https://doi.org/10.4322/CBPAT.2022.079

UTILIZAÇÃO DE TOMOGRAFIA DE PULSO ECO ULTRASSÔNICA PARA IDENTIFICAÇÃO DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS NO INTERIOR DE PILARES DE CONCRETO ARMADO

Leonardo Covatti de Oliveira[1]*, Luiz Carlos Pinto da Silva Filho[2]; Alexandre Lorenzi[3]; Lucas Reginatto[3] e Luciani Somensi Lorenzi[2]
*Autor de contato: contato@confienge.com

[1] Doutorando, Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME;UFRGS), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, Brasil
[2] Professor Doutor, Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME;UFRGS), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, Brasil
[3] Pesquisador Doutor, Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME;UFRGS), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, Brasil

RESUMO

Atualmente os Ensaios Não Destrutivos (END) estão sendo cada vez mais utilizados para auxiliar a inspeção de estruturas de concreto armado existentes. Uma das técnicas mais utilizadas é a aferição da velocidade de pulso ultrassônico. Neste trabalho foram inspecionados 5 pilares de concreto armado pré moldadas utilizando pulso eco ultrassônico de ondas cisalhantes para gerar uma tomografia da seção transversal dos pilares. Foi utilizado um grid de 10 cm x 10 cm, totalizando 600 aferições. Através da utilização desta técnica se torna possível observar uma heterogeneidade no registro das velocidades de pulso eco ultrassônico, o que indica a possível presença de não conformidades no interior dos elementos estruturais analisados.
Palavras-chave: pulso utrassônico eco; ensaio não destrutivo; tomografia.

ABSTRACT

Nondestructive testing (NDT) are being used more and more in the construction industry to assist inspections concrete structures. One of the most used techniques is the measurement of the ultrasonic pulse velocity. In this paper, five reinforced concrete pillars were inspected using the ultrasonic echo of shear waves to create a cross section tomography of the pillars. A 10 cm x 10 cm grid was used, totaling 600 measurements. It was possible to observe a heterogeneity of the echo pulse velocities, which indicates the presence of possible pathological manifestations in the structural elements.
Keywords: echo pulso ultrasonique; nondestructive testing, tomography.

1. INTRODUÇÃO

Investigações minimamente invasivas em estruturas de concreto armado a fim de detectar tanto a qualidade quanto possíveis manifestações patológicas vem se tornando cada vez mais frequentes tanto no Brasil quanto no mundo. Quando se inspeciona um elemento estrutural sem causar nenhum dano, seja esta interação física ou química, ela é denominada como sendo um ensaio não destrutivo (END).

Segundo Lorenzi et al. (2019), com a intenção de auxiliar na obtenção de informações acerca das características intrínsecas de uma estrutura real sem que esta seja danificada, foram desenvolvidos os ensaios não destrutivos. Visto que o END tem como característica principal ser um ensaio não invasiva, pode-se afirmar que é uma ferramenta de controle de qualidade de materiais e produtos.

Quando analisadas as manifestações patológicas que podem contribuir para a diminuição da qualidade de estruturas de concreto armado, assim diminuindo a sua vida útil de projeto (VUP) e possivelmente a segurança de utilização, inúmeros fatores contribuem para estes fatos. Os problemas podem surgir tanto na concepção quando na execução de um projeto que não foram observadas as normas técnicas vigentes, assim como a utilização incorreta e negligências nas manutenções dos elementos estruturais (FIGUEIREDO, 2005).

Visto que os elementos estruturais em concreto, quando danificados, reduzem sua capacidade portante, ao serem inspecionados deve sempre que possível e viável ser utilizado métodos que não diminuíam ainda mais esta característica. Para tal, é recomendado a utilização de END. Segundo Al Alam (2016), os métodos de END mais utilizados na construção civil são a esclerometria, termografia e ultrassom.

Apesar de que os ensaios não destrutivos supracitados serem os mais recorrentes, a utilização dos ENDs pode se tornar mais complexa devido a grande heterogeneidade dos materiais utilizados na indústria da construção civil. Logo, para que se tenha uma confiabilidade elevada nos resultados adquiridos pelos ENDs, estes dependerão de operadores qualificados (LORENZI et al., 2019).

Com o intuito de identificar possíveis manifestações patológicas no interior de elementos estruturais de concreto armado de maneira não invasiva, este trabalho tem como objetivo apresentar os resultados das inspeções em cinco pilares utilizando a técnica de pulso utrassônico por eco e indicar ensaios complementares para a completa constatação de possíveis não conformidades.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo a NBR 8802 (2019), um ensaio de onda ultrassônica é caracterizado quando utiliza-se frequências de vibração mecânica acima de 20 kHz. Essa frequências podem ser longitudinais, sendo caracterizadas como ondas de compressão, ou transversais, também denominadas de ondas cisalhantes.

Atualmente estão presentes nas inspeções não destrutivas tanto o ensaio de ultrassom convencional quanto o ensaio de tomografia ultrassônica. O ultrassom convencional tem a característica de ser uma inspeção pontual e geralmente necessita de uma interface entre o elemento estrutural analisado e os transdutores, denominada acoplante. Este acoplante pode ser um gel, graxa mineral, silicone, entre outros e tem a finalidade de melhorar a transmissão da energia ultrassônica (ABNT, 2019). Também existem equipamentos que permitem realizar as mensurações ultrassônicas sem a utilização da interface acoplante, denominados de leituras de ponto de contato seco. Já na tomografia ultrassônica são realizadas "n" leituras no elemento, interpoladas as velocidades em um software específico e gerada uma representação gráfica do plano transversal do elemento ensaiado indicando as regiões de variação da VPU.

2.1 Ultrassom Convencional

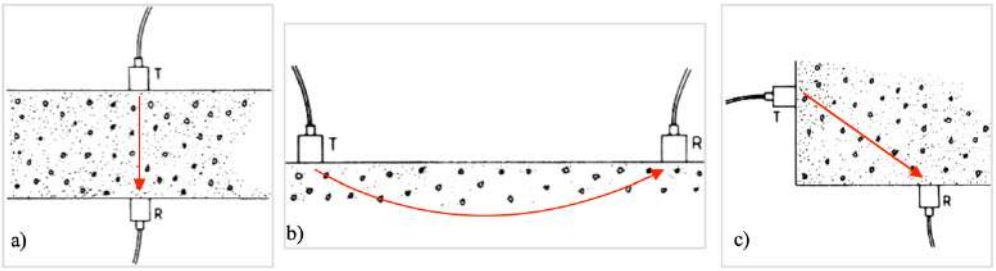
Ao se analisar a qualidade de um concreto, a principal variável de controle atual é a resistência à compressão. Levando em consideração este parâmetro, quanto maior for a compacidade do material, menor quantidade de vazios internos existirão e consequentemente maior será a sua resistência.

Com essas características físicas que são intrínsecas ao elemento de concreto inspecionado, o END de velocidade de propagação de pulso ultrassônico (VPU) pode ser uma estratégia interessante para o monitoramento da qualidade de conservação das estruturas de concreto visto que possibilita o exame da homogeneidade do material, facilitando o diagnóstico de defeitos e o controle das condições de conservação de estruturas durante a sua vida útil (BSI, 1986; LORENZI et al., 2021).

Segundo a NBR 8802 (ABNT, 2019), as possíveis aplicações do ensaio de determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em concreto são estimar a profundidade de fissuras e outras imperfeições, monitorar a variação de propriedades do concreto ao longo do tempo, determinar o módulo de elasticidade dinâmico e avaliar a resistência à compressão do concreto.

O ensaio não destrutivo de velocidade de pulso ultrassônico poderá ser realizado de três maneiras diferentes, sendo elas a transmissão direta, indireta ou semi-direta. Vários pulsos ultrassônicos são emitidos por um transdutor transmissor (T) e as ondas são recebidas por um transdutor receptor (R), apresentados na Figura 1.

Figura 1 - Ensaio não destrutivo de velocidade de pulso ultrassônico a) direto; b) indireto; c) semidireto



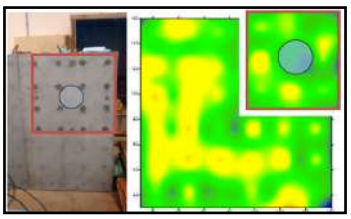
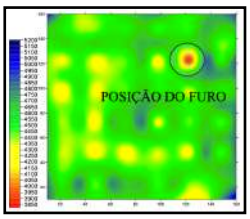
No ensaio referente à transmissão direta (Figura 1a) os transdutores são posicionados em faces opostas do elemento estrutural de concreto a ser ensaiado e é o mais recomendado na determinação da velocidade de propagação de ondas (ABNT, 2019).

Quando os transdutores são posicionados na mesma face (Figura 1b), esse método é denominado como transmissão indireta. Nesta configuração é importante que as distâncias entre os transdutores se mantenham constantes para a determinação correta da VPU (ABNT, 2019).

Mas se não houver a possibilidade de acesso a duas faces do elemento estrutural de concreto ou a face a ser inspecionada não possuir comprimento suficiente para o ensaio indireto, poderá ser utilizado o método semidireto (Figura 1c) para determinar a VPU. A distancia entre os transdutores será mensurada através de um cálculo trigonométrico, sendo esta a hipotenusa.
Quando o elemento estrutural de concreto é ensaiado utilizando o ultrassom em regiões com alguma manifestação patológica como vazios causados pela corrosão de amadura, segregação devido falhas de compactação ou danos externos, a VPU nessas regiões são diminuídas. Se o concreto não tiver atingido a sua maturidade ou apresentar alguma deterioração, a VPU irá aumentar e diminuir, respectivamente, segundo a BS 1881-203 (1986).

Estudos realizados por Lorenzi, Chies e Silva Filho (2017) comprovaram o exposto pela BS 1881-203 (1986). Os pesquisadores realizaram um programa experimental amplo para detectar falhas em concreto utilizando VPU. Foram realizados dois tipos de ensaios onde o primeiro ensaio consistia em detectar falhas de concretagem em conjunto com vazios não-aparentes utilizando esferas de isopor de diferentes diâmetros concretadas no interior da parede de concreto não armada e o segundo ensaio pretendia detectar perfurações na face oposta às leituras com diâmetro de 0,15 m e profundidades entre 0,15 m à 0,55 m. Os transdutores foram posicionados de maneira indireta (Figura 2a) e as leituras da velocidade do pulso ultrassônico foram realizadas em grids de 25 cm x 25 cm, 50 cm x 50 cm e 75 cm x 75 cm. Segundo os pesquisadores, o primeiro ensaio não obteve resultados satisfatórios mesmo com o grid refinado de 25x25, visto que o isopor inserido no interior do corpo de prova não teve uma boa similaridade com defeitos usuais em campo. Porém, foi possível apresentar graficamente a diferença entre regiões do corpo de prova sem furo (Figura 2b) e contendo perfuração (Figura 2c), onde a região em vermelho obteve uma diferença significativa na velocidade de pulso ultrassônico (3850 m/s) quando comparado à região integra (entre 4000 à 5200 m/s) do corpo de prova.

Figura 2 - Ensaio não destrutivo de interpolação de velocidades de pulsos ultrassônicos em parede de 1,70 m x 170 m x 0,6 m a) leitura indireta; b) resultado gráfico das leituras antes do furo, ensaio 2; c) resultado gráfico das leitura depois do furo, ensaio 2

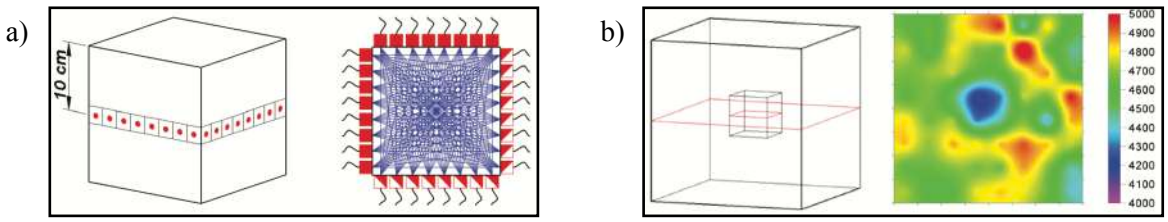
a)  b)  c) 

Fonte: Adaptado de Lorenzi, Chies e Silva Filho (2017)

2.2 Tomografia Ultrassônica em Concreto

Em etimologia da palavra tomografia é oriunda do grego antigo e é a junção de duas outras palavras sendo elas tómos (τόμος), que significa fatia ou corte, e gráfo (γράφω), que significa escrita ou desenho. Os pesquisadores Perlin e Pinto (2013) visando detectar objetos no interior de corpos de prova (CP) cúbicos com 20 cm de lado, moldados em laboratório e utilizando a técnica de tomografia ultrassônica em concreto, com apenas dois transdutores de 200 kHz sendo um transmissor e o outros receptor, realizaram inúmeras leituras diretas, com malha de leitura de 2,5 cm, em um região pré determinada dos CPs (Figura 3a). Estes CPs analisados, para que fossem possíveis as utilizações deste método, tiveram que ser realizadas leituras ultrassônicas em todas as faces (Figura 3a) e utilizar um software denominado TUCon para compilação das leituras e resolução de equações lineares pelo método de Cimmino Otimizado, oriundas destas aferições de VUP. Por fim, os pesquisadores conseguiram detectar os corpos estranhos de EPS no interior dos corpos de concreto simples (Figura 3b).

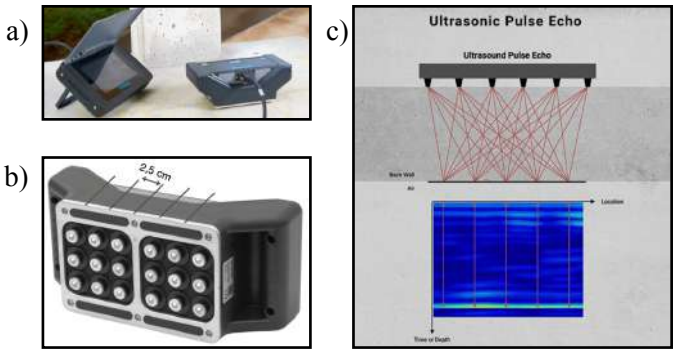
Figura 3 - a) Leituras de ultrassom realizadas em uma determinada altura de um corpo de prova (CP) de concreto contendo um objeto de menor densidade no interior; b) tomografia ultrassônica do CP



Fonte: Adaptado de Perlin e Pinto (2013)

Segundo Abreu Filho (2020), atualmente já existem equipamentos que realizam o ensaio de pulso ultrassônico em uma face sem necessidade de acessar as faces opostas e adjacentes como, por exemplo, o equipamento da marca Proceq modelo PUNDIT PL-200PE (Figura 4a). Esse equipamento emite vários pulsos de eco ultrassônicos através de seus transdutores de onda de cisalhamento que são recebidos pelos transdutores receptores (Figura 4c). No total são nove transdutores emissores do lado esquerdo e nove transdutores receptores do lado direito (Figura 4b).

Figura 4 - a) Equipamento de tomografia ultrassônica por pulso eco; b) detalhe dos transdutores; c) esquema de funcionamento do ultrassom tipo scanner PD8050



Fonte: Adaptado de Proceq (2022)

É calculada a velocidade de cada pulso ultrassônico realizado pelo método de eco através da equação 1:

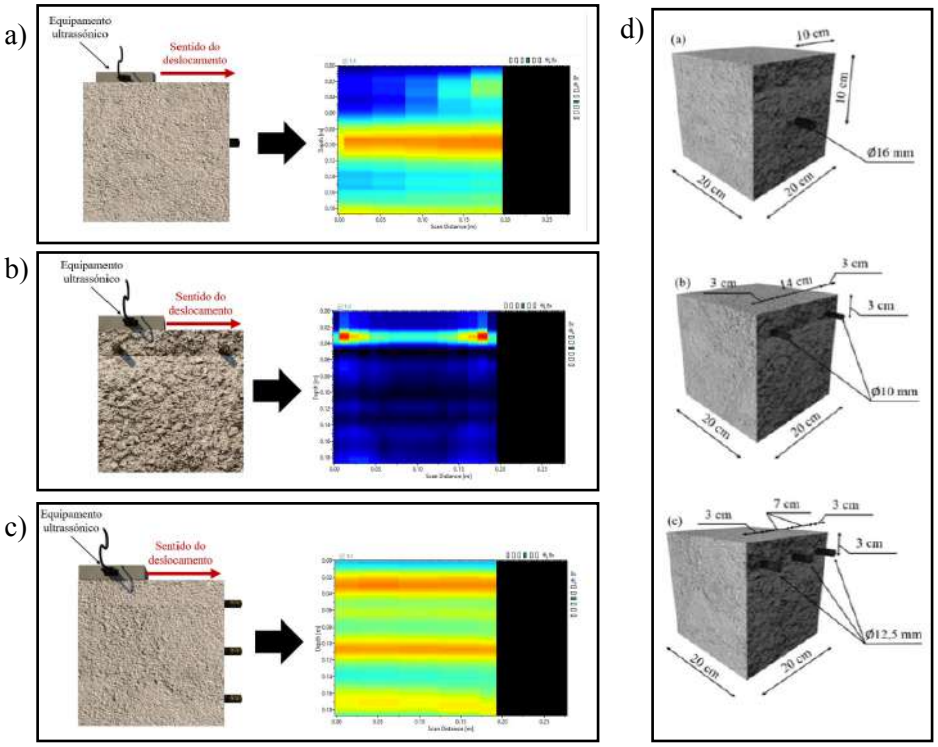
$$V = \frac{2.d}{t} \quad (1)$$

Onde:

V = velocidade do pulso ultrassônico (m/s);
d = distância dos transdutores até a face oposta de ensaio (m);
t = tempo de transmissão (s);

Abreu Filho (2020) ensaiou três corpos de prova cúbicos de 20 cm x 20 cmx 20 cm contendo diferentes quantidades de barras de aço no interior (Figura 5a, 5b, 5c), com diferentes profundidades. A profundidade, o diâmetro e espaçamento das barras de aço nos CPs, quando existir, estão apresentados na Figura 5d.

Figura 5 - Detecção de barras de aço no interior dos CPs através de tomografia utilizando VPU de a) uma barra; b) duas barras; c) três barras; d) detalhes dos CPs ensaiados



Fonte: Adaptado de Abreu Filho (2020)

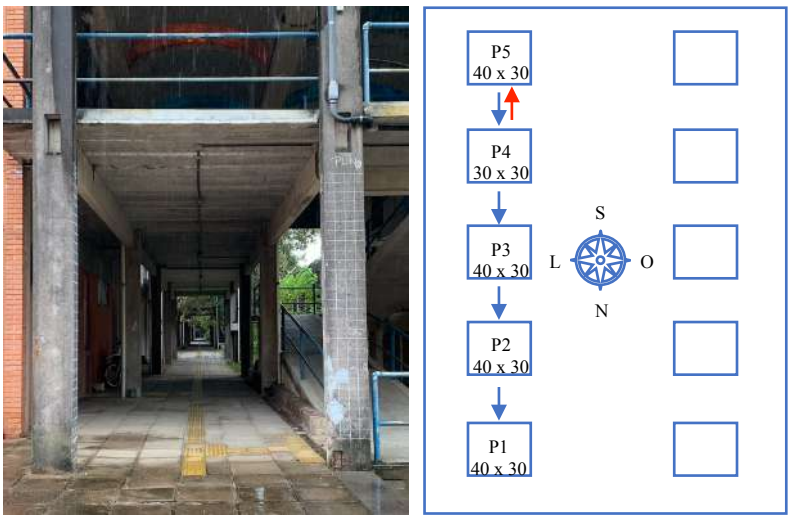
As barras de aço detectadas na Figura 5 pode ser consideradas como descontinuidades ou defeitos no elemento inspecionado de concreto. Apesar de não informar qual o grid do ensaio para aferir as VPU, foi possível detectar as barras no interior juntamente com a representação gráfica utilizando o método de B-Scan do equipamento e software do próprio fabricante.

Segundo Jiang (2020), a reflexão das ondas eco de cisalhamento emitidas pelos transdutores emissores é de 99% e 43% quando se defronta com vazios e elemento metálico, respectivamente, presentes no interior do elemento de concreto inspecionado.

3. MATERIAIS E MÉTODO

O ensaio de tomografia ultrassônica foi realizado pela equipe do LEME/UFRGS em 5 pilares pré moldados distintos. Cada pilar possui uma seção transversal de 40 cm x 30 cm e foram ensaiados contendo um grid de 10 cm x 10 cm, na face norte ou sul, tendo início das leituras a partir da base do elemento estrutural até uma altura 3 metros. Na Figura 6 são apresentados uma visão geral dos pilares juntamente com um croqui em planta demonstrando as locações e dimensões dos elementos estruturais.

Figura 6 - a) Vista da face norte dos pilares ensaiados; b) croqui da locação dos pilares em planta, sem escala, com indicação da face de aplicação do pulso eco ultrassônico.



Fonte: Autores (2022)

Em cada pilar foram realizadas 120 leituras, totalizando 600 aferições de pulso eco ultrassônico. Não foi necessário realizar nenhuma intervenção na superfície dos pilares e nem o uso de acoplante nas aferições, visto que o equipamento utilizado possui transdutores de contato seco e conseguem se ajustar à imperfeições superficiais do elemento inspecionado em até 7 mm. Na Tabela 1 são apresentadas algumas informações dos transdutores.

Tabela 1 – Informações técnicas sobre os transdutores utilizado

Frequência e dimensões	50 kHz; 2 x 25 cm²
Comprimento de onda	50 mm (VPU utilizado de 2500 m/s)
Profundidade de penetração	500 mm, podendo chegar a 1000 mm
Objeto detectável mínimo	cilindro de ar de 30 mm
Tipo de onda	cisalhante

Fonte: Proceq (2022)

As inspeções foram realizadas utilizando o modo “varredura de área” do software do próprio equipamento. Neste modo de operação, o equipamento registra automaticamente as leituras da VPU em cada grid de 10 cm x 10 cm e apresenta instantaneamente um gráfico 2D, onde cada cor do gráfico representa uma velocidade de pulso eco aferida no local.

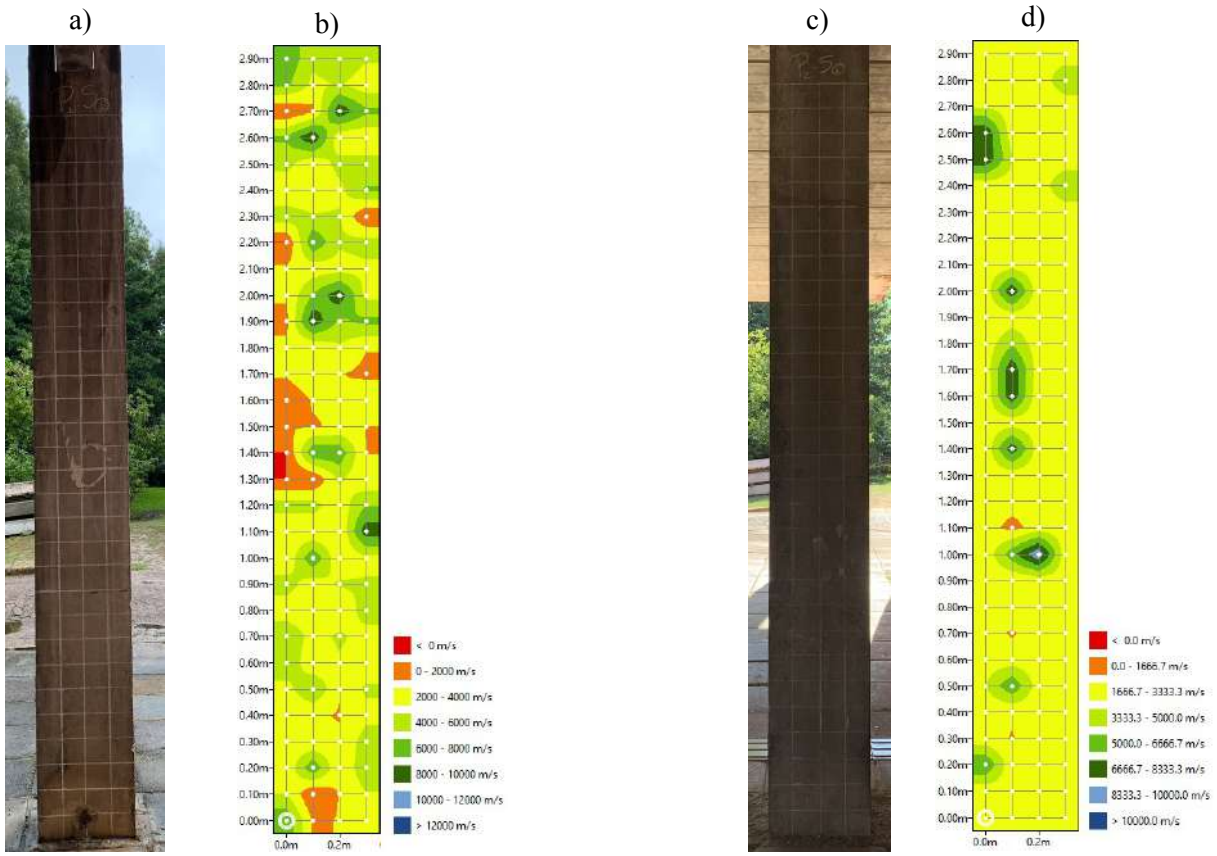
4. RESULTADOS

Serão apresentados agrupados os pilares que foram ensaiados na face sul, juntamente com uma breve descrição do estado fisico no instante da inspeção. Já o pilar que foi inspecionado na face norte será apresentado separadamente contendo também uma breve descrição do seu estado.

4.1 PILAR 1 E 2

Foram observadas manifestações patológicas de corrosão de armadura tanto na base quanto nas arestas do pilar 1. Também neste mesmo elemento estrutural foi observado que existem regiões onde já houveram recuperações devido corrosão e perda de seção transversal (Figura 7a). Já no pilar 2 foram observadas fissuras tanto no lado esquerdo quanto no centro do pilar (Figura 7c).

Figura 7 - a) Face sul do pilar 1 com grid de inspeção 10x10; b) resultado da tomografia ultrassônica por pulso eco do pilar 1; c) Face sul do pilar 2 com grid de inspeção 10x10; d) resultado da tomografia ultrassônica por pulso eco do pilar 2



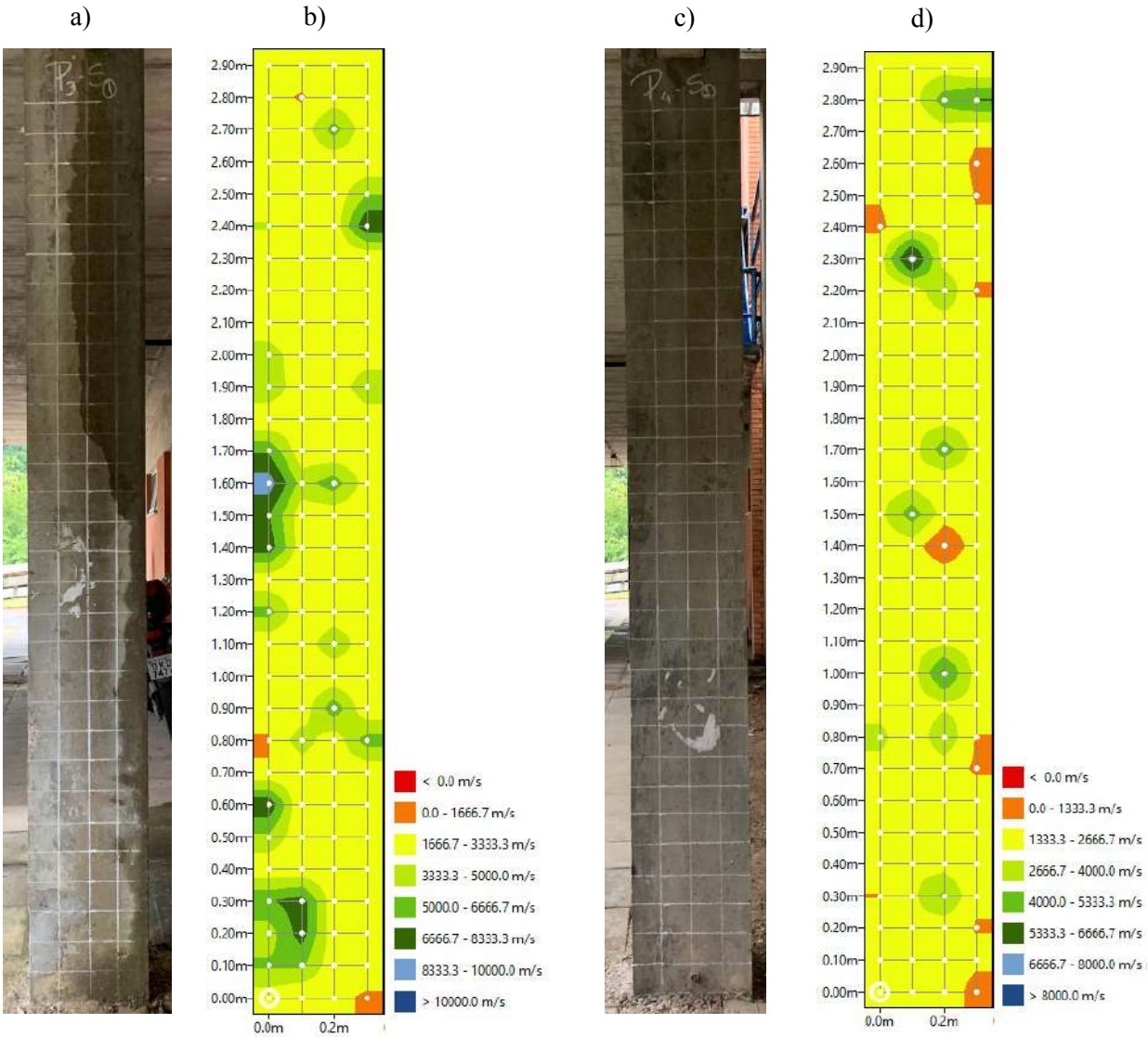
Fonte: Autores (2022)

Conforme a normal BS 1881-203 (1986), quando houver uma variação grande na velocidade de propagação da onda ultrassônica no concreto, maior será a probabilidade de deteção de alguma manifestação patológica como expansão da barra de aço devido processo corrosivo do aço, delaminação, vazios, entre outros. Isto é confirmado quando analisado a parte inferior central do pilar 1 que está com desplacamento de concreto devido a corrosão de armadura e é apontado na sua respectiva imagem tomográfica. Já no pilar 2 são destacadas as regiões onde podem existir possíveis manifestações patológicas no interior do elemento estrutural.

4.2 PILAR 3 E 4

Foi observado que o pilar 3 já havia sofria reparos devido a corrosão de armadura tanto na base quando na altura média (Figura 8a). Também foi observado que em dias de chuva, incide um grande volume de água na face leste do pilar devido a falhas no escoamento pluvial do telhado. No Pilar 4, foram observados reparos estruturais ao longo do pilar e também a existência de uma tubulação na base do pilar (Figura 8d).

Figura 8 - a) Face sul do pilar 3 e com grid de inspeção 10x10; b) resultado da tomografia ultrassônica por pulso eco do pilar 3; c) Face sul do pilar 4 com grid de inspeção 10x10; d) resultado da tomografia ultrassônica por pulso eco do pilar 4



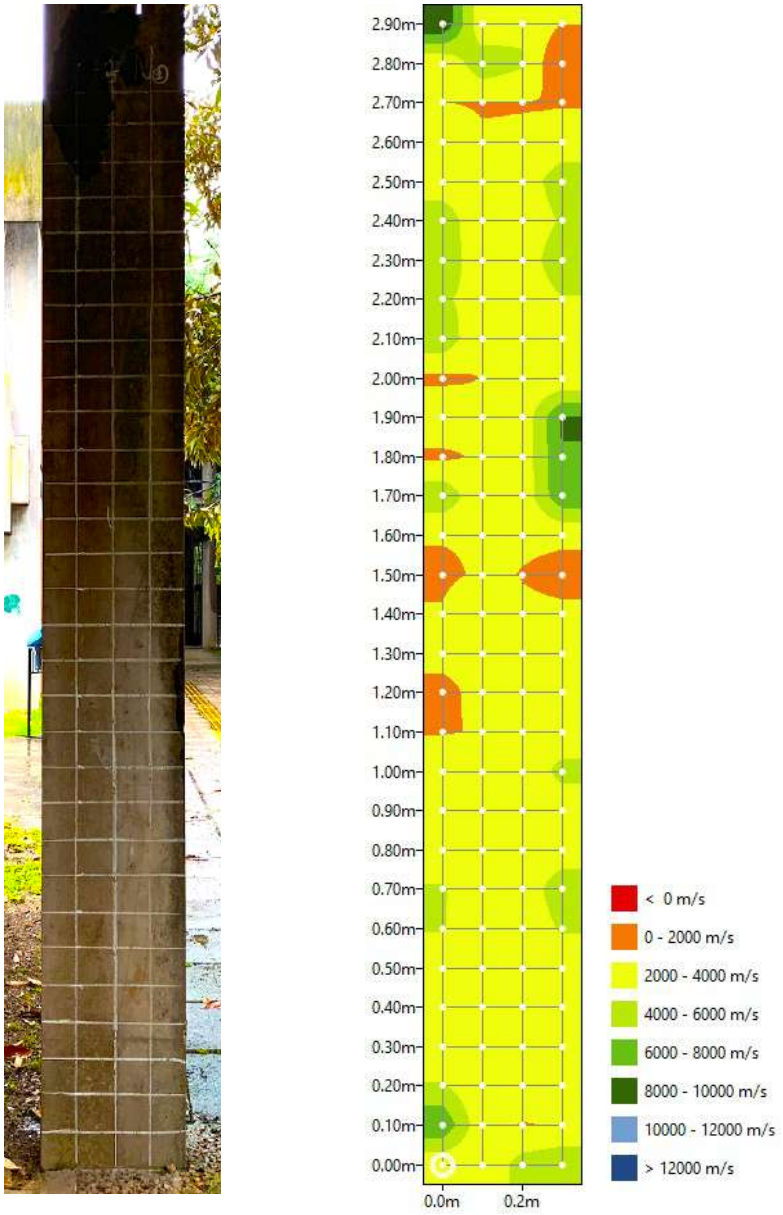
Fonte: Autores (2022)

Foi possível observar na tomografia a recuperação estrutural da face inferior lateral esquerda do pilar 3. A tubulação na base do pilar 4 não foi detectada no ensaio pois estava paralela ao plano de inspeção utilizando o pulso eco ultrassônico. Ambos os pilares foram ensaiados na face sul visto que existe uma tubulação de escoamento do água pluvial instalada na face norte destes elementos estruturais.

4.3 PILAR 5

O Pilar 5 foi inspecionado na face norte (Figura 9a) visto que existe uma tubulação de drenagem de água pluvial instalado na face sul. Também foi observado que nas faces oeste, sul e leste há presença de criação biótica na superfície.

Figura 9 - a) Face norte do pilar 5 e com grid de inspeção 10x10; b) resultado da tomografia ultrassônica por pulso eco do pilar 5



Fonte: Autores (2022)

Foi possível observar na tomografia uma heterogeneidade no pilar 5 inspecionado que indica a possível existência de manifestações patológicas ocultas. Para a real confirmação necessitará de novos ensaios complementares como resistividade do concreto, pacometria e potencial de corrosão. Esses ensaios terão uma maior eficiência se realizados nas regiões em destaque apontadas na imagem tomográfica.

5. CONCLUSÃO

Os ensaios não destrutivos estão cada vez mais presentes nas inspeções de estruturas de concreto armado nos dias atuais. Os ensaios utilizados com maior frequência para a detecção de possíveis manifestações patológicas são a esclerometria, termografia e ultrassom.

A técnica de inspeção de ultrassom exige profissionais especializados e treinados para que seja possível o ajuste e calibração do equipamento, assim como a mensuração, interpretação e compreensão dos dados de *input* e *output*. A heterogeneidade da estrutura de concreto armado torna esse ensaio mais complexo de ser analisado, visto que tanto o aço quanto agregados, nichos de concretagens, segregação dos agregados, entre outras manifestações patológicas podem existir no interior do elemento inspecionado.

Não obstante, existem variáveis de contorno no ensaio de ultrassom que devem ser observadas e escolhidas pelo operador como o tipo de transdutor utilizar, qual a frequência, interpretação dos sinais captados pelo transdutor receptor, entre outros.

Neste trabalho foram realizadas inspeções de 5 pilares de concreto armado executados no campus da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela equipe de pesquisadores do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) utilizando a tomografia de pulso eco ultrassônico. Foi utilizado um transdutor de pulso eco de ondas cisalhantes, com frequência de 50 kHz e ponto de contato seco com a estrutura. Cada pilar foi ensaiado na maior face com o intuito de evitar o efeito parede. O grid de inspeção utilizado foi de 10 cm por 10 cm, totalizando 120 pontos por pilar e 600 pontos no total.

Os resultados das tomografias nos pilares apresentaram zonas de heterogeneidade nas velocidades aferidas, demostrando que podem existir manifestações patológicas ocultas. Para identificar quais são essas possíveis manifestações patológicas se fará necessário a realização de ensaios complementares como resistividade do concreto, pacometria e potencial de corrosão. Esses ensaios ajudarão a distinguir se os pontos de velocidades diferentes são devido à presença de armadura e expansão por causa de corrosão ou há presença de vazios como nichos de concretagem, segregação, entre outros.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 8802: Concreto Endurecido – Determinação da Velocidade de Propagação da Onda Ultrassônica: Método de Ensaio. Rio de Janeiro: 2019.

AL ALAM, F. W. **Potencialidade da termografia na detecção de manifestações patológicas associadas à umidade acidental**. 2016. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, UFPel, Pelotas, 2016.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION, **BSI 1881 - Part 203, Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete,** (London, UK: BSI, 1986), 20 p, 1986.

Figueiredo, E. P., **Inspeção e Diagnóstico de Estruturas de Concreto com Problemas de Resistência**. *In*: Isaia, G.C.. "Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações", IBRACON, cap. 33, pp. 985-1015. São Paulo, 2005.

ABREU FILHO, Marco Antonio Santiago. **A utilização de equipamento ultrassónico na caracterização mecânica de elementos em betão armado**. 2020. Tese de Mestrado - Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2020.

LORENZI, A., CHIES, J. A., ADAMATTI, D. S., SILVA FILHO, L. C. P., **Avaliação da capacidade de detecção de falhas no concreto através do ensaio ultrassônico**, Revista ALCONPAT, 7 (3), pp. 286-301, DOI: http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i3.127, 2017.

LORENZI, A., REGINATTO, L. A., CAETANO, L. F., KLEIN, D. L., SILVA FILHO, L. C. P., **Inspeção de obras através da aplicação de ensaios não destrutivos**. *In*: XV Congresso Latino-americano de Patologia de Construcción y XVII Congresso de Control de Calidad en la Construcción, CONPAT, vol. 2, Chiapas, México, 2019.

LORENZI, L. S., REGINATTO, L. A., LORENZI, A., SILVA FILHO, L. C. P., **Monitoramento de estruturas de concreto armado através de ensaios ultrassônicos**. Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 7, p. 72942-72960, 2021.

PERLIN, L. P., PINTO, R. C. A., **Tomografia ultrassônica em concreto**. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, v. 6, n. 2, p. 246-269, 2013.

JIANG, A., **Proceq Webinar: Introduction and Overview of Ultrasonic Pulse Echo method for concrete NDT**. Youtube, 05 de Maio de 2020. Disponível em: www.youtube.com/watch?v=gb1F3scU0sM (acesso em: março de 2022).

www.proceq.com (acesso em: março de 2022).