, 2018). Em publicações internacionais, nota-se a preferência pela utilização dos ensaios de eco de impacto, embora ambos estejam descritos como métodos de ensaios não destrutivos para avaliação de estruturas de concreto no Relatório do *American Concrete Institute ACI 228.2R-98* (ACI, 2004).

O método IRT utiliza um impacto de baixa deformação para enviar ondas de estresse pelo elemento testado. O elemento que atinge a superfície é geralmente um martelo com massa de 1 quilo com uma célula de carga embutida em sua extremidade. A tensão máxima de compressão no ponto de impacto no concreto está diretamente relacionada às propriedades elásticas da ponta do martelo. Os níveis típicos de pico de tensão podem variar de 5 MPa até 50 MPa. A resposta à tensão de entrada é normalmente medida usando um transdutor de velocidade (geofone). Esse receptor é preferido por causa de sua estabilidade em frequências baixas e seu desempenho robusto na prática. O martelo e o geofone estão ligados a um computador de campo portátil para aquisição e armazenamento de dados (Lin *et al.*, 2018; Davis, 2003).

Ensaio de velocidade de propagação de ondas/pulsos ultrassônicos (UPV - *Ultrasonic Pulse Velocity*)

No ensaio de verificação da velocidade de propagação de onda ultrassônica, os elementos de concreto analisados são submetidos a um pulso ultrassônico de alta

frequência (intervalo de 20 a 150 KHz). Esse pulso atravessa o material em análise e é recebido por um transdutor receptor, que permite a obtenção do tempo decorrido entre a emissão e recepção do sinal (Perlin; Pinto, 2013; Mello *et al.*, 2017; Lin *et al.*, 2018; Lim; Cao, 2013).

O ensaio já é bastante conhecido no meio acadêmico e está em expansão no meio técnico, sendo a técnica utilizada para avaliação de não homogeneidades do concreto na estrutura (Perlin; Pinto, 2013) para descobrir possíveis erros de execução internos, produzidos durante a concretagem e para criar um histórico das variações no comportamento e nas características do concreto ao longo dos anos, decorrentes de ataques químicos, especialmente os processos de carbonatação e as reações com sulfatos. No Brasil, o ensaio é regido pela ABNT NBR 8802 – Concreto endurecido: Determinação da propagação de ondas ultrassônicas (ABNT, 2019). Para a realização do ensaio, os transdutores emissores e receptores poderão estar posicionados de três maneiras: direta, semidireta e indireta (BSI, 1986; ABNT, 2019, Silva *et al.*, 2019). Há variações nos resultados conforme a disposição dos transdutores, sendo a disposição indireta a menos precisa (No, 2002; Rehman *et al.*, 2016).

Outra situação comumente apresentada no meio técnico e científico é a aplicação dos ensaios de ultrassom para determinação de profundidade de fissuras. Podem ser citados diversos trabalhos desenvolvidos para detecção de falhas e fissuras (No, 2002; Chase; Washer, 1997; Lim; Cao, 2013; Akhtar, 2013; Shokouhi *et al.*, 2013; Perlin; Pinto, 2013) e outros para estimar as suas profundidades (Silva *et al.*, 2019; Bungey *et al.*, 2006; Pinto *et al.*, 2010; Souza, 2016).

O ensaio de tomografia por ultrassom é baseado no mesmo princípio do ultrassom convencional, entretanto dele emprega uma série de sondas, cada uma controlada individualmente por um programa de computador. De acordo com a excitação controlada, um feixe ultrassônico concentrado de várias distâncias focais é gerado pelo *software*. Assim, uma apresentação bidimensional ou tridimensional pode ser produzida para exibir a localização exata e o tamanho de cada defeito potencial (No, 2002). As Figuras 3 e 4 ilustram a realização do ensaio em um elemento de concreto, onde é possível identificar os tomogramas gerados a partir da leitura do equipamento e a identificação de danos simulados, conforme descrito no trabalho de Leonel (2022).

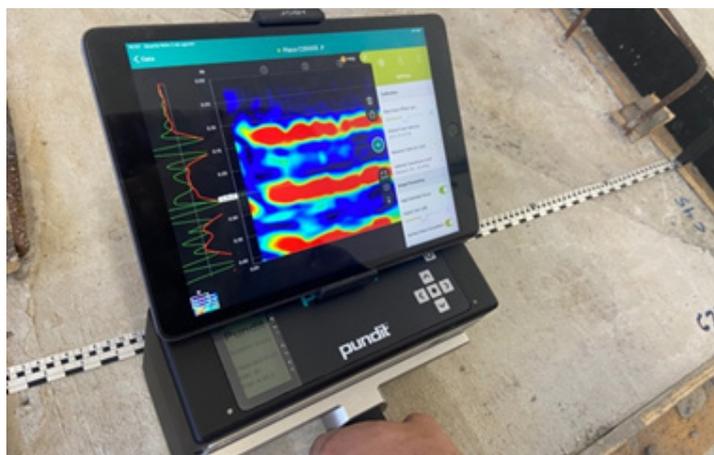


Figura 3 – Ensaio de tomografia ultrassônica no concreto

Fonte: Leonel (2022).

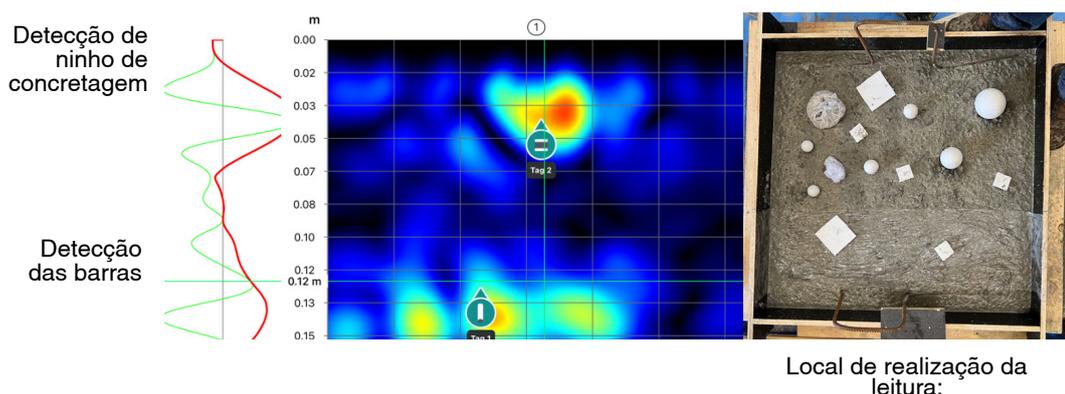


Figura 4 – Ensaio de tomografia ultrassônica no concreto

Fonte: Leonel (2022).

Apesar das vantagens da utilização da técnica, cabe ressaltar que alguns fatores podem afetar os resultados obtidos, como a distância entre as superfícies de contato dos transdutores; a presença de armadura, principalmente no sentido de propagação da onda; tipo, massa específica e outras características do agregado; tipo de cimento e grau de hidratação; e tipo de adensamento e idade do concreto (Lin *et al.*, 2018; No, 2002; Rehman *et al.*, 2016; Silva *et al.*, 2019).

Ensaio de termografia infravermelha (Term – Infrared Thermography)

A termografia infravermelha caracteriza-se como um método não destrutivo baseado no princípio físico de que todo objeto com temperatura acima do zero absoluto emite radiação eletromagnética, em função da excitação das moléculas que o constituem. O método emprega câmeras termográficas para medição do grau de emissão de radiação infravermelha dos elementos analisados, convertendo isso em sinal elétrico (No, 2002; Lorenzi *et al.*, 2016). Na sequência, são produzidas imagens (termogramas) a partir do cálculo dessas temperaturas. Quando o ensaio é finalizado, os termogramas podem ser visualizados em diferentes formas, de acordo com os objetivos da análise (Yehia *et al.*, 2007; Máximo; Pantoja, 2017).

A termografia por infravermelho pode ser aplicada no monitoramento e no diagnóstico das condições dos edifícios e ainda possibilita a identificação precoce de anomalias, evitando o agravamento e o aumento de custos de reparo. No meio técnico é comumente utilizada como método de detecção de danos estruturais, incluindo fissuras, detecção de pontos de umidade e deslocamento de revestimentos (Lin *et al.*, 2018; Yehia *et al.*, 2007; Mello *et al.*, 2017; Máximo; Pantoja, 2017). Por meio de um gradiente de fluxo de calor no material analisado, podem ser localizadas as diferenças nas temperaturas refletidas em sua superfície (Lorenzi *et al.*, 2016; Milanez, 2017). Medindo-se essas temperaturas em certas condições de fluxo de calor, pode-se determinar a localização das anomalias que são apresentadas em forma dos termogramas, conforme ilustra a Figura 5.

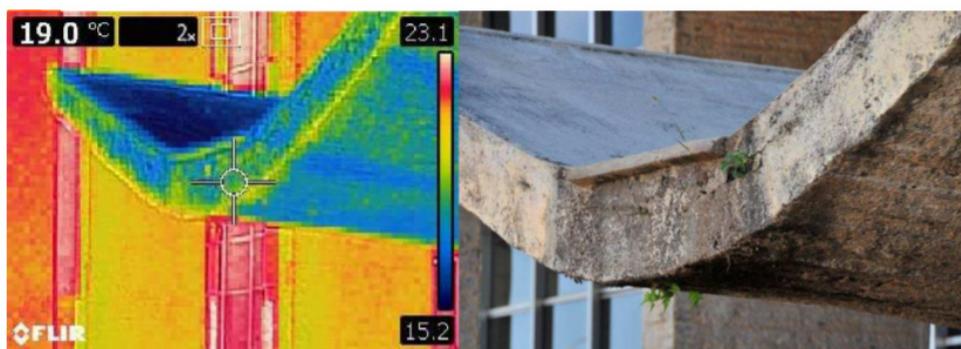


Figura 5 – Termograma gerado a partir de ensaio de termografia infravermelha
Fonte: Máximo e Pantoja (2017).

Ensaio de vazamento de fluxo magnético (MFL - *Magnetic Flux Leakage*)

O ensaio consiste em magnetizar o aço dentro da estrutura de concreto por um forte ímã externo para detectar defeitos, tais como pontos ou regiões com corrosão, perda de seção transversal e quebras de elementos de aço. Este método funciona com base no princípio de que, quando o defeito está presente no elemento de aço, o campo magnético no material “se perde” de seu caminho normal de fluxo. Nessa fase, qualquer mudança no campo magnético pode ser identificada pelo detector magnético (No, 2002; Chase; Washer, 1997; Thom *et al.*, 2010).

Muito difundido no meio técnico para análise de corrosão em chapas de reservatórios metálicos, o MFL tem potencial para detectar com segurança a perda de metal por corrosão e até, em alguns casos, encontrar falhas geométricas ou metalúrgicas. Devido a isso, é o método mais comum utilizado em linhas de tubulação para localizar regiões com perda de metal em dutos de transmissão de petróleo e gás (Costa *et al.*, 2014; Thom *et al.*, 2010).

No Brasil, um estudo em destaque com a utilização da técnica foi desenvolvido para inspeção de cabos de aço usados nas indústrias petrolíferas. O estudo propõe a produção de um sistema composto por um sensor magnético e ímãs de neodímio, em uma configuração tal que, à medida que há variação na intensidade do fluxo magnético que passa ao longo de uma seção do cabo de aço, o sistema seja capaz de medir essa variação derivada da perda de uma seção metálica em virtude da presença de pites de corrosão, perda de área metálica devido à corrosão, entalhes, trincas e ruptura de arames de cabo de aço (Neto *et al.*, 2021).

Avaliação do uso dos ensaios não destrutivos com foco nos danos

A partir dos principais ensaios identificados nos itens anteriores e, de acordo com a abordagem da etiologia dos danos, os seguintes tipos de defeitos foram reconhecidos na revisão sistemática da literatura como os mais comuns de serem detectados nas estruturas em concreto armado: delaminação, fissuras, vazios internos e corrosão das armaduras.

Os métodos de ensaios foram comparados e avaliados, sendo os resultados apresentados na Tabela 1. As características de cada técnica foram classificadas em critérios para inspeção em estruturas de concreto, com destaque para os seguintes aspectos: velocidade do ensaio, detecção interna (capacidade de detectar defeitos

internos), precisão, velocidade de análise, custo, facilidade de uso, segurança para o público e o operador, habilidade exigida do operador e repetibilidade. Uma proposta de classificação em três níveis (bom, intermediário e ruim) é sugerida no presente artigo, baseando-se nos dados de percepção de uso das técnicas identificadas em cada um dos artigos constantes na literatura.

CRITÉRIO	IE ¹	GPR ²	UT ³	TERM ⁴	IRT ⁵	RT ⁶	MFL ⁷
Velocidade do ensaio	I	B	I	B	I	R	I
Detecção interna	B	B	B	R	I	B	I
Velocidade de análise	I	I	I	B	I	B	I
Custo	B	B	I	B	B	R	R
Precisão	B	I	B	I	I	B	I
Facilidade de uso	B	B	B	B	B	R	R
Segurança ao operador	B	B	B	B	B	R	I
Habilidade exigida	B	B	B	B	B	R	R
Repetibilidade	B	I	B	I	I	B	I

Tabela 1 – Avaliação do uso de ensaios não destrutivos de acordo com os critérios propostos

Legenda: R: ruim (célula sombreada de vermelho); I: intermediário (sombreada de amarelo); B: bom (sombreada de verde). 1ensaio de eco de impacto (IE), 2ensaio de radar de penetração no solo (GPR), 3ensaio de ultrassom (UT), 4ensaio de termografia infravermelho (TERM), 5ensaio de resposta ao impulso (IRT), 6ensaio radiográfico (RT) e 7ensaio de vazamento de fluxo magnético (MFL).

Fonte: Elaborada pelo/os autores/as (2025).

Como resultado da avaliação mostrada na Tabela 1, com base no número de B's, I's e R's, os cinco principais métodos não destrutivos classificados foram identificados como sendo IE, GPR, UT, TERM e IRT em ordem decrescente estabelecida. O uso dessas técnicas de forma conjunta ou complementar por um especialista, além de inspeções visuais, permite formar diagnósticos assertivos, históricos de inspeções e degradações, alimenta a elaboração de programas mais econômicos de manutenções preventivas e corretivas e diminuem o risco de intervenções emergenciais e danos graves às estruturas, além de minimizar transtornos ao proprietário e aos usuários como um todo.

Com a finalidade de consubstanciar as análises anteriores (Tabela 1) com medidas quantitativas, foi realizada a avaliação dos 50 estudos encontrados na literatura. Os defeitos considerados para esta avaliação, conforme descrito anteriormente, foram as delaminações, fissuras, vazios e corrosão da armadura. O critério ou medida considerada para esta avaliação foi o número de citações de um método característico, considerado aplicável a um defeito específico. Em outras palavras, para se obter uma medida quantitativa voltada à comparação entre vários métodos de ensaios não destrutivos e sua aplicabilidade a cada tipo de defeito, os resultados da pesquisa bibliográfica foram analisados com o objetivo de encontrar o número de fontes que identificaram um método como aplicável a um tipo de defeito. Tais resultados são apresentados na Tabela 2.

Os dados apresentados na Tabela 2 podem ser usados como um guia de seleção de métodos destrutivos e permitem que os profissionais e inspetores selecionem o método de ensaio mais aplicável para detectar cada tipo de dano ou defeito específico.

Para detecção de defeitos relacionados com delaminações ou deslocamentos, 70% dos trabalhos estudados indicam a utilização da técnica de radar GPR. Ainda

nessa linha de problemas, a termografia infravermelha é considerada aplicável para 38% dos trabalhos estudados e o ensaio de eco de impacto para 34%.

Já para a detecção da corrosão das armaduras, o ensaio de radar GPR mostrou-se com valor percentual significativamente mais alto em relação aos outros métodos (28% dos trabalhos), o que credencia essa técnica a ser potencialmente aplicável às investigações da corrosão de armaduras em estruturas de concreto.

TIPO DE DEFEITO	ENSAIO	Nº DE ARTIGOS	% DO TOTAL
Delaminação	IE ¹	17	34%
	GPR ³	35	70%
	UT ⁵	8	16%
	TERM ⁶	19	38%
	IRT ⁴	4	8%
	RT ²	1	2%
	MFL ⁷	0	0%
Corrosão da armadura	IE ¹	2	4%
	GPR ³	14	28%
	UT ⁵	2	4%
	TERM ⁶	1	2%
	IRT ⁴	0	0%
	RT ²	0	0%
	MFL ⁷	1	2%
Fissuras	IE ¹	6	12%
	GPR ³	5	10%
	UT ⁵	15	30%
	TERM ⁶	8	16%
	IRT ⁴	3	6%
	RT ²	2	4%
	MFL ⁷	1	2%
Vazios internos (ninhos de concretagem)	IE ¹	9	18%
	GPR ³	14	28%
	UT ⁵	7	14%
	TERM ⁶	8	16%
	IRT ⁴	4	8%
	RT ²	4	8%
	MFL ⁷	0	0%

Tabela 2 – Levantamento quantitativo da aplicabilidade dos métodos não destrutivos, a partir de revisão sistemática da literatura

Legenda: 1ensaio de eco de impacto (IE), 2ensaio de radar de penetração no solo (GPR), 3ensaio de ultrassom (UT), 4ensaio de termografia infravermelho (TERM), 5ensaio de resposta ao impulso (IRT), 6ensaio radiográfico (RT) e 7ensaio de vazamento de fluxo magnético (MFL).

Fonte: Elaborada pelo/os autores/as (2025).

Para detecção de fissuras, destaca-se o ensaio de determinação da velocidade de ondas/pulsos ultrassônicos com aplicação em 30% dos trabalhos estudados e, em segundo lugar, a termografia infravermelha com 16%. A utilização da técnica de ultrassom mostra-se interessante para a detecção de fissuras, uma vez que se pode estabelecer correlação entre o tempo decorrido de movimentação da onda com a

profundidade da fissura em análise. Para a identificação de segregação e ninhos de concretagem ou vazios internos no concreto, novamente o radar GPR se apresenta como a técnica mais aplicável, com recomendação em 28% dos trabalhos, seguido dos ensaios de eco de impacto (18%) e termografia infravermelha (16%).

Em linhas gerais, nota-se que, para detecção de defeitos e falhas internas às estruturas de concreto, a técnica de radar GPR é a mais recomendada, uma vez que emprega pulsos elétricos de altíssima frequência (da ordem de 10 a 2500 MHz), garantindo assim uma boa resolução por meio de sua antena dipolar transmissora (Maierhofer *et al.*, 2008; Huston *et al.*, 2000). Quando se trata de defeitos superficiais, outras técnicas mais práticas e que demandam menos tempo de execução, com boas respostas técnicas, podem ser utilizadas. São os casos das técnicas de termografia infravermelha, eco de impacto e velocidade de propagação de ondas/pulsos ultrassônicos (Sultan; Washer, 2018).

Gucunski *et al.* (2010) expõem que um dos problemas mais comumente encontrados em pontes é o deslocamento provocado pela corrosão das armaduras (deslocamento do concreto na região do cobrimento). Nessa linha, os referidos autores comentam que as avaliações em pontes com a utilização de uma única técnica não destrutiva isolada fornecem informações muito limitadas sobre as reais condições de deterioração da estrutura. A abordagem preconizada por esses autores envolve um conjunto de tecnologias associadas, a saber: eco de impacto, velocidade de propagação de ondas/pulsos ultrassônicos, radar de penetração GPR e resistividade elétrica, que são confrontadas com resultados de resistência mecânica à compressão, por meio da extração de testemunhos. Os principais resultados do trabalho de Gucunski *et al.* (2010) destacam a alta velocidade na coleta de dados associada aos levantamentos GPR, visando à avaliação da deterioração do concreto. Eles ressaltam, também, que o ensaio de resistividade elétrica forneceu bons parâmetros para avaliar a probabilidade de corrosão e que o ensaio de ultrassonografia proporcionou uma avaliação precisa dos processos de deterioração e pontos de defeitos relacionados às propriedades mecânicas.

No estudo desenvolvido por Sun *et al.* (2018), foram avaliados tabuleiros de pontes de concreto por meio de dois métodos não destrutivos, a saber: um sistema de varredura acústica e o radar de penetração GPR. A partir dos resultados obtidos, pôde-se aferir que tanto a varredura acústica como o GPR fornecem informações importantes sobre as condições dos tabuleiros de pontes. Embora ambos os métodos possam detectar alguns defeitos comuns, a varredura acústica identifica principalmente delaminações superficiais, enquanto o GPR é capaz de avaliar a deterioração do concreto e a corrosão do aço em estágios iniciais. Assim, os autores concluem expondo que o ensaio de GPR fornece uma detecção de falhas mais precisa em comparação com o método de varredura acústica.

Rehman *et al.* (2016), por sua vez, trazem uma RSL acerca dos métodos de ensaios não destrutivos aplicáveis às inspeções de pontes de concreto. Dentre as conclusões apontadas, os autores ressaltam a importância dos ensaios dinâmicos, termografia infravermelha e tecnologia de radar GPR para estruturas não acessíveis, fornecendo parâmetros bastante confiáveis para análise estrutural. Já os testes baseados em radiação fornecem boas informações sobre vazios e fissuras, com a ressalva de que os raios X, raios gama e raios nêutrons são perigosos para o operador e o entorno.

Com uma abordagem bem atual e tecnológica, o trabalho desenvolvido por Xu e Turkan (2019) objetivou o desenvolvimento de uma estrutura para inspeção e gerenciamento de pontes com a utilização de modelagem das informações e o uso de

sistemas de veículos aéreos não tripulados de maneira integrada. Foram detectados diferentes tipos de defeitos automaticamente, por algoritmos de visão computacional, a partir das imagens capturadas pelos drones. A estrutura de gerenciamento também proporcionou aos inspetores e aos tomadores de decisão o acesso aos dados de inspeção de forma simultânea, aproveitando a tecnologia de computação em nuvem. Assim, a estrutura proposta pelos autores forneceu uma abordagem sistemática de documentação com precisão dos dados de avaliação da condição estrutural, proporcionando a redução do número de visitas ao local. Ela também contribuiu no sentido de evitar a ocorrência de erros potenciais resultantes da transcrição de dados, permitindo uma abordagem mais eficiente, econômica e segura do processo de inspeção.

Considerações finais

Uma Revisão Sistemática da Literatura foi realizada para identificar as técnicas de ensaios não destrutivos mais promissoras e suas respectivas habilidades para aplicação em inspeções de estruturas de concreto armado. A partir dessa revisão, conclui-se que:

- os cinco principais métodos não destrutivos classificados foram IE, GPR, UT, TERM e IRT em ordem decrescente, de acordo com o critério de classificação proposto;
- nos trabalhos estudados, o ensaio de radar GPR é o mais recomendado dentre todos os ensaios para detecção de defeitos e/ou falhas internas em estruturas de concreto, como vazios, ninhos de concretagem e corrosão das armaduras;
- para a detecção de defeitos presentes na superfície externa do material como fissuras e deslocamentos, as técnicas de termografia infravermelha (TERM), ensaio de eco de impacto (IE) e ensaio de velocidade de propagação de ondas/pulsos ultrassônicos podem ser utilizadas;
- os resultados dos estudos analisados neste documento possibilitam o desenvolvimento futuro de procedimentos de campo, protocolos para medições e relatórios para integração em programas de monitoramento e inspeção de estruturas de concreto.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8802: 2019: Concreto endurecido: determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica*. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *ACI Report 228.2R-98: nondestructive test methods for evaluation of concrete in structures*. Farmington Hills, Michigan: ACI, 2004.

AKHTAR, S.; BHADAURIA, S.; VERMA, S. K. Review of nondestructive testing methods for condition monitoring of concrete structures. *Journal of Construction Engineering*, [s. l.], v. 2013, n. 4, p. 1-11, 2013. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2013/834572>. Acesso em: 15 nov. 2024.

AVALIAÇÃO da integridade de elementos estruturais pelo método do impacto-eco. *OZ Diagnóstico*. [S. l.], 2021. Disponível em: <http://www.oz-diagnostico.pt/fichas/1F%20015.pdf>. Acesso em: set. 2021.

BARBOSA, C. S.; NÓBREGA, P. G. B. Ensaios não destrutivos para identificação de armaduras em elementos de concreto armado. *Concreto & Construções*, São Paulo, ed. 86, p. 98-103, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/332655510_Ensaios_nao_destrutivos_para_identificacao_de_armaduras_em_elementos_de_concreto_armado. Acesso em: 15 nov. 2024.

BAROGHEL-BOUNY, V.; CAPRA, B.; LAURENS, S. A durabilidade das armaduras e do concreto de cobrimento. In: OLLIVIER, J.-P.; VICHOT, A. (ed.). *Durabilidade do concreto: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente*. São Paulo: IBRACON, 2014, p. 255-326.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. *BSI 1881 Part 203: Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete*. London, England: BSI, 1986.

BUNGEY, J. H.; MILLARD, S. G.; GRANTHAM, M. G. *Testing of concrete in structures*. Oxon, United Kingdom: Taylor & Francis, 2006.

BÜYÜKÖZTÜRK, O. Imaging of concrete structures. *NDT & E International*, [s. l.], v. 31, p. 233-243, 1998. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0963869598000127?via%3Dihub>. Acesso em: 15 nov. 2024.

CHASE, S. B.; WASHER, G. Nondestructive evaluation for bridge management in the next century. *Public Roads*, Washington, v. 61, p. 16-25, 1997. Disponível em: <https://trid.trb.org/View/575934>. Acesso em: 15 nov. 202.

COSTA, E. M.; MEDEIROS, L. C. L.; MOURA, C. R. O.; MORAIS, F. C.; OLIVEIRA, M. V. D. S. Avaliação de corrosão em chapas de fundo de tanques de armazenamento de petróleo através da técnica de MFL - Magnetic Flux Leakage. In: INTERCORR 2014, 2014, fortaleza. *Anais [...]*. Fortaleza: Hotel Praia Centro/ INTERCORR 2014, 2014.

DAVIS, A. G. The nondestructive impulse response test in North America: 1985–2001. *NDT E Int.*, [s. l.], v. 36, n. 4, p. 185-193, 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/222743989_The_nondestructive_impulse_response_test_in_North_America_1985-2001. Acesso em: 15 nov. 2025.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES, J. A. V. J. *Design Science Research: Método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia*. Porto Alegre: Bookman, 2015.

ENSAIO de eco de impacto (IE): ensaios de engenharia civil. *EQS Global*, [s. l.], 2021. Disponível em: <https://eqsglobal.com/pt/inspecao-e-engenharia-civil/ensaios-para-betao-madeira-e-argamassas/impacto-eco-ie,2021>. Acesso em: set. 2021.

GRANT, M. J.; BOOTH, A. A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health Information and Libraries Journal*, [s. l.], v. 26, n. 2, p. 91-108, 2009. Disponível em: <https://www.researchgate.net/>

[publication/26260835_A_typology_of_reviews_An_analysis_of_14_review_types_and_associated_methologies](#). Acesso em: 15 nov. 2025.

GUCUNSKI, N.; ROMERO, F.; KRUSCHWITZ, S.; FELDMANN, R.; ABU-HAWASH, A.; DUNN, M. Multiple complementary nondestructive evaluation technologies for condition assessment of concrete bridge decks. *In*: CONFERENCE: THE 32ST INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AUTOMATION AND ROBOTICS IN CONSTRUCTION AND MINING (ISARC), 2015, Oulu, Finland. *Anais [...]*. Oulu, Finland, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/281897410_Attenuation-based_Methodology_for_Condition_Assessment_of_Concrete_Bridge_Decks_using_GPR. Acesso em: 15 nov. 2025.

HAMASAKI, H.; UOMOTO, T.; OHTSU, M.; IKENAGA, H.; TANANO, H.; KISHI, K.; YOSHIMURA, A. Identification of Reinforced in Concrete by Electro-Magnetic Methods. *In*: INTERNATIONAL SYMPOSIUM (NDT-CE 2003) NON-DESTRUCTIVE TESTING IN CIVIL ENGINEERING, v. 8, n. 10, 2003, Berlin, Germany. *Anais [...]*. Berlin, Germany, 2003. Artigo. Disponível em: <https://www.ndt.net/article/ndtce03/papers/v006/v006.htm>. Acesso em: 15 nov. 2025.

HUSTON, D.; HU, J. Q.; MASER, K.; WEEDON, W.; ADAM, C. GIMA Ground penetrating radar system for monitoring concrete bridge decks. *Journal of Applied Geophysics*, [s. l.], v. 43, n. 2, p. 139-146, 2000. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/222656009_GIMA_ground_penetrating_radar_system_for_monitoring_concrete_bridge_decks. Acesso em: 15 nov. 2025.

KITCHENHAM, B. Systematic literature reviews in software engineering: A systematic literature review. *Information and Software Technology*, [s. l.], v. 51, n. 1, 2009. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/222673849_Systematic_literature_reviews_in_software_engineering-A_systematic_literature_review. Acesso em: 15 nov. 2025.

LEONEL, A. C. A. *Estudo das técnicas de tomografia ultrassônica e radar de penetração com contribuição em metodologia de inspeção de obras de concreto*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) — Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2022. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/items/947c9c65-134e-468c-a16a-f0f585bbc7a4>. Acesso em: 15 nov. 2025.

LIM, M. K.; CAO, H. Combining multiple NDT methods to improve testing effectiveness. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 38, p. 1310-1315, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/251621243_Combining_multiple_NDT_methods_to_improve_testing_effectiveness. Acesso em: 15 nov. 2025.

LIN, S.; MENG, D.; CHOI, H.; SHAMS, S.; AZARI, H. Laboratory assessment of nine methods for nondestructive evaluation of concrete bridge decks with overlays. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 188, n. 2, p. 966-982, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/327672708_Laboratory_assessment_of_nine_methods_for_nondestructive_evaluation_of_concrete_bridge_decks_with_overlays. Acesso em: 15 nov. 2025.

LORENZI, A.; REGINATO, L. A.; LORENZI, L. S.; FILHO, L. C. P. S. Emprego de ensaios não destrutivos para inspeção de estruturas de concreto. *Revista de Engenharia Civil IMED*, Passo Fundo, v. 3, n. 1, p. 3-13, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/305221326_Emprego_de_Ensaios_Nao_Destrutivos_para_Inspecao_de_Estruturas_de_Concreto. Acesso em: 15 nov. 2025.

MAIERHOFER, C. Nondestructive evaluation of concrete infrastructure with ground penetrating radar. *Journal of Materials in Civil Engineering*, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 287-297, 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/245307601_Nondestructive_Evaluation_of_Concrete_Infrastructure_with_Ground_Penetrating_Radar. Acesso em: 15 nov. 2025.

MAIERHOFER, C.; ZACHER, G.; KOHL, C.; WÖSTMANN, J. Evaluation of radar and complementary echo methods for NDT of concrete elements. *Journal of Nondestructive Evaluation*, [s. l.], v. 27, n. 1, p. 47, 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/225469214_Evaluation_of_Radar_and_Complementary_Echo_Methods_for_NDT_of_Concrete_Elements. Acesso em: 15 nov. 2025.

MÁXIMO, M. A. S.; PANTOJA, J. C. Aplicação da termografia infravermelha para identificar patologias em edifícios de arquitetura monumental. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS — CINPAR 2017, 13., 2017, Crato, CE. *Anais [...]*. Crato: URCA/UFCA/ UVA/FAP, 2017. Disponível em: <https://www.urca.br/portal2/wp-content/uploads/docs/pdf/2017/Eventos/CINPAR/CINPAR-Vol%20I-A.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2025.

MEHRABI, A. B.; FARHANGDOUST, S. A Laser-Based Noncontact Vibration Technique for Health Monitoring of Structural Cables: Background, Success, and New Developments. *Advances in Acoustics and Vibration*, [s. l.], n. 1, p. 1-13, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/325762572_A_Laser-Based_Noncontact_Vibration_Technique_for_Health_Monitoring_of_Structural_Cables_Background_Success_and_New_Developments. Acesso em: 15 nov. 2025.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades de materiais*. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2014.

MELLO, E.; MOREIRA, K. A. W.; DE LUCA, L. C. Ensaios não destrutivos em revestimentos e concreto: emprego de novas tecnologias. In: XIX COBREAP – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS, 19., 2017, Foz do Iguaçu. *Anais [...]*. Foz do Iguaçu: Ibape, 2017, p. 5-18. Disponível em: https://www.mrcl.com.br/RELACAO_TRABALHOS.htm. Acesso em: 15 nov. 2025.

MILANEZ, M. O. *Influência do vento na detecção de defeitos em estruturas de concreto utilizando termografia infravermelha*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

NETO, T. M.; MACEDO, R. B. S.; SILVA, V. M.; OLIVEIRA, R. L. Inspeção eletromagnética em cabos de aço usados na indústria de petróleo offshore utilizando técnicas de vazamento de fluxo magnético. *Conjecturas*, Porto, Portugal, v. 21, n. 2, 2021. ISSN 1657-5830. Disponível em: <https://www.researchgate.net/>

publication/355343487_Inspecao_eletromagnetica_em_cabos_de_aco_usados_na_industria_de_petroleo_offshore_utilizando_tecnicas_de_vazamento_de_fluxo_magnetico. Acesso em: 15 nov. 2025.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 912 p.

NO, T. C. S. *Guidebook on Non-Destructive Testing of Concrete Structures*. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, 2002. (Training Course Series.).

OLIVEIRA, D.; ALMEIDA, L. C. Ensaio radiográfico em estruturas de concreto. *In: SEMINÁRIO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS (ABENDE)*, 7., 1987, Rio de Janeiro. *Anais [...]*. Rio de Janeiro: Abende, 1987.

PERLIN, L. P.; PINTO, R. C. A. Tomografia ultrassônica em concreto. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 246-269, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952013000200006>. Acesso em: 15 nov. 2025.

PINTO, R. C. A.; MEDEIROS, A.; PADARATZ, I. J.; ANDRADE, P. B. Use of Ultrasound to Estimate Depth of Surface Opening Cracks in Concrete Structures. *E-Journal of Nondestructive Testing and Ultrasonics*, [s. l.], v. 8, p. 1-11, 2010. Disponível em: https://www.ndt.net/article/ndtnet/2010/10_Pinto.pdf. Acesso em: 15 nov. 2025.

RAMOS, L. F.; GUIMARÃES, P.; LOURENÇO, P. B. Ensaios de impacto-eco para a determinação da profundidade de maciços de fundação em antenas da rede de telemóveis TMN. *ISISE - Relatórios Técnicos/Científicos*. Braga, Portugal: Universidade do Minho, 2012. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1822/21825>. Acesso em: ago. 2021.

REHMAN, S. K. U.; IBRAHIM, Z.; MEMON, S. A.; JAMEEL, M. Nondestructive test methods for concrete bridges: A review. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 107, n. 3, p. 58-86, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/289530879_Nondestructive_test_methods_for_concrete_bridges_A_review. Acesso em: 15 nov. 2025.

RHAZI, J.; DOUS, O.; BALLIVY, G.; LAURENS, S.; BALAYSSAC, J. P. Nondestructive health evaluation of concrete bridge decks by GPR and half-cell potential techniques. *In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NON-DESTRUCTIVE TESTING IN CIVIL ENGINEERING*, v. 8, n. 10, Berlin, Germany. *Anais [...]*. Berlin, Germany, 2003. Disponível em: <https://www.ndt.net/article/ndtce03/papers/v006/v006.htm>. Acesso em: 15 nov. 2025.

RHAZI, J.; DOUS, O.; LAURENS, S. A new application of the GPR technique to reinforced concrete bridge decks. *In: PROCEEDINGS of the 4th middle east ndt conference and exhibition*. *Manama*, Bahrain, p. 2-5, 2007.

SHOKOUHI, P.; WOLF, J.; WIGGENHAUSER, H. Detection of delamination in concrete bridge decks by joint amplitude and phase analysis of ultrasonic array measurements. *Journal of Bridge Engineering*, [s. l.], v. 19, n. 13, 04013005, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/277610132_Detection

[of_Delamination_in_Concrete_Bridge_Decks_by_Joint_Amplitude_and_Phase_Analysis_of_Ultrasonic_Array_Measurements](#). Acesso em: 15 nov. 2025.

SILVA, M. T. A.; ROCHA, J. H. A.; MONTEIRO, E. C. B.; PÓVOAS, Y. V.; RABBANI, E. R. K. Avaliação do ensaio de ultrassom para a estimação da profundidade de fissuras em concreto. *Revista ALCONPAT*, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 79-92, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/330012592_Evaluation_of_the_ultrasound_test_for_estimating_the_depth_of_cracks_in_concrete. Acesso em: 15 nov. 2025.

SOUZA, G. B. *Avaliação do método de propagação de onda ultrassônica na determinação da profundidade de fissura em concreto*. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2016.

SULTAN, A. A.; WASHER, G. A. Comparison of Two Nondestructive Evaluation Technologies for the Condition Assessment of Bridge Decks. *Transportation Research Record*, [s. l.], v. 2672, n. 5, p. 113-122, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/327189323_Comparison_of_Two_Nondestructive_Evaluation_Technologies_for_the_Condition_Assessment_of_Bridge_Decks. Acesso em: 15 nov. 2025.

SUN, H.; PASHOUTANI, S.; ZHU, J. Nondestructive Evaluation of Concrete Bridge Decks with Automated Acoustic Scanning System and Ground Penetrating Radar. *Sensors*, [s. l.], v. 18, n. 6, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/325839066_Nondestructive_Evaluation_of_Concrete_Bridge_Decks_with_Automated_Acoustic_Scanning_System_and_Ground_Penetrating_Radar. Acesso em: 15 nov. 2025.

THOM, F. C. M.; SISQUINI, G. R.; FREITAS, M. S. R. Gerenciamento da manutenção de tubulações de óleo e gás usando o cálculo da confiabilidade baseado nos dados de detecção de defeitos de corrosão obtidos pelo vazamento de fluxo magnético (MFL). *Mecânica Computacional*, Buenos Aires, Argentina, v. 29, p. 9055-9072, 2010.

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British Journal of Management*, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 207-222, 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/216458560_Towards_a_Methodology_for_Developing_Evidence-Informed_Management_Knowledge_by_Means_of_Systematic_Review. Acesso em: 15 nov. 2025.

XU, Y.; TURKAN, Y. Bridge Inspection Using Bridge Information Modeling (BrIM) and Unmanned Aerial System (UAS). In: MUTIS, I.; HARTMANN, T. *Advances in Informatics and Computing in Civil and Construction Engineering*. Cham, Switzerland: Springer, 2019. p. 617-624. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/328141911_Bridge_Inspection_Using_Bridge_Information_Modeling_BrIM_and_Unmanned_Aerial_System_UAS_Proceedings_of_the_35th_CIB_W78_2018_Conference_IT_in_Design_Construction_and_Management. Acesso em: 15 nov. 2025.

YEHA, S.; ABUDAYYEH, O.; NABULSI, S.; ABDELQADER, I. Detection of common defects in concrete bridge decks using nondestructive evaluation techniques. *Journal*



of *Bridge Engineering*, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 215-225, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/245281786_Detection_of_Common_Defects_in_Concrete_Bridge_Decks_Using_Nondestructive_Evaluation_Techniques. Acesso em: 15 nov. 2025.