Revista ALCONPAT
www.revistaalconpat.org
eISSN 2007-6835
Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción

Estudo, do ponto de vista da patologia, utilizando ensaios de ultrassom aplicados a estruturas em construção

G. A. Ergueta[1]*, M. V. Quino[1]
* Autor de Contato: gustavo.ergueta@gmail.com
DOI: https://doi.org/10.21041/ra.v14i1.715

Recebido: 04/11/2023 | Correções recebidas: 19/12/2023 | Aceito: 22/12/2023 | Publicado: 01/01/2024

RESUMO

O estudo discute os resultados da avaliação de estruturas de concreto armado usando ensaios não destrutivos (END) baseados na velocidade de pulso ultrassônico (VPU), com o objetivo de determinar a integridade e uniformidade do concreto, além de detectar possíveis anomalias causadas durante a construção ou por fatores externos. Os resultados mostraram a distribuição de danos em uma estrutura afetada pelo fogo, a medição da profundidade de fissuras em um elemento de concreto e a uniformidade em diferentes componentes estruturais, o que permitiu posteriormente elaborar o procedimento de reabilitação estrutural correspondente. O estudo demonstra a eficácia dos END e da VPU na avaliação de estruturas de concreto armado, possibilitando tomada de decisões imediatas para reparo e reabilitação.

Palavras-chave: ensaios não destrutivos; velocidade de pulso ultrassônico; anomalias; reabilitação; concreto.

Citar como: Ergueta, G. A.; Quino, M. V. (2024), *"Estudo, do ponto de vista da patologia, utilizando ensaios de ultrassom aplicados a estruturas em construção"*, Revista ALCONPAT, 14 (1), pp. 82 – 95, DOI: https://doi.org/10.21041/ra.v14i1.715

[1] Steel Concrete Test, La Paz, Bolivia.

Contribuição de cada autor
Neste trabalho, o autor G. A. Ergueta contribuiu com a ideia original em 50%, redação do trabalho em 60%, coleta de dados em 60% e discussão dos resultados em 40%. O autor M. V. Quino contribuiu com a ideia original em 50%, redação do trabalho em 40%, coleta de dados em 40% e discussão dos resultados em 60%.

Licença Creative Commons
Copyright (2022) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 (CC BY 4.0).

Discussões e correções pós-publicação
Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número de 2024, desde que a informação seja recebida antes do encerramento do segundo número de 2024.

© 2023 ALCONPAT Internacional

Pathological study using ultrasound tests applied to structures under construction

ABSTRACT

The study discuss the results of the evaluation of reinforced concrete structures using non-destructive testing (NDT) based on ultrasonic pulse velocity (UPV) with the objective of determining the integrity and uniformity of the concrete, as well as detecting possible anomalies caused during construction or by external factors. The results showed the distribution of damage in a structure affected by fire, the measurement of cracking depth in a concrete element and the uniformity in different structural components, which subsequently allowed the development of the corresponding structural rehabilitation procedure. The study demonstrates the effectiveness of NDT and VPU in the evaluation of reinforced concrete structures, allowing immediate repair and rehabilitation decisions to be made.

Keywords: non-destructive testing; ultrasonic pulse velocity; anomalies, rehabilitation; concrete.

Estudio patológico empleando ensayos de ultrasonido aplicado a estructuras en construcción

RESUMEN (letras de 13 pts. Times New Roman, negritas)

El estudio discute los resultados de la evaluación de estructuras de hormigón armado utilizando ensayos no destructivos (END) basados en la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) con el objetivo de determinar la integridad y uniformidad del hormigón, así como detectar posibles anomalías causadas durante la construcción o por factores externos. Los resultados mostraron la distribución de daños en una estructura afectada por el fuego, la medición de la profundidad de fisuración en un elemento de hormigón y la uniformidad en diferentes componentes estructurales, que posteriormente permitieron elaborar el procedimiento de rehabilitación estructural correspondiente. El estudio demuestra la eficacia de los END y la VPU en la evaluación de estructuras de hormigón armado, permitiendo tomar decisiones inmediatas de reparación y rehabilitación.

Palabras clave: ensayos no destructivos; velocidad de pulso ultrasónico; anomalías; rehabilitación; hormigón.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

Dentro do estudo, do ponto de vista da patologia, em estruturas de concreto armado, o uso de ensaios não destrutivos (END) tornou-se uma ferramenta útil para avaliar a qualidade e o estado das edificações. O avanço tecnológico nesse campo permitiu obter resultados confiáveis praticamente em tempo real, por meio do uso de equipamentos que já incorporam inteligência artificial (IA) para o processamento de dados.

Os resultados desses estudos e a detecção precoce de anomalias nas estruturas, antes que danos visíveis se manifestem, possibilitam reduzir significativamente os custos de reparação e aumentar a vida útil, diminuindo o deterioro do concreto e o risco para a integridade da estrutura.

A origem dessas anomalias pode ocorrer durante a fase de construção da estrutura devido a um controle insuficiente, ou ao longo de sua vida útil, devido à falta de um plano de manutenção adequado. Por essa razão, a avaliação estrutural tornou-se uma boa prática para garantir a segurança e estabilidade das edificações.

Dentro dos END, o ensaio de velocidade de pulso ultrassônico (VPU) pode ser empregado para determinar a uniformidade do concreto. Este método é baseado na premissa de que uma alteração na VPU medida através do elemento está fundamentalmente relacionada a uma mudança no módulo elástico do concreto. Esse método permite obter informações em toda a espessura do elemento, ao contrário de outros métodos que só permitem avaliar a superfície. No entanto, a heterogeneidade do concreto deve ser considerada de maneira especial.

O uso adequado de múltiplos equipamentos pode evitar distorções na leitura dos valores de VPU. Além disso, os setores a serem avaliados devem ser analisados previamente com um pacômetro para identificar as zonas com presença de armaduras de reforço.

Este trabalho busca compartilhar os resultados obtidos mediante a aplicação de diferentes métodos de VPU em casos reais, com o objetivo de determinar o nível de dano em estruturas de concreto armado avaliadas na fase de construção.

2. AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO MEDIANTE A ENSAIOS VPU

O principal objetivo das avaliações está relacionado à determinação do grau de integridade e uniformidade do concreto afetado por fatores externos originados na etapa de construção ou ações externas que podem diminuir suas características mecânicas.

A possibilidade de contar com essa informação durante a execução de uma obra permite tomar decisões imediatas relacionadas à restituição dos elementos danificados ou à reabilitação estrutural deles. Para os casos propostos, todas as estruturas foram reabilitadas após sua avaliação, uma vez que os resultados obtidos confirmaram que os danos existentes, uma vez reabilitada a estrutura, não afetavam sua capacidade estrutural.

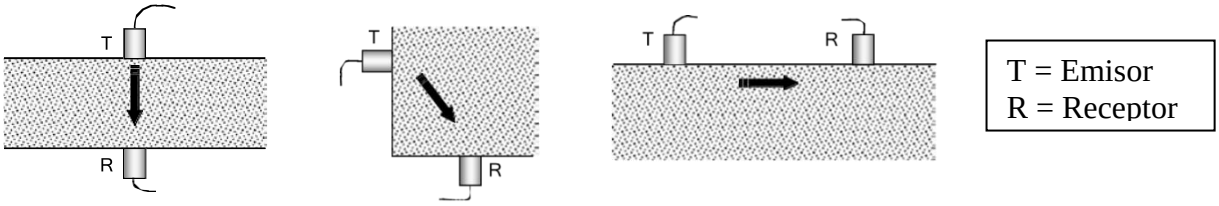
A metodologia utilizada para a coleta de dados de VPU, assim como os documentos de referência para a análise de resultados, estão descritos neste trabalho.

Conforme estabelecido no item 5.2 da norma ASTM C 597-02, o ensaio de VPU é válido para avaliar a uniformidade e a qualidade relativa do concreto, bem como para detectar vazios e fissuras nas estruturas. Além disso, permite avaliar a eficácia dos reparos realizados nas fissuras. Também é útil para indicar mudanças nas propriedades do concreto e na avaliação de estruturas, permitindo estimar a gravidade do deterioro causado pelas fissuras.

Para a avaliação por meio de leituras de VPU, são utilizadas três configurações possíveis dos transdutores, conforme descrito por Naik, Malhotra e Popovics (2004): transmissão direta, Figura 1(a); transmissão semidireta, Figura 1(b); e transmissão indireta ou superficial, Figura 1(c).

O método de transmissão direta é o mais desejável e satisfatório, porque com essa disposição,

transmite-se e recebe-se a máxima energia do impulso. O método de transmissão semidireta também pode ser utilizado de maneira bastante satisfatória; no entanto, é preciso ter cuidado para que os transdutores não estejam muito separados; caso contrário, o pulso transmitido pode ser atenuado, e um sinal de pulso pode não ser detectado. Este método é útil para evitar concentrações de armaduras. O método indireto ou de transmissão superficial é o menos satisfatório, porque a amplitude do sinal recebido é significativamente menor do que a recebida pelo método de transmissão direta. Este método também é mais propenso a erros, e pode ser necessário um procedimento especial para determinar a velocidade do impulso.



(a) Direto (b) Semidireto (c) Indireto

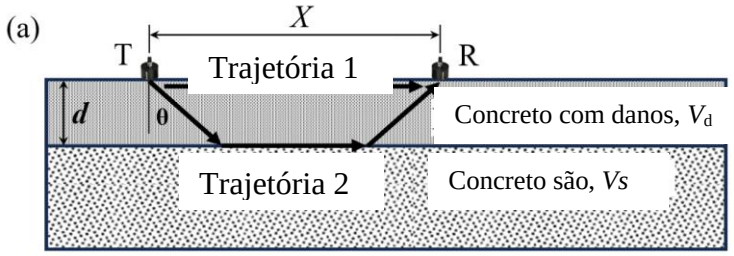
Figura 1. Configurações de medição da VPU. (a) Método direto. (b) Método semidireto. (c) Método indireto superficial. Naik, Malhotra y Popovics (2004)

Com base no exposto, uma classificação do concreto conforme sua VPU, amplamente utilizada, é a elaborada por Feldman (1977).

Tabla 1. Classificação do concreto segundo sua velocidade ultrassônica
CBD-187 Non-Destructive Testing of Concrete

CLASIFICAÇÃO DO CONCRETO SEGUNDO VELOCIDADE ULTRASSÔNICA	
Velocidade ultrassônica (m/s)	**Classificação do concreto**
V > 4575	Excelente
4575 > V > 3660	Bom
3660 > V > 3050	Questionável
3050 > V > 2135	Pobre
V < 2135	Muito pobre

A classificação do concreto de acordo com sua VPU, amplamente utilizada, é aquela elaborada por Feldman (1977) com base no exposto.



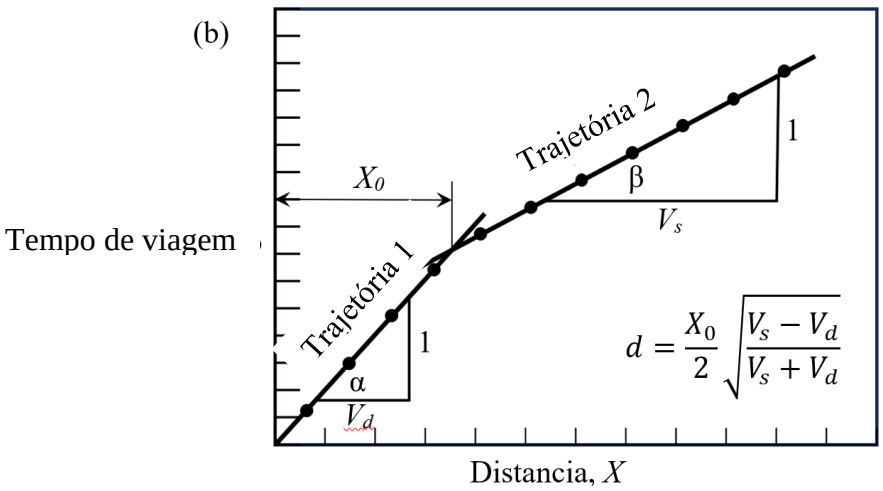


Figura 2. (a) Trajetórias de ondas para ensaios ultrassônicos na superfície do concreto com camada superficial danificada. (b) Tempo de percurso em função da distância entre emissor e receptor. Retirado de ACI 228.2R-13.

Além disso, Naik, Malhotra e Popovics (2004) afirmam que o método da VPU é eficaz para caracterizar as fissuras superficiais (Figura 3 e equação 1):

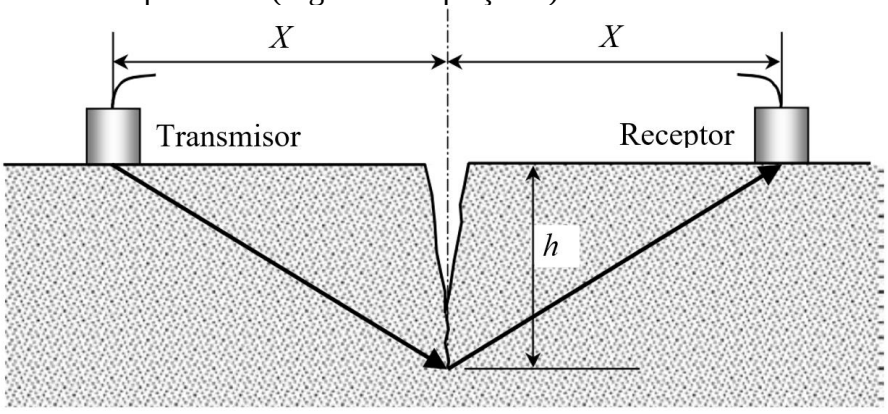


Figura 3. Determinação da profundidade de fissuração. (Naik, Malhotra y Popovics 2004).

$$h = \frac{X}{T_2}\sqrt{T_1^2 - T_2^2} \quad [m] \qquad (1)$$

2.1 Equipamentos utilizados.

Os equipamentos utilizados para as avaliações mencionadas anteriormente são:

2.1.1 Detector de armaduras.

A detecção de armaduras foi realizada por meio de um pacômetro computadorizado Proceq Profometer 650 IA, com capacidade para detectar armaduras de reforço no concreto e estimar seu diâmetro, utilizando para isso a tecnologia de indução de pulsos de corrente de redemoinho.

2.1.2 Equipe de ultrassom.

As leituras de VPU foram realizadas usando um equipamento Proceq Pundit 200, que permite avaliar a uniformidade do concreto, bem como determinar a profundidade das fissuras por meio de transdutores de ondas longitudinais.

3. RESULTADOS EMPLEMENTANDO VPU NA AVALIAÇÃO DAS ESTRUTURAS

Os três casos práticos de avaliações de estruturas de concreto armado por meio de ensaios de VPU foram realizados em diferentes projetos em La Paz - Bolívia; projetos que estavam na fase de construção.

3.1 Avaliação da estrutura solicitada apenas pela ação do fogo.

A estrutura corresponde a um edifício de 13 níveis conforme o esquema da Figura 4:

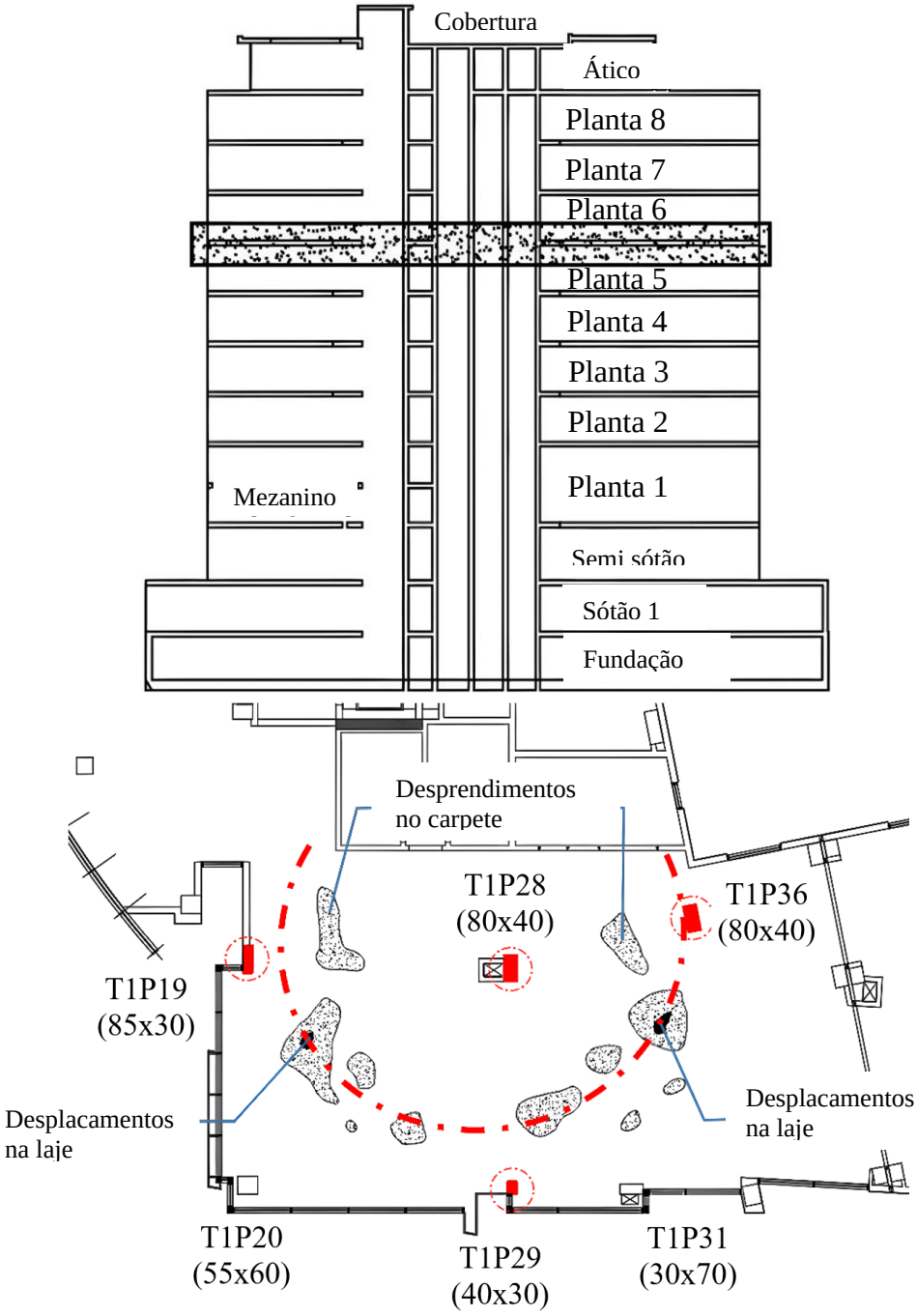


Figura 4. Esquema do edifício e danos a laje.

Na Figura 4, pode-se observar a distribuição dos danos na laje resultantes da ação do fogo, apresentando uma configuração radial com centro aproximado no pilar T1P28. Essa situação confirma que o pilar e o ábaco correspondentes a essa localização são os elementos com maior dano superficial, enquanto os elementos T1P20 e T1P31 não apresentam dano visual devido à maior distância.

Foram realizadas leituras diretas e indiretas de VPU no pilar mais afetada (T1P28) com o objetivo de avaliar a uniformidade do concreto em toda a espessura do elemento, bem como determinar a espessura do concreto danificado pela ação do fogo.

Na Figura 5(a), é possível observar o estado do pilar após o incêndio, a Figura 5(b) representa a VPU na face maior através de toda a espessura do pilar, e a Figura 5(c) corresponde às leituras de velocidade ao longo das faces maiores do pilar.

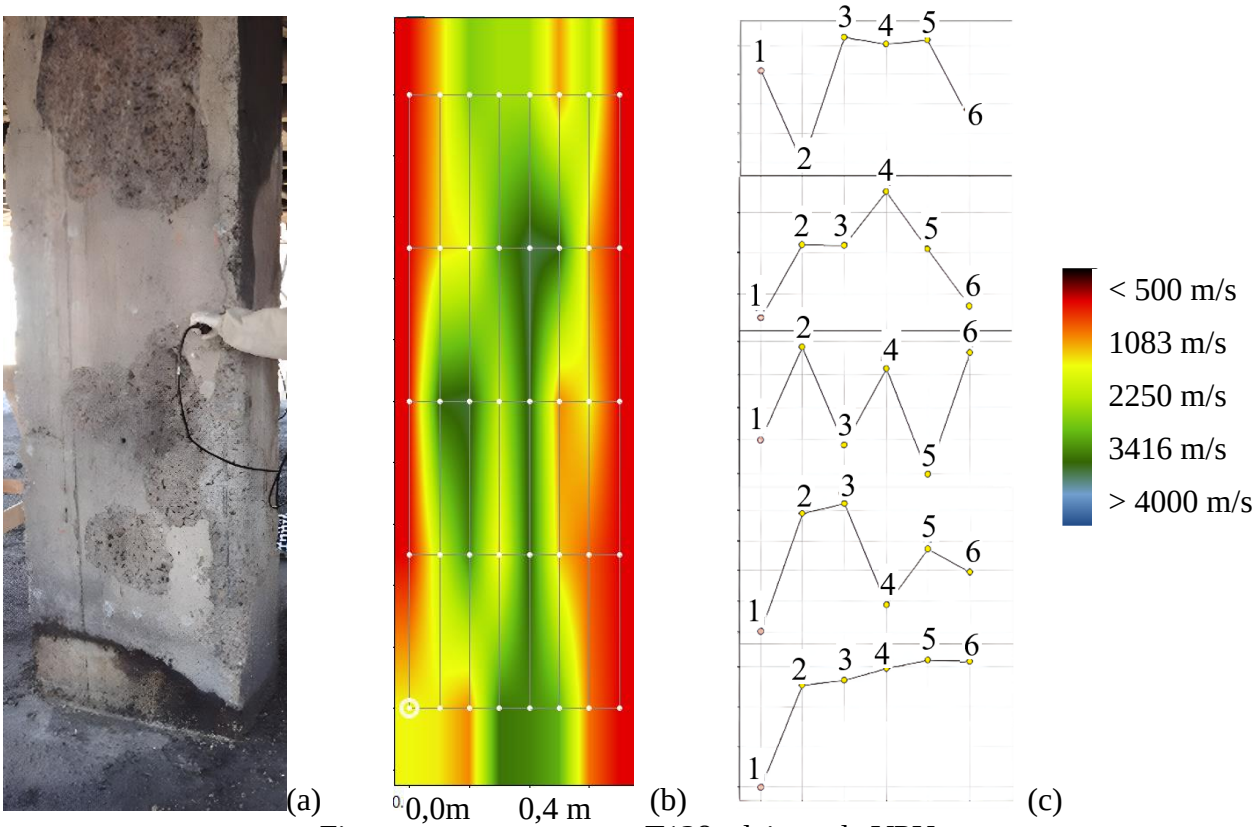
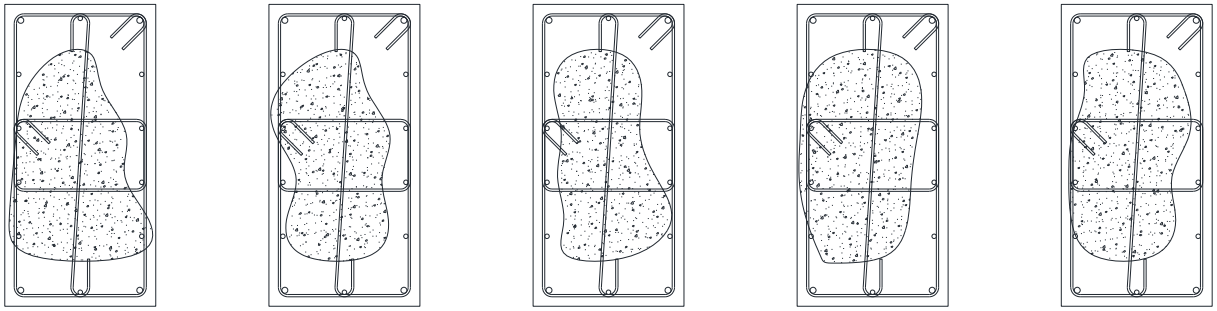


Figura 5. Estado do pilar T128 e leitura de VPU.

O valor máximo da espessura danificada foi determinado através da análise de uma série de leituras de VPU, conforme descrito em ACI 228.2R-13, mostrado na Figura 2. Com o valor máximo da espessura danificada e sua correlação com a velocidade em linha, conforme mostrado na Figura 5(c), a espessura danificada em cada nível do elemento foi determinada.

Através das leituras realizadas, são apresentadas as seções transversais em diferentes níveis da porção uniforme resultante, descontando a espessura com menor velocidade correspondente à camada danificada:



Seção 0.50 Seção 1.00 Seção 1.50 Seção 2.00 Seção 2.50

Figura 6. Seção transversal da porção uniforme do pilar

Esses resultados são representados tridimensionalmente (Figura 7), possibilitando uma visualização completa do elemento e permitindo, dessa forma, a elaboração do plano de recuperação estrutural.

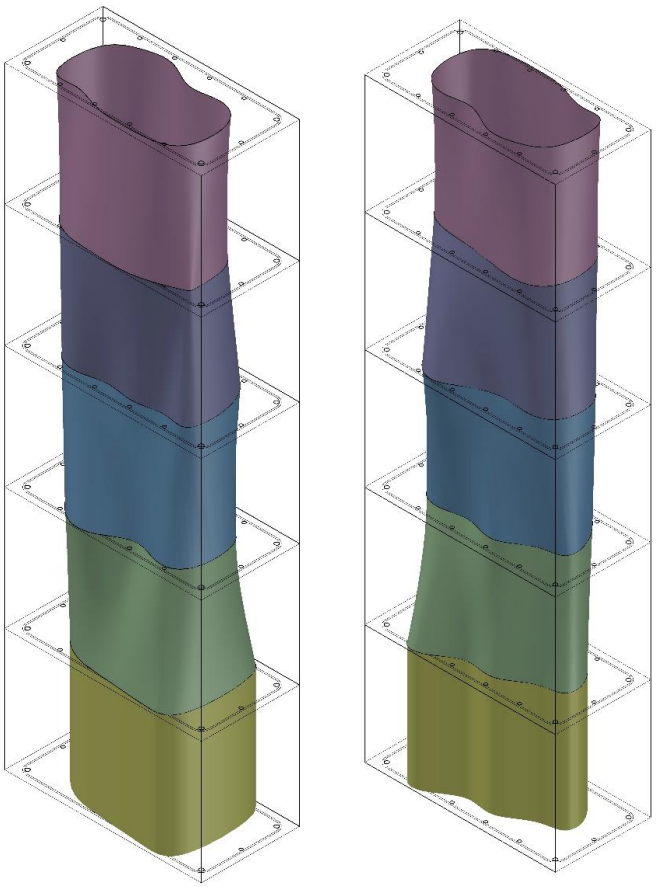


Figura 7. Porção uniforme do pilar em formato tridimensional.

3.2 Avaliação de uniformidade a de H°A°.

Os elementos avaliados correspondem a componentes estruturais de uma edificação de concreto armado, como pilares, vigas e painéis, os quais apresentaram diferentes anomalias percebidas ao retirar as formas, tais como: presença de ninhos, assentamento plástico, segregação e exposição de armaduras.

Para este documento, limitamo-nos à análise do pilar que apresentava as maiores afetações, realizando o estudo antes e depois de ter executado o processo de reabilitação estrutural

correspondente.

Na Figura 8, a maior parte da superfície da dimensão maior do elemento apresenta valores elevados de pulso ultrassônico, correspondendo a um concreto classificado como "bom", conforme estabelecido na Tabela 1. No entanto, existem setores com leituras baixas de ultrassom, correspondendo a um concreto principalmente classificado como "questionável", havendo alguns pontos localizados com classificação "pobre".

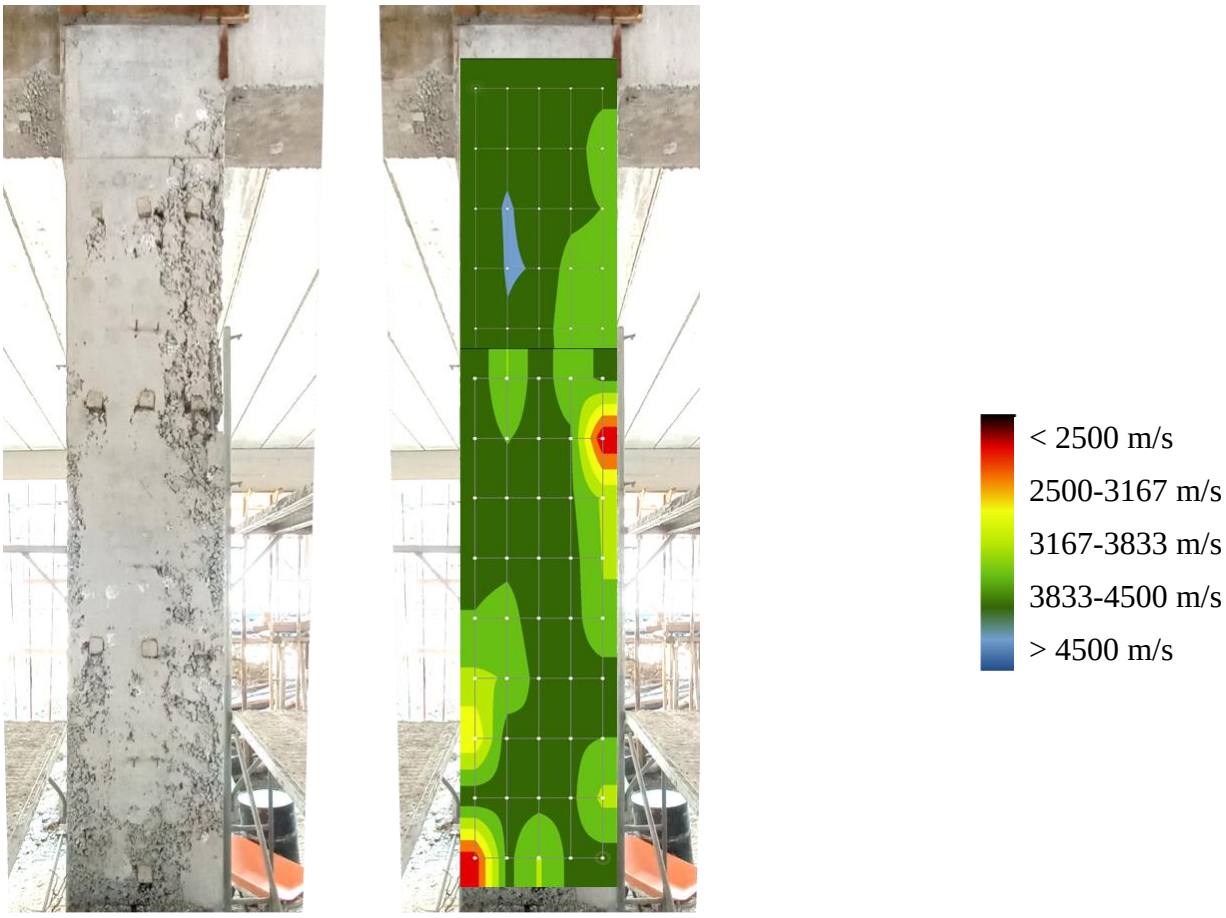


Figura 8. anomalías em pilar e mapa de VPU, antes da reabilitação.

Considerando que a maior parte do elemento apresenta um concreto classificado como "bom", foram realizadas medições com leituras diretas e indiretas para determinar a espessura correspondente ao concreto segregado, obtendo as seguintes seções do núcleo uniforme de concreto, conforme Figura 9:

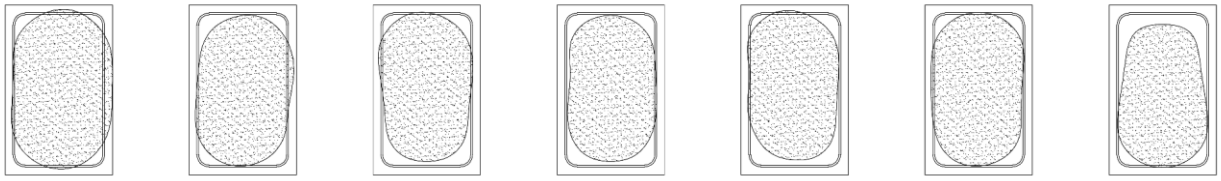


Figura 9. Seção transversal da porção uniforme do pilar

Na figura 10, representa-se com bastante aproximação a real situação do pilar.

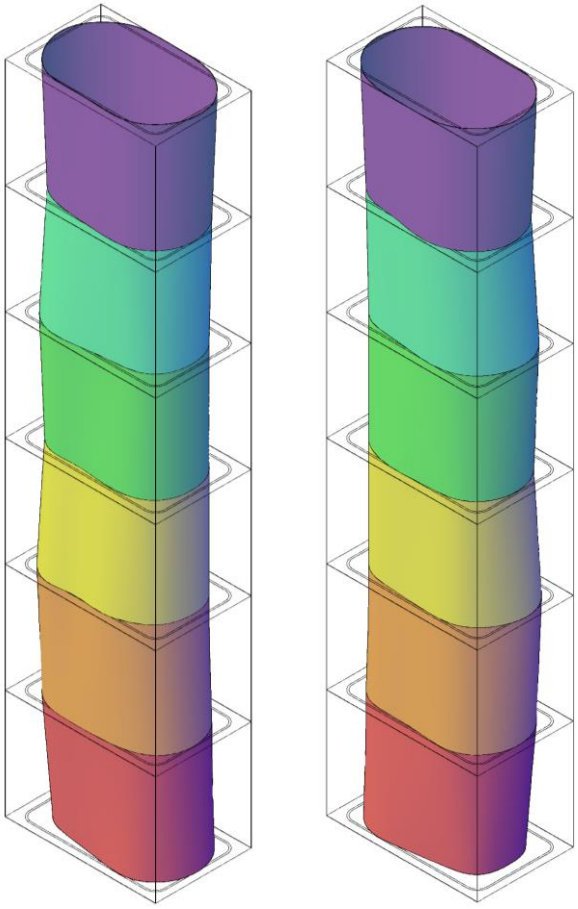
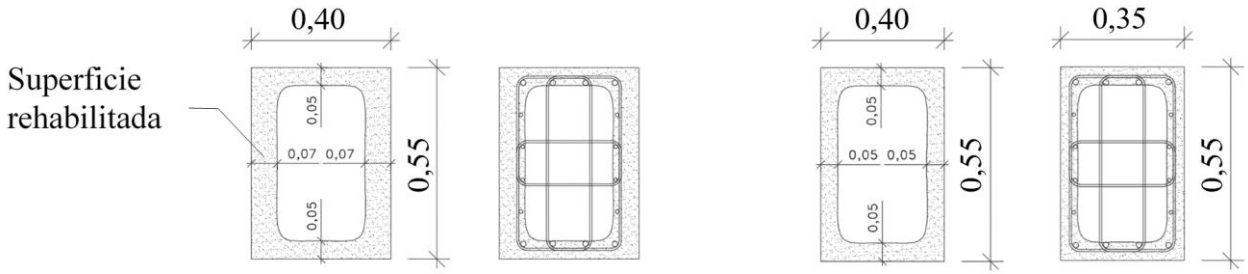


Figura 10. Porção uniforme do pilar.

Os setores da seção média saudável do pilar e a espessura reabilitada são mostrados na Figura 11 após a remoção do material defeituoso:



Sec. de 0.00 m a 0.40 m Sec. de 0.40 m a 2.40 m

Figura 11. Seção transversal do pilar depois da reabilitação.

Os trabalhos de reabilitação estrutural evidenciam a precisão dos estudos de patologia, sendo a parte média da face anterior e a parte inferior da face posterior os setores mais danificados e com maior perda de seção, conforme mostrado na Figura 12.

Figura 12. Processo de reabilitação estrutural.

Após a reabilitação do elemento, pode-se constatar que, antes da reabilitação, os pontos com classificação questionável tinham uma velocidade de pulso média de 3496 m/s, após a reabilitação, a velocidade de pulso média é de 3933 m/s, alcançando uma melhoria na uniformidade desses pontos de aproximadamente 13%.

No caso dos pontos com classificação pobre, antes da reabilitação, tinham uma velocidade de pulso média de 2419 m/s, após a reabilitação, a velocidade de pulso média é de 3950 m/s, alcançando uma melhoria na uniformidade desses pontos de aproximadamente 63%. Ver Figura 13.

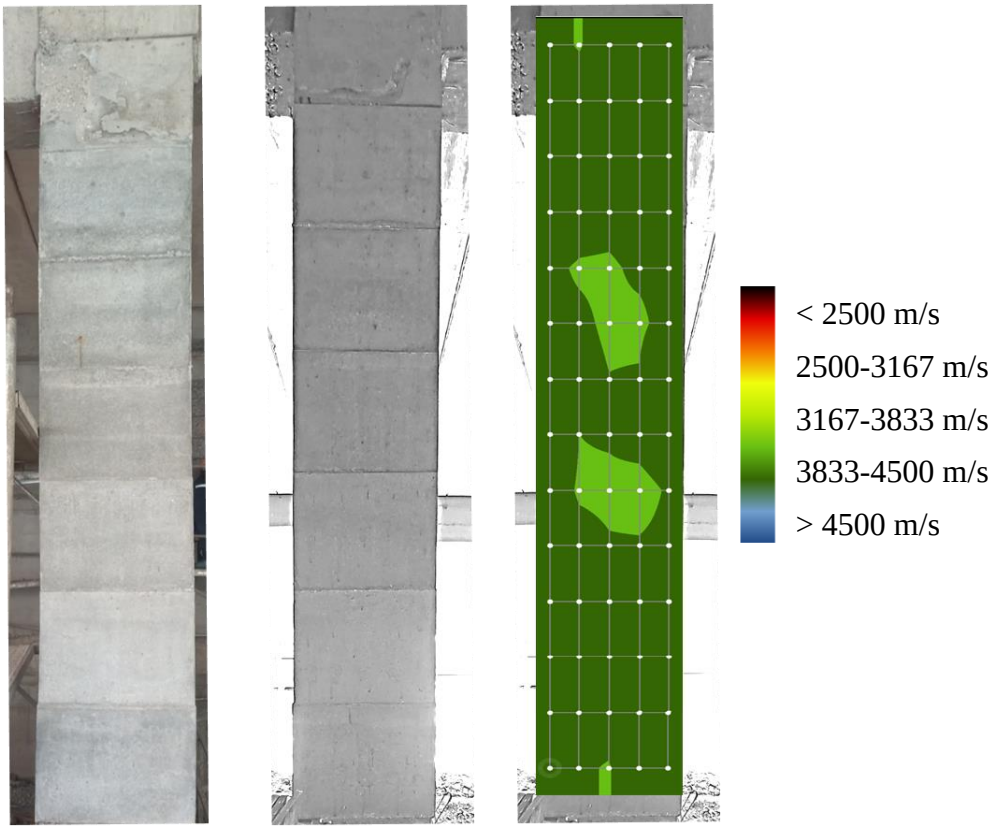


Figura 13. Estado do pilar e mapa de VPU, após a reabilitação.

3.1 Avaliação da integridade e análise de fissuração de um elemento H°A°.

A estrutura corresponde a núcleo de H°A° segundo o seguinte esquema, ver Figura 14:

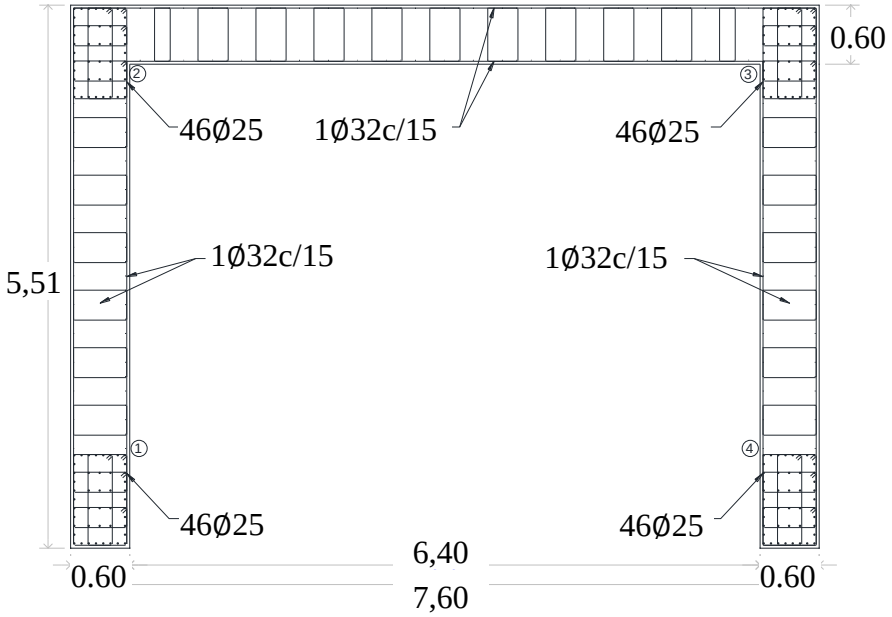


Figura 14. Núcleo de HºAº.

Em vários setores do elemento, foi constatada a presença de anomalias de várias origens, ocorridas nas primeiras horas da concretagem e percebidas no momento da retirada das formas. As anomalias presentes foram: assentamento plástico, retração plástica, segregação, presença de ninhos, armaduras expostas e juntas frias de concretagem.

No caso específico apresentado neste trabalho, foram analisadas as juntas frias formadas entre os níveis de concretagem e as fissuras devido à falta de continuidade na superfície do elemento, conforme mostrado na Figura 15.

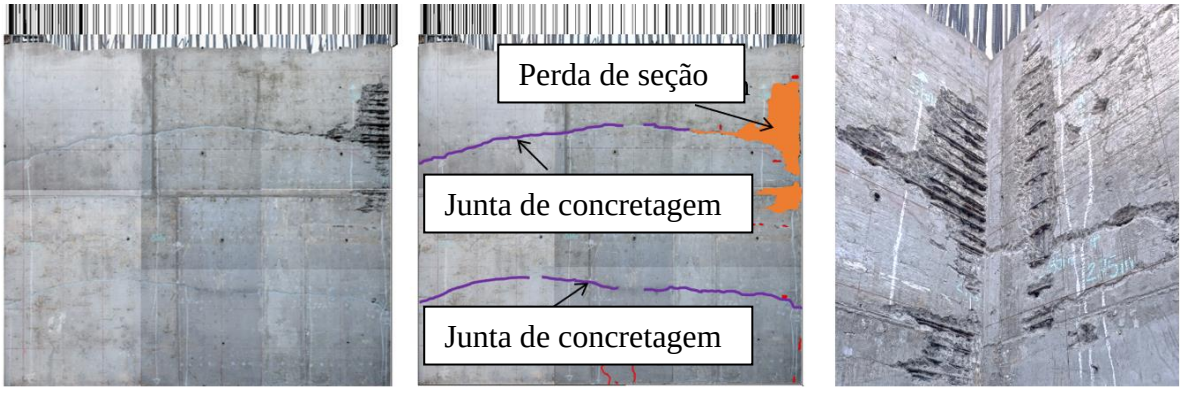


Figura 15. Anomalias em muro lateral de núcleo.

Uma vez realizadas as leituras de VPU ao longo do eixo longitudinal das fissuras, determinou-se que a profundidade máxima de fissuração é de 14,7 cm e a mínima de 2,9 cm, com um valor médio de 7,0 cm, que pode ser adotado como referência para o restante das fissuras.

Após a reabilitação do elemento por meio do selamento das fissuras com resina epóxi, o elemento reparado foi analisado de acordo com Souza e Pinto (2020), que explicam que a forma de onda ultrassônica representada pela amplitude indica mudanças na onda de estresse devido à reflexão e

refração que ocorre em qualquer interface de materiais com diferentes propriedades acústicas. Ou seja, uma interface de concreto-epóxi alteraria a forma de onda, mas não a velocidade. Portanto, ao analisar a forma de onda completa e sua relação com a amplitude, pode-se avaliar se a fissura foi corretamente reparada.

Nesse sentido, determinou-se a amplitude média da onda do elemento e comparou-se com a amplitude de cada fissura avaliada ao longo de seu eixo longitudinal. Na Figura 16, pode-se ver que os pontos com amplitude acima do valor médio do elemento foram selados adequadamente, enquanto aqueles que estão abaixo desse valor foram selados parcialmente. Isso pode dever-se, entre outros aspectos, à fluidez da resina epóxi, que normalmente permite selar fissuras com mais de 0,5 mm de espessura.

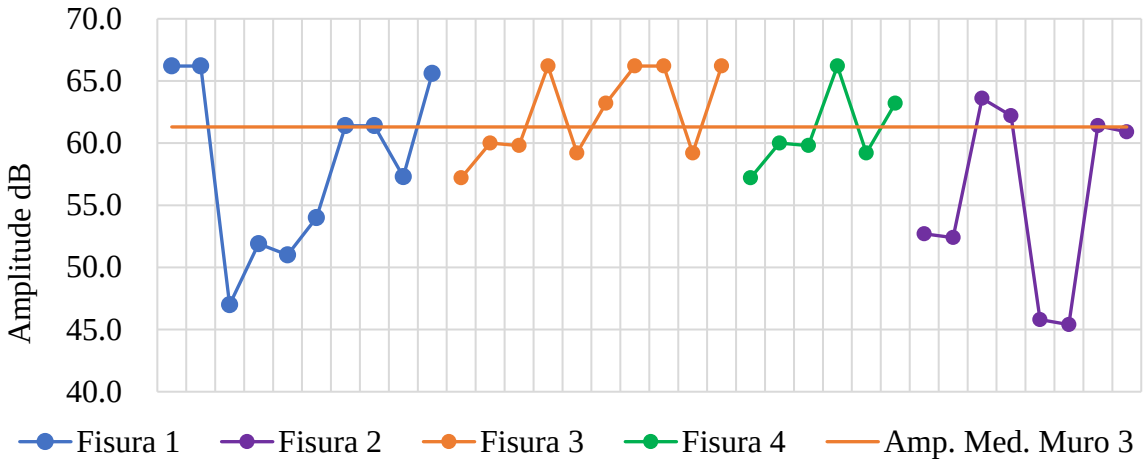


Figura 16. Amplitude de onda em fissuras.

4. DISCUSSÃO E RESULTADOS

Os resultados dos três casos demonstram a viabilidade do uso de ensaios não destrutivos (END) e equipamentos de VPU para a avaliação estrutural. Esses casos correspondem a projetos em fase de construção, o que permite a realização de ensaios complementares, como calhas exploratórias, para obter uma interpretação precisa das leituras obtidas nos ensaios.

O manuseio adequado e a experiência do operador na coleta de dados são de grande importância para obter resultados confiáveis, assim como a interpretação correta e a correlação com outros ensaios complementares, bem como a inspeção dos elementos na obra, que são fundamentais para gerar recomendações e procedimentos de reabilitação estrutural, quando necessário.

A determinação com bastante precisão da espessura danificada ou da seção sã de um elemento permite tomar decisões rápidas na obra em relação à sua reabilitação ou restituição.

A análise realizada para determinar as espessuras danificadas no elemento estudado teve níveis de precisão adequados, que foram verificados durante a reabilitação estrutural.

É importante avaliar quantitativamente um elemento estrutural reabilitado para evitar critérios subjetivos que possam afetar as decisões. Isso fica evidente claramente no terceiro caso, onde foi alcançada uma melhoria de 63% na uniformidade dos setores mais afetados.

Na análise de um elemento fissurado, o método da amplitude da onda permite gerar resultados satisfatórios ao avaliar sua reabilitação.

Os valores obtidos nas leituras estão em concordância com os valores estabelecidos na documentação de referência. Se for necessário valores de referência que reflitam resultados com materiais locais, é necessário realizar pesquisas que forneçam a informação adequada, com base em estudos realizados em contextos semelhantes.

5. CONCLUSÕES

Os ensaios de VPU são versáteis para avaliar elementos estruturais de concreto armado. A correta operação do equipamento e a interpretação dos resultados são fundamentais para obter informações importantes, influenciando na geração de planos de reparo e reforço estrutural adaptados às necessidades específicas.

Anomalias, como segregação ou formação de ninhos, podem surgir durante os processos construtivos. É importante analisar as condições do dia em que esses processos foram realizados, possibilitando o desenvolvimento de planos de contingência para lidar com eventos passados.

Eventos indesejados, como anomalias, podem ocorrer. Portanto, é necessário ter planos de avaliação por meio de END para determinar as condições reais dos elementos afetados, facilitando o desenvolvimento dos melhores procedimentos de reparo estrutural e impactando nos prazos e custos finais de reparo.

Os END têm avançado notavelmente, impulsionados por melhorias na tecnologia utilizada. Nesse sentido, o uso de ferramentas de software com fluxos de trabalho de inspeção totalmente personalizáveis facilita a documentação de todas as informações em um único local por meio da aplicação de IA permitindo também inspeções remotas.

6. REFERENCIAS

American Society for Testing and Materials (2002), *ASTM C 597-02, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*.

American Concrete Institute (2013), *Report on Nondestructive test Methods for Evaluation of Concrete in Structures*, ACI 228, 2R-13. American Concrete Institute, EUA.

American Concrete Institute (2001), *Control of Cracking of Concrete Structures*, ACI 224R-01. American Concrete Institute, EUA.

American Concrete Institute (2014), *Guide to Concrete Repair – Report by ACI Committee 546*, ACI 546R-143. American Concrete Institute, EUA.

American Concrete Institute (2009), *Surface Repair Using Form-and-Pour Techniques – Field Guide to Concrete Repair Application Procedures*, ACI RAP Bulletin 4. American Concrete Institute, EUA.

Feldman R.F. (1977), *CBD 187 Non-Destructive Testing of Concrete,* Canadian Building Digest, Division of Building Research, National Research Council Canada,

Malhotra V. M., Carino N. J. (2004), *"Handbook on Nondestructive Testing of Concrete"*, Boca Raton, Florida, USA, cap 8, pp 8-1 – 8-19

Souza, F. C., Pinto R. C. A. (2020), *Ultrasonic investigation on the effectiveness of crack repair in concrete*. IBRACON Structures and Materials Journal.