XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.9018

Avaliação qualitativa exploratória de concretos com diferentes porosidades por meios de ensaios não destrutivos: radar GPR e tomografia ultrassônica

Exploratory qualitative evaluation of concretes with different porosities using non-destructive testing methods: GPR radar and ultrasonic tomography

Kamila Custódio Veleda
Universidade Federal de Goiás | Goiânia | Brasil | custodio234@discente.ufg.br
Brunno Dourado Silva
Universidade Federal de Goiás | Goiânia | Brasil | brunno.dourado@discente.ufg.br
Letícia Alves da Silva
Universidade Federal de Goiás | Goiânia | Brasil | silvaleticia@discente.ufg.br
Andrielli Morais de Oliveira
Universidade Federal de Goiás | Goiânia | Brasil | andriellimorais@ufg.br

Resumo

A porosidade do concreto, avaliada por meio de ensaios não destrutivos e de interpretação visual de imagens, ainda não é de pleno domínio científico e técnico-tecnológico. Neste sentido, o presente estudo avaliou, de forma experimental e exploratória, as respostas das técnicas de radar (ondas eletromagnéticas de rádio pelo uso do equipamento *Ground Penetrating Radar* - GPR) e tomografia ultrassônica em concretos com diferentes porosidades. Foram avaliados concretos com relações água/ligante 0,40 e 0,70 em uma das faces de corpos de prova prismáticos e sem armadura. A análise considerou nitidez, contraste, dispersão de sinais e uniformidade das imagens obtidas, sem aquisição de parâmetros numéricos. Como resultado, o GPR não diferenciou claramente a diferença de porosidades entre os concretos estudados. Acredita-se que isso seja devido ao princípio inerente da própria técnica e à ausência de interfaces de elevado contraste eletromagnético nos concretos. Já a tomografia apresentou maior sensibilidade qualitativa à homogeneidade interna das amostras analisadas, sendo com menor nitidez e contraste, o concreto de relação 0,70. Conclui-se que, nas condições avaliadas, a tomografia ultrassônica possui potencial para triagem qualitativa da porosidade de matrizes cimentícias, mas não para quantificação direta. O GPR não demonstrou capacidade de discriminação visual da porosidade. O estudo delimita o alcance das técnicas e orienta futuras validações quantitativas com maior número de amostras.

Palavras-chave: Ensaios não destrutivos. GPR. Tomografia ultrassônica. Porosidade. Concreto.

Abstract

The porosity of concrete, assessed through non-destructive testing and visual image interpretation, has not yet been fully understood from a scientific and technical-technological perspective. Accordingly, this study evaluated, the present study of experimental and exploratory comparison of the responses obtained using radar techniques (radio frequency electromagnetic waves by Ground Penetrating Radar—GPR equipment) and ultrasonic tomography on concrete specimens with different porosities. Concrete specimens with water-to-binder ratios of 0.40 and 0.70 were evaluated on one face of prismatic, unreinforced test specimens. The analysis considered image sharpness, contrast, signal dispersion, and uniformity of the obtained images, without acquiring numerical parameters. As a result, the GPR did not clearly distinguish the differences in the porosity between the studied concretes. It is believed that this is due to the inherent principle of the technique itself and the absence of interfaces with high electromagnetic contrast in the concrete. The tomography, on the other hand, showed greater qualitative sensitivity to the internal homogeneity of the analyzed samples, with the concrete having a water-to-binder ratio of 0.70 exhibiting lower sharpness and contrast. It is concluded that, under the conditions evaluated, ultrasonic tomography has the potential for qualitative screening of the porosity of cementitious matrices, but it not for direct quantification. O GPR did not demonstrate the ability to visually discriminate porosity. The study defines the scope of the techniques and guides future quantitative validations with a larger number of samples.

Keywords: Non-destructive testing. GPR. Ultrasonic tomography. Porosity. Radar. Concrete.

Como citar:
VELEDA, K. C.; DOURADO, B.; ALVES, L.; OLIVEIRA, A. M. Avaliação qualitativa exploratória de concretos com diferentes porosidades por meios de ensaios não destrutivos: radar GPR e tomografia ultrassônica. ENTAC 2026. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21, 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC, 2026.

INTRODUÇÃO

A avaliação de estruturas e elementos de concreto por meio de ensaios não destrutivos (END) tem assumido papel relevante na engenharia civil, especialmente em inspeções em campo, controle tecnológico, diagnóstico de manifestações patológicas e planejamento de intervenções de manutenção. Esses métodos permitem obter informações sobre o interior do material sem comprometer a integridade dos elementos analisados, podendo reduzir custos e ampliar a segurança das decisões técnicas [1].

Entre as técnicas disponíveis, o *Ground Penetrating Radar* (GPR) e os métodos ultrassônicos apresentam princípios físicos distintos e, por isso, respostas complementares. O GPR baseia-se na propagação de ondas de rádio eletromagnéticas, cuja reflexão ocorre quando há contraste de propriedades dielétricas entre materiais, como concreto e aço, por exemplo [2]. Assim, o método tem sido amplamente aplicado na localização de armaduras, estimativa de cobrimento e identificação de interfaces internas.

A tomografia ultrassônica, por sua vez, baseia-se na propagação de ondas mecânicas e é influenciada por propriedades como densidade, rigidez, fissuração, vazios, umidade e homogeneidade interna do material [3]. Desta forma, tende a apresentar maior relação com a qualidade interna do concreto e com a distribuição de heterogeneidades. Logo, a relação água/ligante modifica a porosidade e a compacidade da matriz cimentícia, podendo influenciar a propagação de ondas no concreto [4][5].

Apesar do potencial dessas técnicas, sua interpretação pode ser afetada por condições de ensaio, experiência do operador, superfície de contato, umidade, ruídos e parâmetros do equipamento. Diante disso, o objetivo do presente artigo é avaliar, de forma experimental e exploratória, as respostas das técnicas de radar (ondas eletromagnéticas de rádio pelo uso do equipamento *Ground Penetrating Radar* - GPR) e tomografia ultrassônica em concretos com diferentes porosidades. Foram destacadas tendências observadas e limites de aplicação dos métodos para inferência indireta de porosidade.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Materiais e Corpos de Prova utilizados

Os corpos de prova analisados neste estudo foram selecionados a partir do programa experimental desenvolvido por Silva, Leonel e Oliveira [6], cujo objetivo foi avaliar o efeito de cloretos e da variação da umidade interna em concretos por meio de medidas de resistividade elétrica superficial aparente e volumétrica. No estudo de origem, foram produzidos concretos com diferentes relações água/ligante (a/l) (0,40, 0,55 e 0,70), além de uma composição com adição de sílica ativa na relação água/ligante 0,55. O detalhamento dos materiais utilizados e os procedimentos de caracterização foram descritos pelos autores [6]. Para o presente trabalho, foram reutilizados corpos de

prova prismáticos sem armadura e sem ataque por cloretos e foram preservadas as características originais de composição, moldagem, cura e histórico experimental dos corpos de prova, com a finalidade específica de realizar uma avaliação exploratória por GPR e tomografia ultrassônica.

Neste artigo, foram avaliados quatro corpos de prova prismáticos com dimensões de 40 cm x 15 cm x 15 cm, sendo dois corpos de prova para cada relação água/ligante (a/l) estudada, quais sejam 0,40 e 0,70. Essas condições foram selecionadas intencionalmente por representarem os extremos de menor e maior relação água/ligante da matriz experimental de origem, buscando verificar se as técnicas não destrutivas seriam capazes de indicar diferenças qualitativas entre matrizes cimentícias com distintos níveis esperados de compacidade e porosidade.

Em razão do número de unidades experimentais, a amostra não deve ser considerada estatisticamente representativa, constituindo uma comparação exploratória entre as condições avaliadas. Os ensaios foram conduzidos conforme um protocolo experimental definido para este estudo, uma vez que a investigação não teve como objetivo determinar as grandezas contempladas pelos métodos normatizados considerados e por estudos prévios com GPR e ultrassom [7].

Para o ultrassom, a NBR 8802 [8] estabelece o procedimento para determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica no concreto endurecido, parâmetro que não foi calculado nesta pesquisa. Para o GPR, a ASTM D6432-19 [9] apresenta orientações gerais relativas aos equipamentos, aos procedimentos de aquisição e à interpretação dos dados, mas não prescreve um método para comparação qualitativa de radargramas com a finalidade de diferenciar matrizes cimentícias quanto aos níveis esperados de porosidade. Desta forma, os procedimentos de aquisição e interpretação foram estabelecidos com base na literatura [7] e nas recomendações operacionais dos equipamentos, mantendo-se as condições de ensaio e os mesmos critérios de análise para todos os corpos de prova.

As misturas contemplaram concretos de referência (sem adição mineral) com relação água/ligante iguais a 0,40 e 0,70. Na produção das misturas empregou-se cimento Portland CP V-ARI, agregado graúdo granítico com dimensão máxima característica de 19 mm, areia natural quartzosa e aditivo superplastificante à base de policarboxilato [6]. A Tabela 1 explicita a matriz experimental para facilitar a rastreabilidade das comparações das variáveis estudadas.

Tabela 1: Matriz experimental adotada.

Condição	Relação água/ligante	Comparação
REF-0,40	0,40	Matriz de menor a/l
REF-0,70	0,70	Matriz de maior a/l

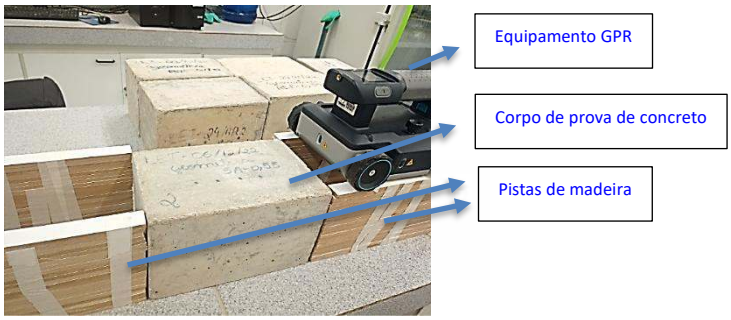
Fonte: o autor

Procedimentos de Ensaio e Critérios de Interpretação

Os ensaios com GPR foram realizados por varredura em uma das faces dos corpos de prova, com deslocamento manual do equipamento sobre a superfície. Foram utilizadas

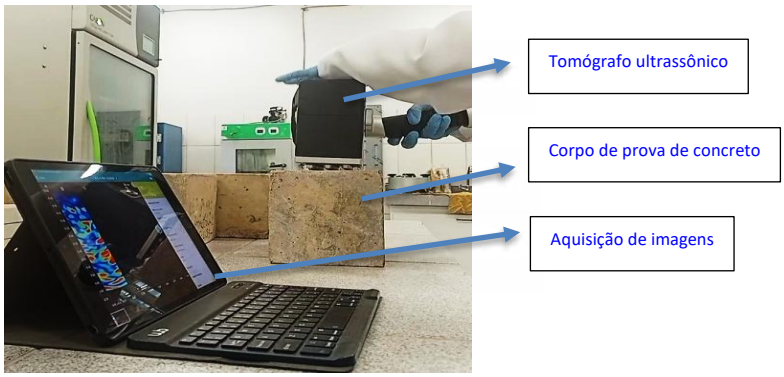
tábuas finas de madeira antes e após cada amostra (Figura 1), formando uma superfície/pista contínua de rolagem do equipamento para reduzir impactos nas arestas do concreto e preservar o deslocamento. A interpretação do GPR foi baseada na presença de reflexões das hipérboles e na intensidade relativa dos sinais obtidos. A Figura 1 apresenta a adaptação experimental realizada para a coleta dos dados com o GPR.

Figura 1: Configuração experimental para execução da varredura com GPR nos corpos de prova de concreto.



Nos ensaios de tomografia ultrassônica, o equipamento foi posicionado diretamente sobre a superfície dos corpos de prova, garantindo contato entre transdutores e concreto por meio de pressão manual. Os dados foram processados pelo próprio sistema e visualizados em tempo real. A interpretação tomográfica foi baseada na uniformidade da imagem, na presença de regiões contrastantes e na dispersão visual dos sinais, sem atribuição de valores absolutos de velocidade ou módulo, pois esses parâmetros não foram extraídos de forma sistemática nesta etapa do estudo. A Figura 2 evidencia a configuração experimental adotada para a tomografia ultrassônica.

Figura 2: Execução do ensaio de tomografia ultrassônica no corpo de prova de concreto do estudo.



Como mencionado antes, os ensaios de GPR e tomografia ultrassônica foram conduzidos por protocolo experimental próprio, baseando-se em estudos prévios [7], mas sem adoção de norma específica para a comparação visual da porosidade entre as técnicas. Como os equipamentos forneceram imagens e não foram exportadas matrizes numéricas de amplitude, velocidade, energia, atenuação ou contraste, a análise baseou-se nos critérios visuais apresentados no Quadro 1.

Como também referido, dois corpos de prova por condição de estudo foram utilizados e não foram extraídas variáveis numéricas para o presente estudo de natureza exploratória. Em futuras publicações de continuidade do presente estudo, dados numéricos poderão ser adquiridos e testes estatísticos inferenciais talvez possam ser aplicados. Para o momento, os dados obtidos foram de natureza qualitativa e exploratória e não foram aplicados tratamentos de imagens com uso de *softwares* pagos ou livres e qualquer tipo de inteligência artificial.

Quadro 1: Critérios qualitativos estabelecidos pelos autores para interpretação dos dados obtidos no estudo para as técnicas de ondas eletromagnéticas de rádio e tomografia ultrassônica.

Aspecto avaliado	GPR	Tomografia ultrassônica	Interpretação adotada
Homogeneidade	Variação visual dos padrões de reflexão	Uniformidade ou contraste do mapa tomográfico	Tomografia mais adequada para leitura qualitativa da matriz
Relação a/l	Mudança visual de nitidez e dispersão	Mudança na uniformidade dos mapas	Tendência qualitativa associada à porosidade esperada

Fonte: os autores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO ÁGUA/LIGANTE

As Figuras 3 e 4 apresentam, respectivamente, as imagens obtidas por tomografia ultrassônica e por ondas eletromagnéticas de rádio pelo equipamento GPR para os corpos de prova de concreto estudados com relações água/ligante 0,40 e 0,70. Essas duas condições foram selecionadas por representarem, dentro do programa experimental de origem, as matrizes de menor e maior relação água/ligante, permitindo uma comparação exploratória entre concretos com diferentes níveis esperados de compacidade e porosidade.

Figura 3: Resultado da aplicação de ondas ultrassônicas em corpos de prova de concreto com relação a/l de 0,40 (esquerda) e 0,70 (direita).

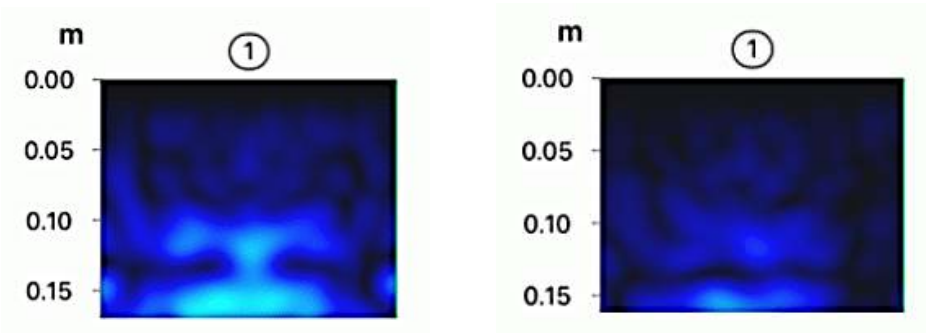
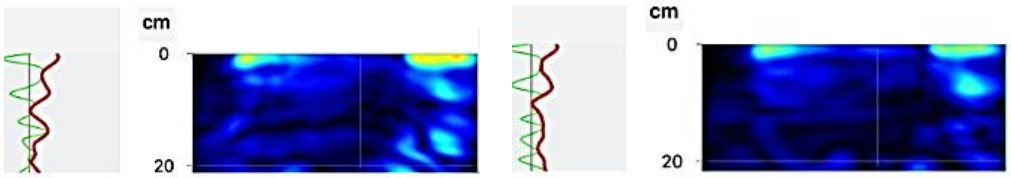


Figura 4: Resultado da técnica da aplicação de ondas eletromagnéticas de rádio, por meio do equipamento GPR , em corpos de prova de concreto com relação a/l de 0,40 (esquerda) e 0,70 (direita).



Na Figura 3, observa-se que as imagens da condição 0,70 apresentaram menor nitidez, menor variação de tons azuis e menor contraste entre as regiões escuras e claras, quando comparadas às imagens da condição 0,40. Essa diferença visual sugere maior heterogeneidade interna na matriz de maior relação água/ligante. Tal interpretação é coerente com o comportamento esperado para concretos com maior teor de água, nos quais a matriz cimentícia tende a apresentar maior volume de poros e menor compacidade [4] [5]. Além disso, o estudo de Silva, Leonel e Oliveira [6], de onde as amostras foram selecionadas, também indicou maior porosidade e maior vulnerabilidade do concreto REF 0,70 em comparação ao REF 0,40, reforçando a coerência da tendência observada nas imagens tomográficas.

A tomografia ultrassônica (Figura 3) apresentou maior sensibilidade visual às diferenças entre as matrizes porque a propagação de ondas mecânicas é influenciada por características como densidade, rigidez, presença de vazios, fissuração, umidade e homogeneidade interna. Assim, alterações na compacidade da matriz podem afetar a distribuição dos sinais e o contraste do mapa tomográfico. No entanto, essa leitura deve ser interpretada de forma qualitativa e não como medição direta da porosidade, uma vez que não foram extraídos parâmetros numéricos de velocidade, energia ou atenuação das ondas nesta etapa [12]. Essa tendência é compatível com Morozova *et al.* [3] que relacionam a resposta ultrassônica a alterações de homogeneidade e à presença de vazios no concreto.

Na Figura 4, as imagens obtidas por GPR não permitiram distinguir claramente os concretos com relações água/ligante 0,40 e 0,70. A diferença visual entre as matrizes foi discreta e não possibilitou estabelecer uma hierarquia segura entre os concretos apenas pela inspeção dos radargramas. Esse comportamento pode ser explicado pelo princípio físico do GPR, que depende principalmente de contrastes eletromagnéticos entre materiais com propriedades dielétricas distintas [10]. Segundo Daniels [2], reflexões mais evidentes tendem a ocorrer quando há interfaces bem definidas, como concreto, aço, vazios, delaminações ou mudanças bruscas de permissividade. Como os corpos de prova analisados nesta etapa não possuíam armadura nem descontinuidades internas intencionalmente introduzidas, o contraste eletromagnético entre as duas matrizes cimentícias pode ter sido insuficiente para gerar diferenças visuais claras.

Desta forma, os resultados indicaram que, nas condições avaliadas, a tomografia ultrassônica foi mais adequada para a leitura qualitativa da homogeneidade interna dos concretos, enquanto o GPR apresentou resposta limitada para inferência visual da porosidade. Esse resultado não invalida o uso do GPR em concreto, mas delimita sua aplicação, isto é, o método tende a ser mais eficiente quando há interfaces com maior contraste dielétrico, enquanto a tomografia ultrassônica se mostra mais sensível a alterações associadas à matriz cimentícia [11]. A diferença de sensibilidade observada também converge com Van der Wielen, Lybaert e Grégoire [1] que destacam o caráter complementar das medições por GPR e ultrassom em elementos de concreto.

Síntese Comparativa e Limitações

Acredita-se que as limitações consideradas no presente estudo de caráter primário e exploratório não invalidam os resultados obtidos, mas ao contrário, abre-se a perspectiva de uma gama de possibilidades de estudos porvindouros no campo técnico-científico e tecnológico.

O Quadro 2 apresenta uma síntese das tendências observadas no presente estudo. Foram avaliados quatro corpos de prova, sendo dois para cada relação água/ligante. Por se tratar de um recorte exploratório com duas unidades independentes por condição, os resultados não devem ser interpretados como representativos do comportamento estatístico dos concretos, mas como tendências visuais entre as condições extremas da matriz experimental de origem.

Quadro 2: Síntese técnico-científica das tendências observadas.

Variável	GPR	Tomografia	Interpretação
Relação a/l	Diferenças visuais discretas entre 0,40 e 0,70	Maior alteração visual de nitidez, contraste e uniformidade	A tomografia apresentou maior sensibilidade qualitativa à homogeneidade da matriz
Porosidade esperada	Não foi possível inferir diretamente pela imagem	Indício visual compatível com maior heterogeneidade no concreto 0,70	Resultado qualitativo, dependente de validação quantitativa
Aplicabilidade nesta etapa	Limitada pela ausência de interfaces de alto contraste eletromagnético	Mais adequada para comparação visual da matriz cimentícia	Métodos complementares, não substitutivos

Fonte: os autores.

A primeira limitação é o número reduzido de unidades experimentais, sendo dois corpos de prova por condição. Esse quantitativo decorre do recorte adotado a partir do programa experimental de origem, de cunho exploratório restrito aos concretos

sem armadura e às relações extremas 0,40 e 0,70. Assim, os resultados permitiram comparação qualitativa entre condições, mas não estimativa robusta da variabilidade nem inferência estatística. Estudos posteriores com definição de um abrangente programa experimental poderão contemplar uma gama maior de variedades de tipos de concretos com espectros diferentes de composições e porosidades. Isto está em andamento em novas pesquisas dedicadas.

A segunda limitação está relacionada à ausência de dados numéricos extraídos sistematicamente dos equipamentos. As análises foram realizadas a partir das imagens geradas pelo GPR e pela tomografia ultrassônica, seguindo uma abordagem visual semelhante à empregada em inspeções preliminares de estruturas de concreto realizadas *in loco*. Não foi obtida uma variável quantitativa independente que permitisse o cálculo de médias, medidas de dispersão ou testes inferenciais. A utilização de diferentes regiões de uma mesma imagem como repetições configuraria pseudo replicação, uma vez que a unidade experimental corresponde ao corpo de prova. Uma análise estatística mais abrangente exigiria um delineamento experimental dedicado, com maior número de unidades experimentais independentes, repetição padronizada das aquisições, exportação dos sinais brutos e definição prévia de métricas quantitativas validadas. Isto está previsto a frente em novos estudos. Como essas etapas não integraram o planejamento experimental adotado, os resultados foram analisados qualitativamente, em conformidade com o caráter exploratório e com o objetivo de avaliar a resposta visual das técnicas em condições próximas às aplicações práticas de campo [13].

Uma terceira limitação decorre do próprio princípio físico das técnicas. O GPR depende de contrastes eletromagnéticos para produzir reflexões mais evidentes, sendo tradicionalmente mais sensível à presença de interfaces, armaduras e descontinuidades. Por isso, sua aplicação para inferir diferenças sutis de porosidade em matrizes cimentícias homogêneas tende a ser limitada quando não há extração quantitativa dos sinais. A tomografia ultrassônica, por outro lado, responde melhor a alterações de homogeneidade, rigidez e presença de vazios, mas sua interpretação visual também pode ser influenciada por acoplamento, pressão manual, umidade superficial e parâmetros internos de processamento do equipamento. Essas restrições são coerentes com os princípios discutidos por Daniels [2] para o GPR e por Morozova *et al.* [3] para as respostas ultrassônicas.

A quarta limitação envolve o histórico experimental das amostras. Como os corpos de prova foram reaproveitados do estudo de Silva, Leonel e Oliveira [6], fatores como condição de umidade, idade, armazenamento e exposição prévia podem ter influenciado as respostas eletromagnéticas e ultrassônicas. Essa condição não inviabiliza a comparação, mas exige cautela na extrapolação dos resultados para concretos novos ou para estruturas reais em campo.

Para trabalhos futuros, recomenda-se ampliar o número de corpos de prova independentes por condição, padronizar as repetições de aquisição e extrair parâmetros quantitativos dos sinais, como amplitude e energia do GPR, velocidade e atenuação ultrassônica e índices de contraste. No presente estudo, os resultados

consistiram em imagens processadas, sem extração sistemática dessas variáveis e, a unidade experimental correspondeu ao corpo de prova, com duas unidades por condição. Portanto, a aplicação de testes inferenciais não foi considerada. Uma análise quantitativa exigiria delineamento específico, maior número de unidades independentes e definição prévia dos parâmetros de aquisição, processamento e validação. Além disso, tratamento de imagens por *softwares* específicos não foram utilizados, bem como análises de regiões específicas ou pixels das imagens.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho avaliou, de forma experimental e exploratória, as respostas das técnicas de radar (ondas eletromagnéticas de rádio pelo uso do equipamento *Ground Penetrating Radar* - GPR) e tomografia ultrassônica em corpos de prova de concreto com diferentes porosidades. Dois corpos de prova de a/l 0,40 e dois de a/l 0,70 foram utilizados. As relações água/ligante foram adaptadas como indicativo de matrizes com distintos níveis esperados de compacidade e porosidade. Logo, considera-se que:

- nas condições analisadas, os métodos estudados apresentaram comportamentos distintos, associados aos princípios físicos de cada técnica, como esperado;
- a tomografia ultrassônica mostrou maior sensibilidade qualitativa às diferenças de homogeneidade interna dos concretos estudados nas condições avaliadas;
- as imagens tomográficas dos concretos de relação água/ligante 0,70 apresentaram menor nitidez e menor contraste visual, compatível com matriz cimentícia menos compacta e mais heterogênea. Esse resultado indica que a tomografia ultrassônica apresenta potencial para auxiliar na diferenciação qualitativa de concretos com distintas relações água/ligante, embora não permita, nesta etapa, quantificar diretamente a porosidade;
- o GPR, por sua vez, não permitiu distinguir de forma clara as matrizes analisadas apenas pela inspeção visual das imagens. Esse resultado indica que, para a inferência qualitativa de porosidade em corpos de prova sem interfaces internas de elevado contraste eletromagnético, a resposta do GPR foi limitada;
- a pesquisa evidenciou que a análise visual do GPR, isoladamente, não é adequada para caracterizar a porosidade nas condições avaliadas, indicando a necessidade de parâmetros quantitativos do sinal ou da associação com técnicas mais sensíveis as diferenças na matriz cimentícia;
- nas condições avaliadas, a tomografia ultrassônica apresentou potencialidade para diferenciar qualitativamente as condições a/l 0,40 e 0,70, enquanto o GPR não forneceu distinção visual consistente entre elas. Nenhuma das técnicas quantificou diretamente a porosidade. A contribuição do estudo foi, portanto, delimitar o uso da tomografia como ferramenta de triagem qualitativa e indicar que o GPR, sem interfaces de alto contraste e sem análise quantitativa do sinal, não deve ser utilizado isoladamente para inferir porosidade. Estudos posteriores poderão consolidar ou não este

conhecimento, considerando um maior gama de tipos de concretos e de número de amostras, análises de dados numéricos das imagens obtidas e tratamento das imagens;

- sugere-se que os métodos estudados para análise da porosidade do presente trabalho podem ser de natureza complementar, com diferentes campos de aplicação;
- o principal intento e contribuição do estudo foi sondar, mesmo que de forma exploratória, o alcance do GPR e da tomografia ultrassônica na avaliação qualitativa de concretos com diferentes relações água/ligante. Os resultados indicaram maior potencial da tomografia ultrassônica para leitura qualitativa da matriz cimentícia e evidenciaram a necessidade de cautela no uso isolado do GPR para inferência visual de porosidade;
- acredita-se que as limitações consideradas no presente estudo de caráter primário e exploratório não invalidam os resultados obtidos, mas ao contrário, abre-se a perspectiva de uma gama de possibilidades de estudos porvindouros no campo técnico-científico e tecnológico e
- estudos futuros com maior número de amostras e variáveis e extração de métricas quantitativas, como velocidade ultrassônica, amplitude do sinal, atenuação, dispersão e índices de contraste das imagens possam avançar a fronteira do conhecimento atual. Esses parâmetros permitirão reduzir a subjetividade da interpretação e validar estatisticamente o potencial das técnicas para avaliação indireta da porosidade e da homogeneidade interna de concretos.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

DECLARAÇÃO

Os autores declaram que não utilizaram inteligência artificial – IA, nem tecnologias assistidas por IA no processo de preparação do manuscrito.

REFERÊNCIAS

[1] VAN DER WIELEN, A.; LYBAERT, M.; GRÉGOIRE, C. Combined GPR and ultrasonic tomography measurements for the evaluation of a new concrete pavement. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON ADVANCED GROUND PENETRATING RADAR, 2017. **Proceedings** [...] 2017.

[2] DANIELS, D. J. **Ground penetrating radar**. 2. ed. London: Institution of Engineering and Technology, 2004.

[3] MOROZOVA, N.; SHIBANO, K.; SHIMAMOTO, Y.; THAYFUR, S.; ALVER, N.; SUZUKI, T. Frost damage evaluation of concrete irrigation structure by X-ray CT and AE energy release

trend at the initial loading stage. **Case Studies in Construction Materials**, v. 18, e02088, 2023.

[4] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

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

[6] SILVA, L. A.; LEONEL, A. C. A.; OLIVEIRA, A. M. **Efeito de cloretos e da variação da umidade interna de concretos na resistividade elétrica superficial e volumétrica: influência na especificação de concretos duráveis**. Revista Paranoá, Brasília, v. 18, e53272, 2025.

[7] Silva, Brunno Dourado. **Análise Experimental do Uso do Radar de Penetração na Detecção de Corrosão de Armaduras**. 2026. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) – Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, 2026.

[8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8802:** concreto endurecido — determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

[9] ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D6432-19**: standard guide for using the surface ground penetrating radar method for subsurface investigation. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019.

[10] BUNGEY, J. H. Sub-surface radar testing of concrete: a review. **Construction and Building Materials**, v. 18, n. 1, p. 1–8, 2004.

[11] LAI, W. W.-L.; DÉROBERT, X.; ANNAN, A. P. A review of Ground Penetrating Radar application in civil engineering: a 30-year journey from locating and testing to imaging and diagnosis. **NDT & E International**, v. 96, p. 58–78, 2018.

[12] HAACH, V. G.; RAMIREZ, F. C. Qualitative assessment of concrete by ultrasound tomography. **Construction and Building Materials**, v. 119, p. 61–70, 2016.

[13] ANONI, L. G.; HAACH, V. G.; KHAZANOVICH, L. Image reconstruction in concrete ultrasound tomography: a systematic review. **Construction and Building Materials**, v. 441, art. 137472, 2024.