

Estudio patológico empleando ensayos de ultrasonido aplicado a estructuras en construcción

G. A. Ergueta^{1*}, M. V. Quino¹

*Autor de Contacto: gustavo.ergueta@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i1.715>

Recibido: 04/11/2023 | Correcciones recibidas: 19/12/2023 | Aceptado: 22/12/2023 | Publicado: 01/01/2024

RESUMEN

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.

Citar como: Ergueta, G. A.; Quino, M. V. (2024), “Estudio patológico empleando ensayos de ultrasonido aplicado a estructuras en construcción”, Revista ALCONPAT, 14 (1), pp. 82 – 95, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i1.715>

¹ Steel Concrete Test, La Paz, Bolivia.

Contribución de cada autor

En este trabajo el autor G. A. Ergueta contribuyó con la idea original en un 50%, redacción del trabajo en un 60%, recolección de datos en un 60% y discusión de resultados en un 40%, el autor M. V. Quino contribuyó con la idea original en un 50%, redacción del trabajo en un 40%, recolección de datos en un 40% y discusión de resultados en un 60%.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2024) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2024 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2024.

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.

Estudo patológico por meio de testes de ultrassom aplicados a estruturas em construção

RESUMO

O estudo discute os resultados da avaliação de estruturas de concreto armado por meio de Ensaios Não Destrutivos (END) baseados em Velocidade do Pulso Ultrassônico (VPU) com o objetivo de determinar a integridade e uniformidade do concreto, bem como detectar possíveis anomalias causadas durante a construção ou fatores externos. Os resultados mostraram a distribuição dos danos em uma estrutura afetada pelo fogo, a medição da profundidade de fissuração em um elemento de concreto e a uniformidade em diferentes componentes estruturais, o que permitiu posteriormente a elaboração do procedimento de reabilitação estrutural correspondente. O estudo demonstra a eficácia do END e VPU na avaliação de estruturas de concreto armado, permitindo decisões imediatas de reparo e reabilitação.

Palavras-chave: ensaios não destrutivo; velocidade do pulso ultrassônico; anomalias; reabilitação; concreto.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro del estudio patológico en las estructuras de hormigón armado, el uso de ensayos no destructivos (END) se ha convertido en una herramienta útil para evaluar la calidad y el estado de las edificaciones. El avance tecnológico en este campo ha permitido obtener resultados confiables prácticamente en tiempo real, mediante el uso de equipos que ya incorporan inteligencia artificial (IA) para el procesamiento de datos.

Los resultados de estos estudios y la detección de anomalías a temprana edad en las estructuras, antes de que se detecten daños visibles, permiten reducir significativamente los costos de reparación e incrementar su vida útil, disminuyendo el deterioro del hormigón y el riesgo de la integridad de la estructura.

El origen de estas anomalías puede producirse durante la etapa de construcción de la estructura por un control insuficiente, o durante la vida útil de la misma, debido a la falta de un plan de mantenimiento adecuado. Por esta razón la evaluación estructural se ha convertido en una buena práctica para garantizar la seguridad y la estabilidad de las edificaciones.

Dentro de los END, el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) puede ser empleado para determinar la uniformidad del hormigón. Este método se basa en que, un cambio en la VPU medida a través del elemento está fundamentalmente relacionado con un cambio en el módulo elástico del hormigón. Este método permite obtener información en todo el espesor del elemento a diferencia de otros métodos que solo permiten evaluar la superficie. Sin embargo, se debe considerar de manera especial la heterogeneidad del hormigón.

Un adecuado uso de múltiples equipos puede evitar distorsiones en la lectura de los valores de la VPU. Asimismo, los sectores a ser evaluados deben ser analizados previamente con pacómetro para identificar las zonas con presencia de armaduras de refuerzo.

Este trabajo busca compartir los resultados obtenidos mediante la aplicación de diferentes métodos de VPU aplicados a casos reales, con el objetivo de determinar el nivel de daño en estructuras de hormigón armado evaluadas en etapa de construcción.

2. EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO MEDIANTE ENSAYOS DE VPU

El principal objetivo de las evaluaciones está relacionado con la determinación del grado de integridad y uniformidad del hormigón afectado por factores externos originados en la etapa de construcción o acciones externas que pueden disminuir sus características mecánicas.

La posibilidad de contar con esta información durante la ejecución de una obra permite tomar decisiones inmediatas relacionadas con la restitución de los elementos dañados o con la rehabilitación estructural de los mismos. Para los casos propuestos, todas las estructuras fueron rehabilitadas luego de su evaluación toda vez que los resultados obtenidos confirmaron que los daños existentes una vez rehabilitada la estructura no afectaban su capacidad estructural.

La metodología utilizada para la toma de datos de VPU, así como los documentos de referencia para el análisis de resultados, está descrito en este trabajo.

Según lo establecido en el acápite 5.2 de la norma ASTM C 597-02, el ensayo de VPU es válido para evaluar la uniformidad y la calidad relativa del hormigón, así como para detectar vacíos y fisuras en las estructuras. Además, permite evaluar la eficacia de las reparaciones realizadas en las fisuras. También es útil para indicar cambios en las propiedades del hormigón y en la evaluación de estructuras, lo que permite estimar la severidad del deterioro causado por la fisuración.

Para la evaluación mediante lecturas de VPU se utilizan tres configuraciones posibles de los transductores, como describen Naik, Malhotra y Popovics (2004): transmisión directa, Figura 1(a); transmisión semidirecta, Figura 1(b); y transmisión indirecta o superficial, Figura 1(c).

El método de transmisión directa es el más deseable y el más satisfactorio, porque con esta disposición se transmite y recibe la máxima energía del impulso. El método de transmisión semidirecta también puede utilizarse de forma bastante satisfactoria, sin embargo, hay que tener cuidado de que los transductores no estén demasiado separados; de lo contrario, el pulso transmitido podría atenuarse y no detectarse una señal de pulso. Este método es útil para evitar concentraciones de armaduras. El método indirecto o de transmisión superficial, es el menos satisfactorio porque la amplitud de la señal recibida es significativamente menor que la recibida por el método de transmisión directa. Este método también es más propenso a errores y puede ser necesario un procedimiento especial para determinar la velocidad del impulso.

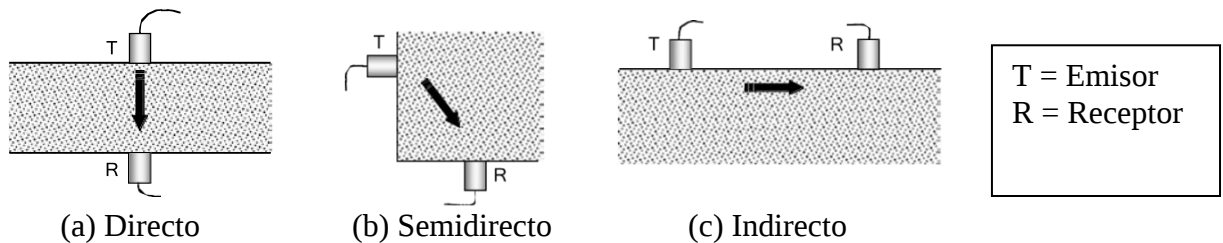


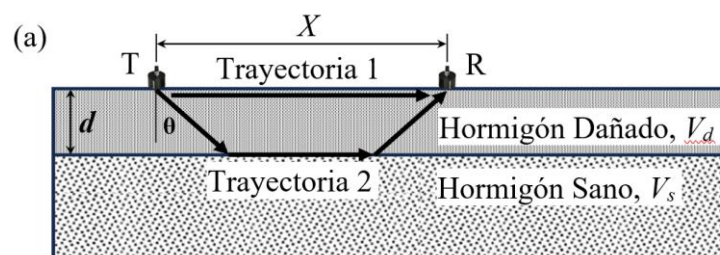
Figura 1. Configuraciones de medición de la VPU. (a) Método directo. (b) Método semidirecto. (c) Método indirecto superficial. Naik, Malhotra y Popovics (2004)

Con base en lo anterior, una clasificación del hormigón según su VPU empleada ampliamente, es la elaborada por Feldman (1977).

Tabla 1. Clasificación del hormigón según su velocidad ultrasónica
CBD-187 Non-Destructive Testing of Concrete

CLASIFICACIÓN DEL HORMIGÓN SEGÚN SU VPU	
Velocidad ultrasónica (m/s)	Clasificación del hormigón
$V > 4575$	Excelente
$4575 > V > 3660$	Bueno
$3660 > V > 3050$	Cuestionable
$3050 > V > 2135$	Pobre
$V < 2135$	Muy pobre

En el acápite 3.2.1 de ACI 228.2R-13, se indica que las lecturas de VPU a través de mediciones indirectas pueden ser utilizadas para medir la profundidad de una capa superficial dañada por el fuego o congelación (Figura 2), debido a que tiene una velocidad de onda inferior a la del hormigón sano subyacente.



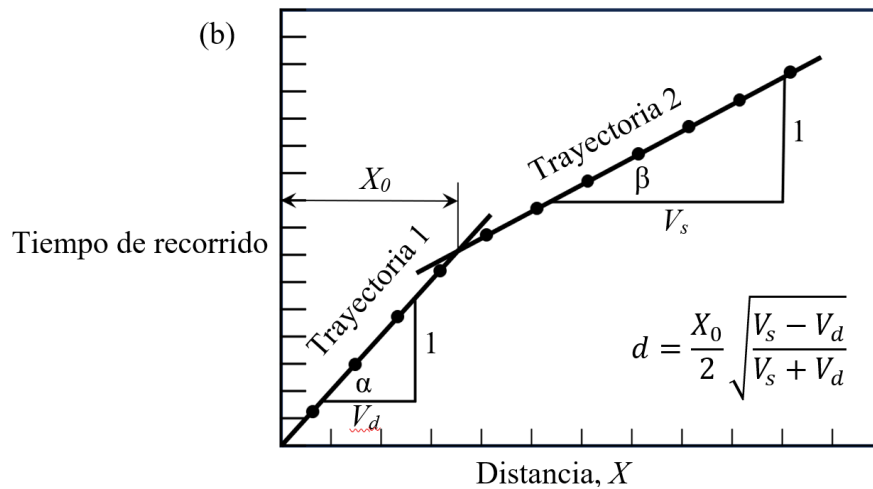


Figura 2. (a) Trayectorias de ondas para ensayos ultrasónicos en superficie de hormigón con capa superficial dañada. (b) tiempo de recorrido en función de la distancia entre emisor y receptor. Tomada de ACI 228.2R-13.

Asimismo, Naik, Malhotra y Popovics (2004), exponen que el método de VPU es eficaz para caracterizar las fisuras superficiales (Figura 3 y ecuación 1):

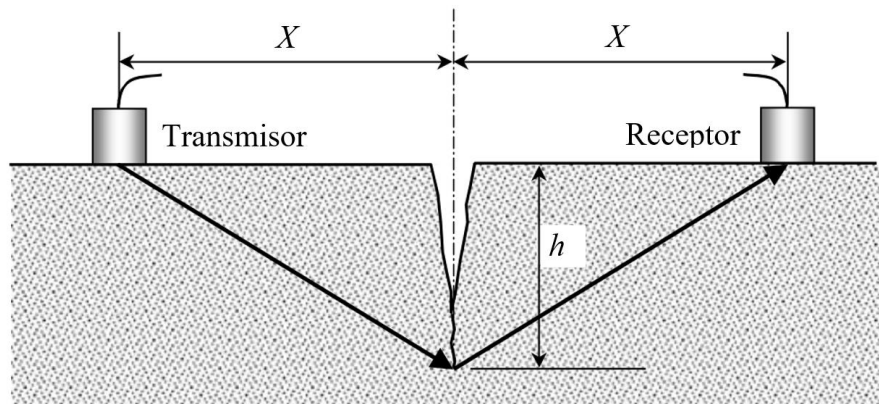


Figura 3. Determinación de la profundidad de fisuración. (Naik, Malhotra y Popovics 2004).

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

2.1 Equipos utilizados.

Los equipos utilizados para las evaluaciones mencionadas precedentemente son:

2.1.1 Detector de armaduras.

La detección de armaduras se realizó mediante un pacómetro computarizado Proceq Profometer 650 IA con la capacidad de detectar armaduras de refuerzo en el hormigón y estimar su diámetro utilizando para ello tecnología de inducción de impulsos de corriente de remolino.

2.1.2 Equipo de ultrasonido.

Las lecturas de VPU se realizaron mediante un equipo Proceq Pundit 200 que permite evaluar la uniformidad del hormigón, así como determinar la profundidad de fisuración mediante transductores de onda longitudinal.

3. RESULTADOS EMPLEANDO VPU EN LA EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS

Los tres casos prácticos de evaluaciones de estructuras de hormigón armado mediante ensayos de VPU fueron realizados en distintos proyectos en La Paz - Bolivia; proyectos que se encontraban en la etapa de construcción.

3.1 Evaluación de estructura sometida a la acción del fuego.

La estructura corresponde a un edificio de 13 niveles según el esquema de la Figura 4:

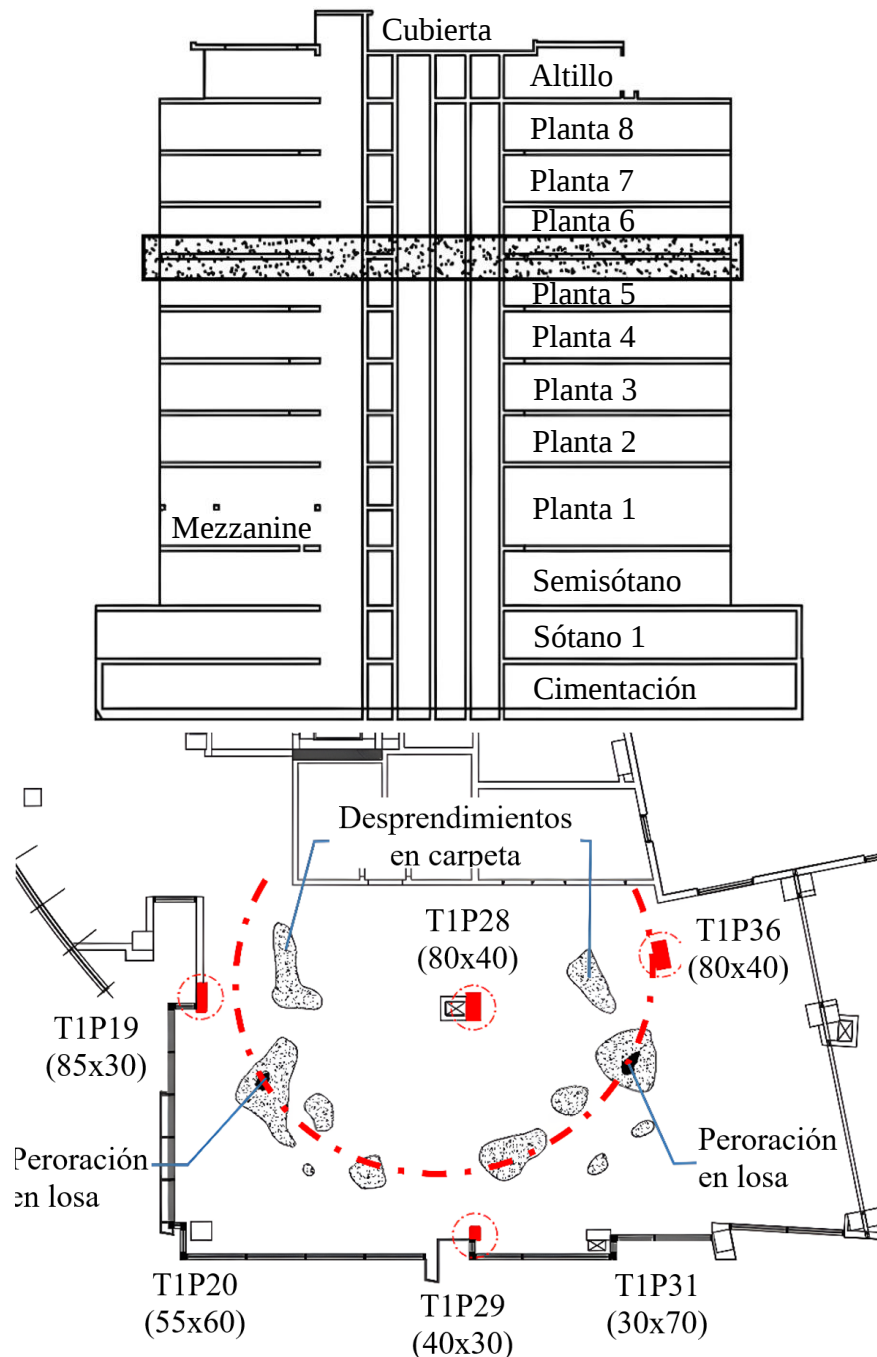


Figura 4. Esquema del edificio y daños en losa.

En la Figura 4 se puede observar la distribución de los daños en la losa producto de la acción del fuego, presentando una configuración radial con centro aproximado en la columna T1P28, esta situación confirma el hecho de que la columna y ábaco correspondientes a esta ubicación son los elementos con mayor daño superficial y los elementos T1P20 y T1P31 no presentan daño visual debido a que se encuentra a una mayor distancia.

Se realizaron lecturas directas e indirectas de VPU en la columna más afectada (T1P28) con el objetivo de evaluar la uniformidad del hormigón en todo el espesor del elemento, así como para determinar el espesor del hormigón dañado por la acción del fuego.

En la Figura 5(a) se puede observar el estado de la columna después del incendio, la Figura 5(b) es la representación de la VPU en la cara mayor a través de todo el espesor de la columna, y la Figura 5(c) corresponde a las lecturas de velocidad en línea en las caras mayores de la columna.

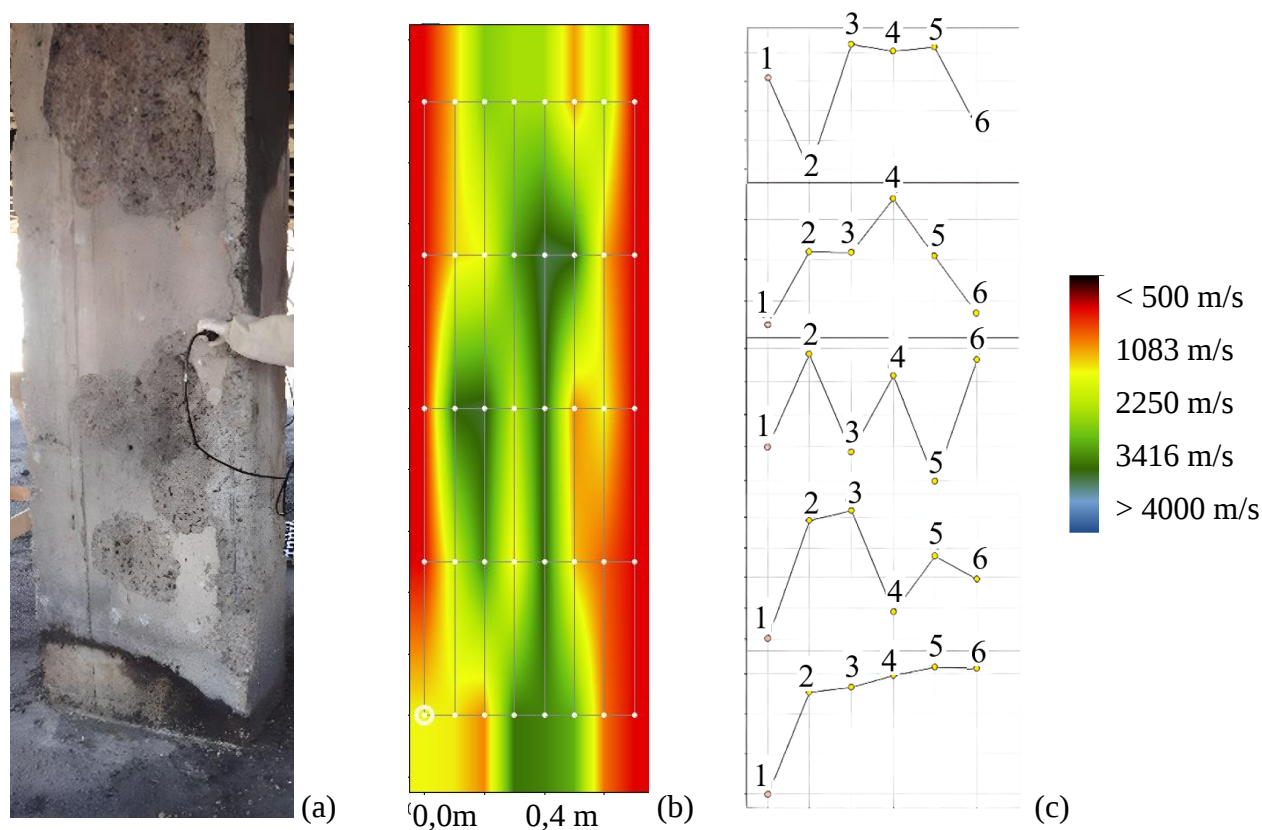
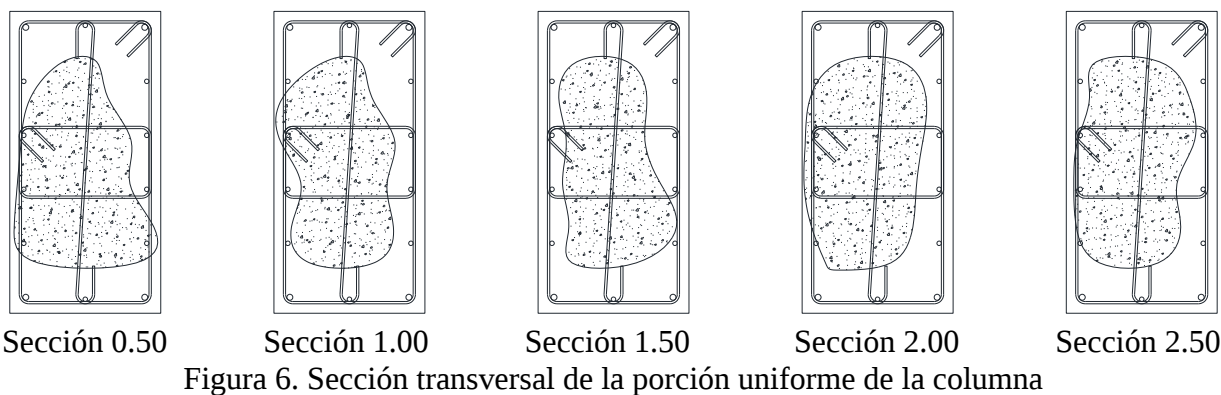


Figura 5. Estado de la columna T128 y lectura de VPU.

El máximo valor del espesor dañado se determinó a través del análisis de una serie de lecturas de VPU de acuerdo con lo descrito en ACI 228.2R-13, mostrado en la Figura 2.

Con el máximo valor del espesor dañado y su correlación con la velocidad de línea Figura 5(c), se determinó el espesor dañado en cada nivel del elemento.

Mediante las lecturas realizadas, se presentan las secciones transversales a diferentes niveles de la porción uniforme resultante, descontando el espesor con menor velocidad correspondiente a la capa dañada:



Estos resultados son representados de forma tri dimensional (Figura 7), logrando la apreciación completa del elemento, permitiendo de esta forma la elaboración del plan de reparación estructural.

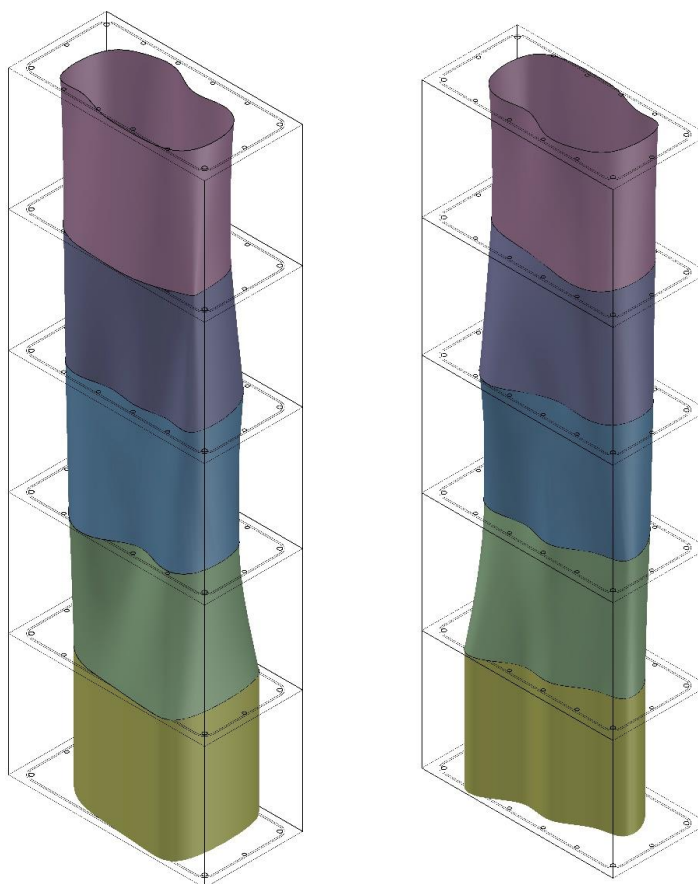


Figura 7. Porción uniforme de la columna en formato tridimensional.

3.2 Evaluación de uniformidad a elementos de H°A°.

Los elementos evaluados corresponden a componentes estructurales de una edificación de H°A° como son columnas, vigas y pantallas, mismas que presentaron diferentes anomalías percibidas al momento de retirar las formaleas, como son: presencia de nidos, asentamiento plástico, segregación y armaduras expuestas.

Para el documento nos limitamos al análisis de la columna que presentaba mayores afectaciones, realizando el estudio antes y después de haber ejecutado el proceso de rehabilitación estructural correspondiente.

En la Figura 8, la mayor parte de la superficie de la dimensión mayor del elemento presenta valores altos de pulso ultrasónico, correspondiendo a un hormigón con clasificación “buena”, según lo establecido en la Tabla 1. Sin embargo, existen sectores con lecturas bajas de ultrasonido, correspondiendo a un hormigón con clasificación principalmente “cuestionable”, existiendo algunos puntos localizados con una clasificación “pobre”.

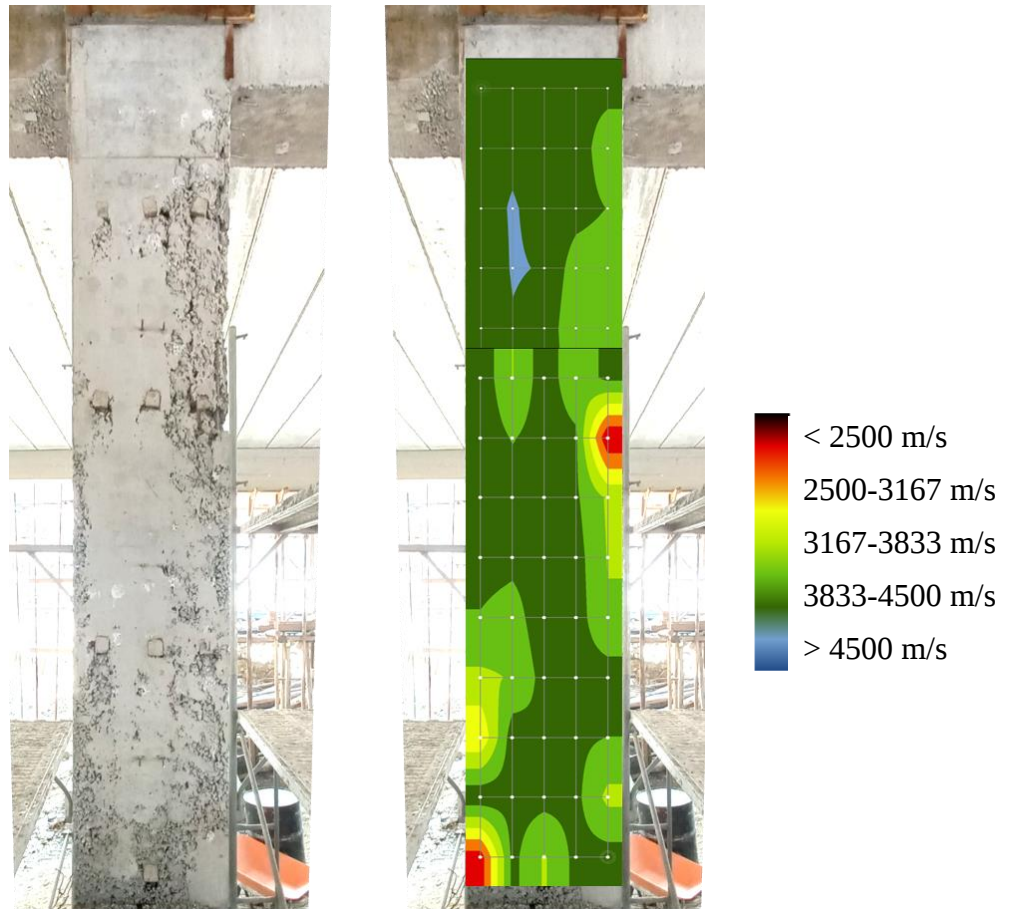


Figura 8. Anomalías en columna y mapa de VPU, antes de la rehabilitación.

Considerando que la mayor parte del elemento presenta un hormigón con clasificación “buena”, se realizaron mediciones con lecturas directas e indirectas para determinar el espesor correspondiente al hormigón segregado, obteniéndose las siguientes secciones del núcleo uniforme de hormigón, Figura 9:

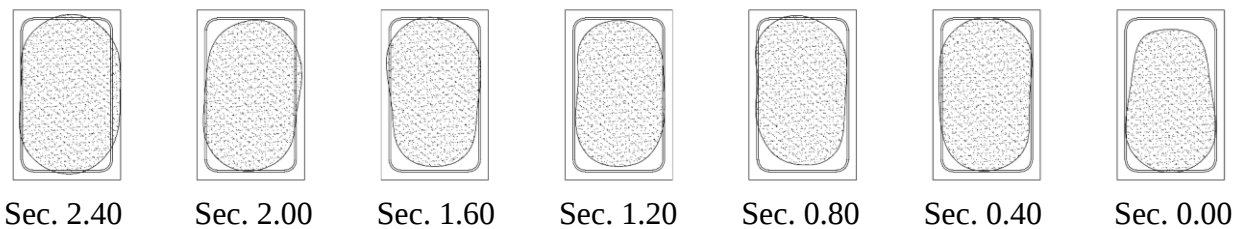


Figura 9. Sección transversal de la porción uniforme de la columna

En la Figura 10, se representa con bastante aproximación la situación real de la columna.

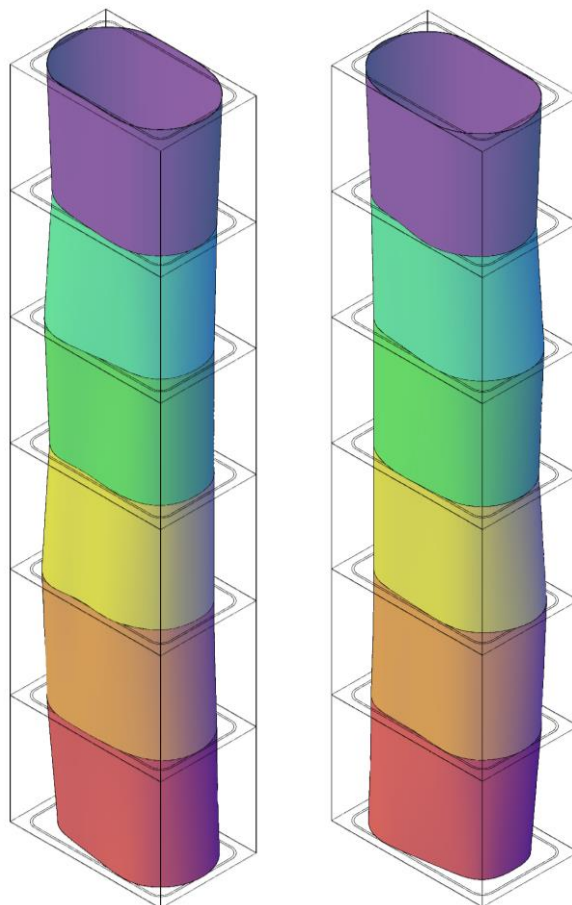


Figura 10. Porción uniforme de la columna.

Los sectores de sección sana media de la columna y el espesor rehabilitado son mostrados en la Figura 11 una vez realizado el retiro del material defectuoso:

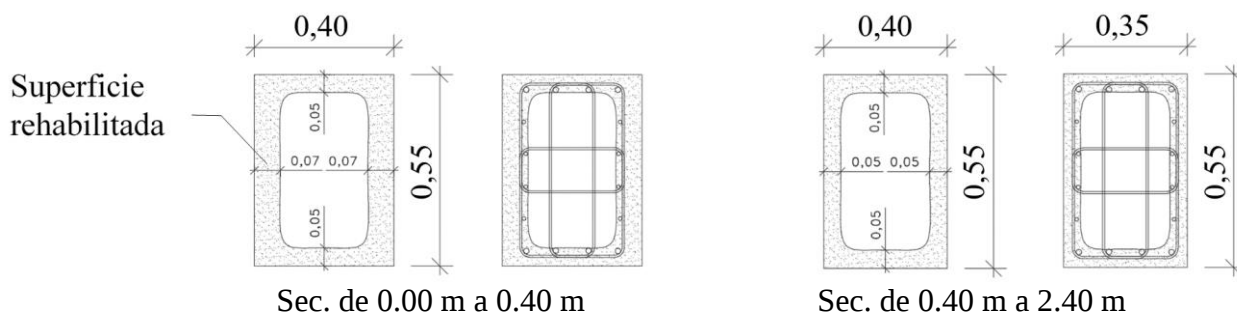


Figura 11. Sección transversal de la columna luego de la rehabilitación

Durante los trabajos de rehabilitación estructural, se evidencia la precisión a la que se ha llegado en los estudios de patología, siendo la parte media de la cara anterior y la parte inferior de la cara posterior los sectores más dañados y con mayor pérdida de sección, Figura 12.

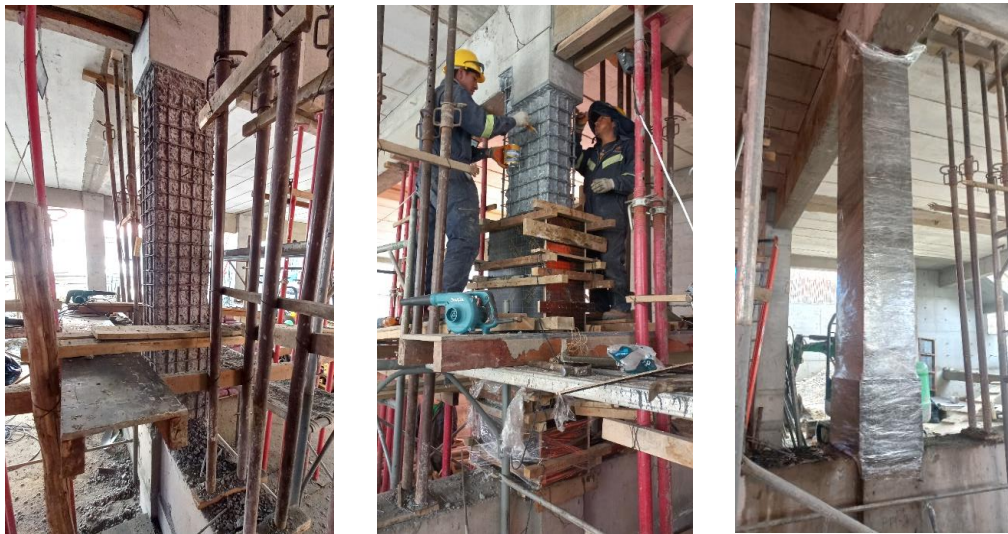


Figura 12. Proceso de rehabilitación estructural.

Una vez rehabilitado el elemento se puede constatar que antes de la rehabilitación, los puntos con clasificación cuestionable tenían una velocidad de pulso promedio de 3496 m/s, luego de la rehabilitación, la velocidad de pulso promedio es de 3933 m/s, lográndose una mejora en la uniformidad de esos puntos de 13% aproximadamente.

En el caso de los puntos con clasificación pobre, antes de la rehabilitación, tenían una velocidad de pulso promedio de 2419 m/s, luego de la rehabilitación, la velocidad de pulso promedio es de 3950 m/s, lográndose una mejora en la uniformidad de esos puntos de 63% aproximadamente. Ver la Figura 13.

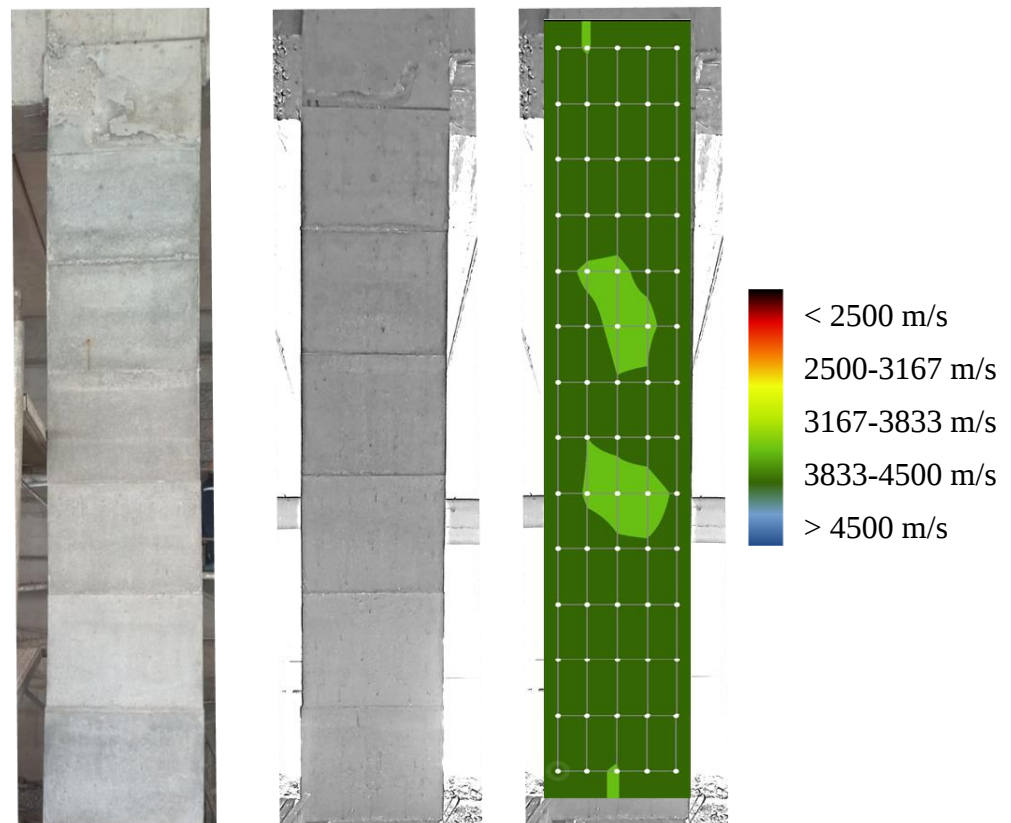


Figura 13. Estado de la columna y mapa de VPU, después de la rehabilitación.

3.1 Evaluación de integridad y análisis de fisuración de un elemento de H°A°.

La estructura corresponde a un núcleo de H°A° según el siguiente esquema, ver Figura 14:

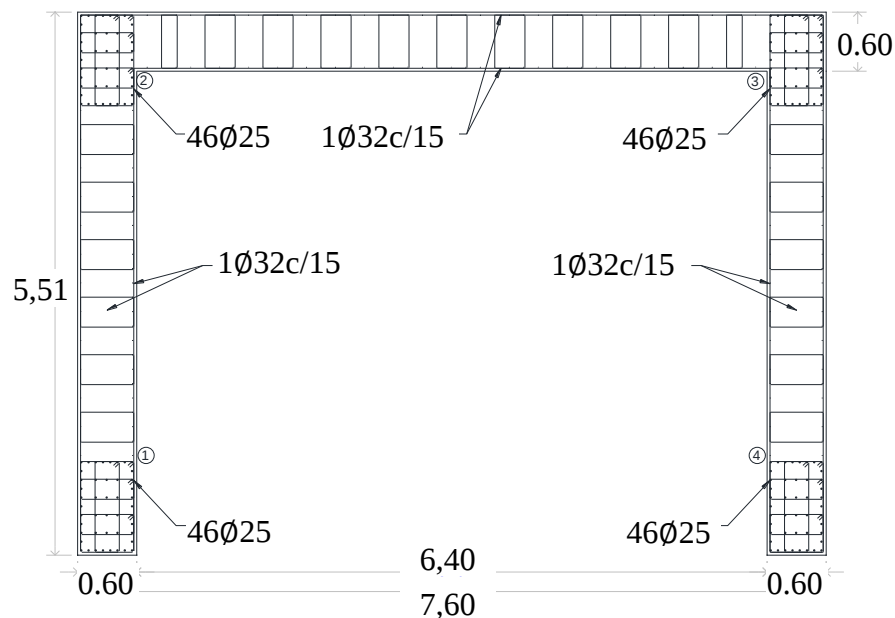


Figura 14. Núcleo de H°A°.

En varios sectores del elemento se constató la presencia de anomalías, de diverso origen, producidas en las primeras horas del hormigonado, y percibidas al momento de retirar las formaleas, las anomalías presentes fueron: asentamiento plástico, retracción plástica, segregación, presencia de nidos, armaduras expuestas y juntas frías de hormigonado.

En el caso específico expuesto en este trabajo, se analizaron las juntas frías producidas entre niveles de hormigonado y las fisuras debido a la falta de continuidad en la superficie del elemento, ver Figura 15.

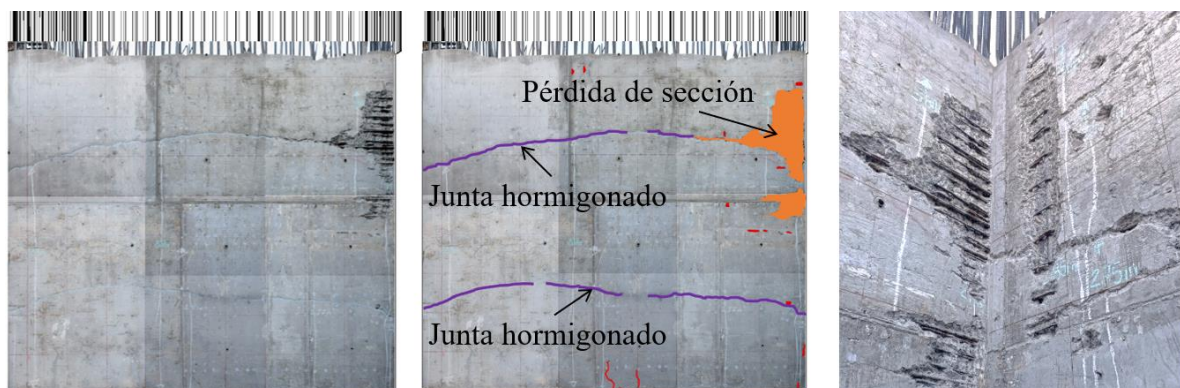


Figura 15. Anomalías en muro lateral del núcleo.

Una vez realizadas las lecturas de VPU a lo largo del eje longitudinal de las fisuras, se determinó que la profundidad máxima de fisuración es 14.7 cm y la mínima de 2.9 cm, siendo el valor medio de 7.0 cm, este valor puede ser adoptado como referencial para el resto de las fisuras.

Una vez rehabilitado el elemento a través del sellado mediante la inyección de las fisuras con resina epóxica, se analizó el elemento reparado según lo establecido por Souza y Pinto (2020), quienes explican que la forma de onda ultrasónica representada por la amplitud, indica cambios en la onda de esfuerzo debido a la reflexión y refracción que ocurre en cualquier interfaz de materiales con

diferentes propiedades acústicas. Es decir, una interfaz de hormigón-epoxi alteraría la forma de onda, pero no la velocidad. Por lo tanto, al analizar la forma de onda completa y su relación con la amplitud, se puede evaluar si la fisura fue correctamente reparada.

En este sentido, se determinó la amplitud de onda media del elemento y se comparó con la amplitud de onda de cada fisura evaluada a través de su eje longitudinal. En la Figura 16 se puede ver que los puntos con una amplitud por encima del valor medio del elemento habrían sido sellados adecuadamente y los que se encuentran por debajo de este valor habrían sido sellados parcialmente, esto se puede deber, entre otros aspectos, a la fluidez de la resina epóxica que normalmente permite sellar fisuras mayores a 0.5 (mm) de espesor.

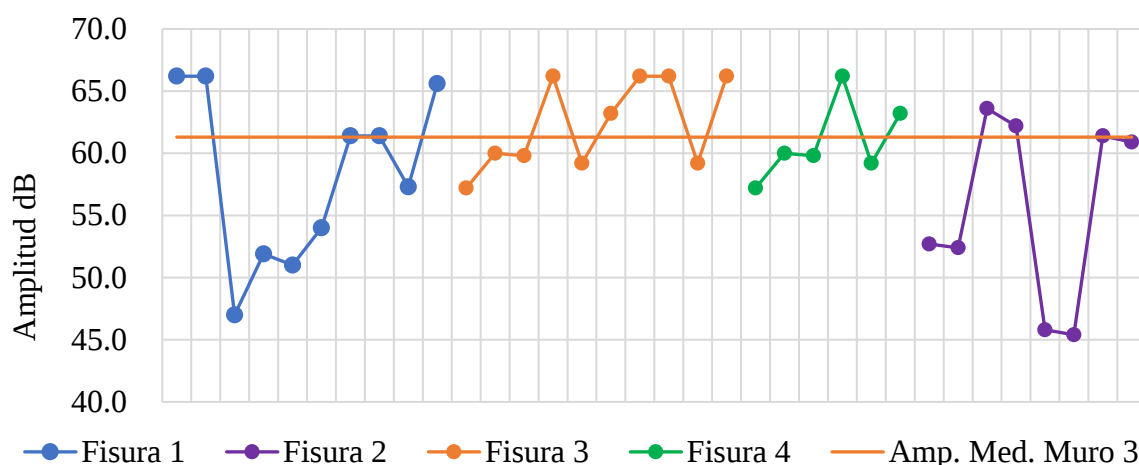


Figura 16. Amplitud de onda en fisuras.

4. DISCUSIÓN RESULTADOS

Los resultados de los tres casos demuestran la viabilidad del uso de END y equipos de VPU para la evaluación estructural. Estos casos corresponden a proyectos en etapa de construcción, lo que permite realizar ensayos complementarios, como calas exploratorias, para obtener una interpretación precisa de las lecturas obtenidas en los ensayos.

El manejo adecuado y la experiencia del operador en la toma de datos son de gran importancia para obtener resultados confiables, al igual que la interpretación correcta y la correlación con otros ensayos complementarios, así como la inspección de los elementos en obra, que son fundamentales para generar recomendaciones y procedimientos de rehabilitación estructural, en caso necesario.

La determinación con bastante aproximación del espesor dañado o de la sección sana de un elemento permiten tomar decisiones rápidas en obra respecto a su rehabilitación o restitución.

El análisis realizado para determinar los espesores dañados en el elemento estudiado tuvo niveles de precisión adecuados que fueron verificados durante la rehabilitación estructural.

Es importante evaluar cuantitativamente un elemento estructural rehabilitado para evitar criterios subjetivos que puedan afectar las decisiones. Esto se evidencia claramente en el tercer caso, donde se logró una mejora del 63% en la uniformidad de los sectores más afectados.

En el análisis de un elemento fisurado el método de amplitud de onda permite generar resultados satisfactorios al momento de evaluar su rehabilitación.

Los valores obtenidos en las lecturas están en concordancia con los valores establecidos en la documentación de referencia. En caso de requerir valores de referencia que reflejen resultados con materiales locales, es necesario realizar investigaciones que proporcionen la información adecuada, basada en estudios realizados en contextos similares.

5. CONCLUSIONES

Los ensayos de VPU son versátiles para evaluar elementos estructurales de hormigón armado. La correcta operación del equipo y la interpretación de los resultados son fundamentales para obtener información importante, que a su vez influye en la generación de planes de reparación y refuerzo estructural, adaptados a las necesidades específicas.

Las anomalías, como la segregación o la formación de nidos, pueden surgir durante los procesos constructivos. Es importante analizar las condiciones particulares del día en que se llevaron a cabo dichos procesos. El análisis de esta información permite desarrollar planes de contingencia para enfrentar eventos pasados.

Es importante tomar en cuenta que, aunque no se deseen, estos eventos pueden ocurrir. Por lo tanto, es necesario tener planes de evaluación mediante END para determinar las condiciones reales de los elementos afectados. Esto facilita el desarrollo de los mejores procedimientos de reparación estructural y también tiene un impacto en los plazos y costos finales de reparación.

Los END han experimentado un notable avance, impulsado por mejoras en la tecnología utilizada. En este sentido, el uso de herramientas de software que incluyen flujos de trabajo de inspección totalmente personalizables facilita la documentación de toda la información en un único lugar mediante la aplicación de IA, además de permitir la realización de inspecciones 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.