

Control de calidad del concreto hidráulico en edades tempranas, utilizando el ensayo ultrasónico

Quality control of hydraulic concrete at early ages using ultrasonic testing



Luis Carlos Calvo-Navarro¹

Fecha de recepción: 8 de mayo, 2025
Fecha de aprobación: 5 de octubre, 2025

Calvo-Navarro, L.C. Control de calidad del concreto hidráulico en edades tempranas, utilizando el ensayo ultrasónico. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 2. Abril-Junio, 2026. Pág. 111-122.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i2.7951>



¹ Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción. Escuela de Ingeniería en Construcción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 lccalvo@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0009-0005-6793-0741>

Palabras clave

Concreto; contenido de aire; control de calidad; onda ultrasónicas; pulso ultrasónico; tiempo de curado; velocidad ultrasónica.

Resumen

El ensayo ultrasónico en el concreto permite determinar una clasificación de calidad, basándose en la magnitud de la velocidad del pulso ultrasónico desde un sensor piezoeléctrico que emite el pulso, hacia otro sensor que lo recibe, atravesando el material analizado. Cualquier discontinuidad que aporte aire a la ruta del pulso afectará el resultado obtenido, debido a que las ondas ultrasónicas no viajan a través del aire. Por tanto, los procesos de diseño, mezcla, colocación y curado del concreto pueden influir en el porcentaje de contenido de aire atrapado dentro de la mezcla o dentro del elemento colado. El presente trabajo, compara los resultados de resistencia a la compresión con el desarrollo de velocidad ultrasónica durante el período de endurecimiento del concreto, para determinar la utilidad del ensayo ultrasónico para el control de calidad de obra constructiva nueva, y así tener resultados confiables de aceptación. El concreto analizado tiene un $f'c$ 210 kg/cm² hecho en batidora estacionaria y el tiempo de curado del concreto es de 28 días. Se logra determinar la confiabilidad del ensayo ultrasónico para la inspección de obra constructiva desde los 7 días de ejecución de las coladas, permitiendo una garantía temprana de la calidad del concreto o una resolución pronta ante resultados adversos detectados por este ensayo no destructivo.

Keywords

Concrete; air content; quality control; ultrasonic wave; ultrasonic pulse; curing time; ultrasonic speed.

Abstract

The ultrasonic test on concrete allows determining a quality classification, based on the magnitude of the ultrasonic pulse velocity from a piezoelectric sensor that emits the pulse, to another sensor that receives it, passing through the analyzed material. Any discontinuity that adds air to the pulse path will affect the result obtained, since ultrasonic waves do not travel through air. Therefore, the design, mixing, placing and curing processes of the concrete can influence the percentage of air content trapped within the mix or within the cast element. The present work compares the compressive strength results with the development of ultrasonic velocity during the hardening period of the concrete, to determine the usefulness of ultrasonic testing for quality control of new construction work, in order to have reliable acceptance results. The analyzed concrete has a $f'c$ 210 kg/cm² made in a stationary mixer and the concrete curing time is 28 days. It is possible to determine the reliability of the ultrasonic test for the inspection of construction work from 7 days after the casting, allowing an early guarantee of the quality of the concrete or a prompt resolution of adverse results detected by this non-destructive test.

Introducción

El ensayo ultrasónico en el concreto es un método de inspección no destructiva que analiza la uniformidad de un material mediante el fenómeno físico de la propagación de ondas a través de un medio. El resultado obtenido se expresa usualmente en unidades de tiempo (μs) o de velocidad (m/s). Este ensayo utiliza un equipo especial que genera un pulso ultrasónico que es transmitido a través de la matriz del material. De manera muy generalizada, se puede

caracterizar la calidad de un concreto de acuerdo con su respuesta ante el ensayo ultrasónico, ya que, los concretos con mayor densidad y menor contenido de vacíos o discontinuidades tienen valores de velocidad ultrasónica altos. De manera inversa, concretos con baja densidad y altos niveles de porosidad, vacíos o agrietamientos presentan velocidades ultrasónicas bajas.

Es común utilizar el ensayo ultrasónico para caracterizar la calidad de estructuras que ya tienen años de construidas, pero también podemos usarlo para verificar la calidad del concreto de obras en proceso de construcción y dentro del período de curado del concreto, complementando los resultados de resistencia a la compresión derivados de probetas cilíndricas. Incluso en ausencia de datos de compresión, el ensayo ultrasónico permite calificar la calidad del concreto basándose únicamente en su resultado de velocidad ultrasónica.

El presente trabajo, analizó el desarrollo de velocidad ultrasónica a través del período de endurecimiento del concreto y se comparó con el desarrollo de resistencia a la compresión, estableciendo edades idóneas para la inspección de obra nueva por medio del ensayo ultrasónico, que permitan calificar la calidad del concreto sin depender del desarrollo de resistencia a la compresión. El ensayo ultrasónico en el concreto tiene como ventaja su posibilidad de ejecución en sitio, un procedimiento no invasivo, reportes en tiempo real y alta precisión en sus datos, permitiendo una toma de decisiones oportuna. Los datos experimentales utilizaron la escala de clasificación del concreto de Maholtra & Carino, 2004, aunque existen otras escalas de clasificación como la aportada por la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA por sus siglas en inglés), aunque existe poca diferencia entre sus rangos de clasificación. El cuadro 1 muestra la dos escalas mencionadas que a la postre son las más recientes.

Cuadro 1. Clasificación de calidad del concreto.

Clasificación de calidad	Velocidad de onda ultrasónica (m/s)	
	IAEA, 2002 [2]	Maholtra & Carino, 2004 [1]
Excelente	> 4500	> 4575
Buena	3500 – 4500	3660 – 4575
Regular	3000 – 3500	3050 – 3660
Pobre	2000 – 3000	2135 – 3050
Muy Pobre	< 2000	< 2135

Marco teórico

Generalidades

El ensayo ultrasónico describe su procedimiento de ensayo de acuerdo con estándares internacionales reconocidos. La norma ASTM C597-22 *Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete*, de la *ASTM International*, indica que, la prueba ultrasónica sirve para la “determinación de la velocidad de propagación de pulsos de ondas de tensión ultrasónicas longitudinales a través del concreto” [3]. La norma EN 12504-4:2021 Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos, indica que; el método de prueba determina “la velocidad de propagación de impulsos de ondas longitudinales ultrasónicas o de ondas transversales ultrasónicas en el hormigón endurecido” [4].

Propagación de ondas

La propagación de las ondas ultrasónicas a través de un medio se relaciona con las propiedades elásticas del material y su densidad, siempre y cuando el medio sea elástico, isotrópico e ilimitado. La relación de dichas características se muestra en la ecuación 1 [5]:

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (1)$$

V = Velocidad de propagación de ondas

E = Módulo de elasticidad

μ = Coeficiente dinámico de Poisson

ρ = Densidad del material

El problema surge cuando el concreto, se comporta como un material heterogéneo con múltiples características físicas, debido a la presencia de una variedad de materiales como el cemento, agregados, agua e incluso el acero. Por tanto, la manera de determinar la velocidad del pulso ultrasónico a través de medios anisotrópicos implica magnitudes que se obtienen al utilizar el equipo ultrasónico: el tiempo que dura la onda ultrasónica en viajar dentro del medio y la distancia entre los transductores. Por analogía, la ecuación para la velocidad ultrasónica en elementos de concreto es la siguiente (ecuación 2) [3]:

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

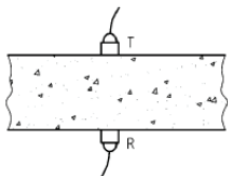
V = Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)

d = distancia entre los transductores (m)

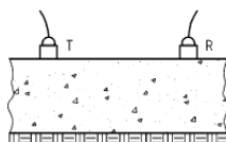
t = tiempo de vuelo de la onda ultrasónica (s)

Metodología ultrasónica

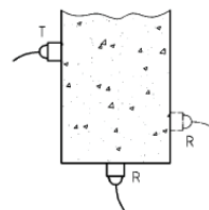
La colocación de los sensores piezométricos se puede realizar utilizando tres métodos distintos: directo, semidirecto e indirecto, como se muestra en la Figura 1. El método directo y semidirecto permiten obtener información de las ondas ultrasónicas que atraviesan la matriz del concreto, mientras que el método indirecto solo obtiene información de las ondas más superficiales liberadas por el sensor.



Método Directo



Método Indirecto



Método Semidirecto

Figura 1. Métodos de inspección ultrasónica en concreto. Fuente, [5]

Se conoce bien la teoría de la transmisión directa, que conserva una mayor energía de la onda ultrasónica transmitida y donde la trayectoria de las ondas es recta entre los dos transductores. Esta metodología provee resultados muy fiables y precisos. Al comparar las velocidades de transmisión de los diferentes métodos ultrasónicos, la posición relativa de los transductores en el método directo se beneficia de la utilidad de las ondas longitudinales o de compresión, que, son las deseables para este ensayo no destructivo. [6]

El método directo ofrece la manera más eficiente de controlar el tiempo de vuelo de los pulsos ultrasónicos, debido a que presenta una mayor sensibilidad y una ruta de viaje mejor definida [7]. La Figura 2 muestra el esquema de ejecución del ensayo ultrasónico en una probeta cilíndrica.

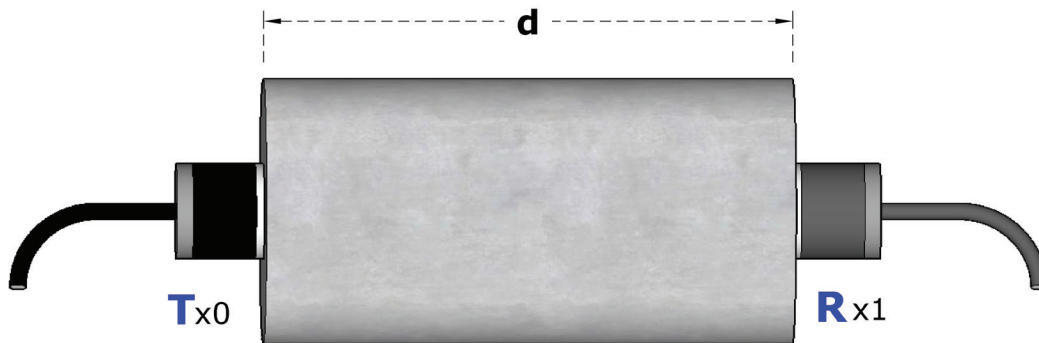


Figura 2. Esquema de la prueba por metodología directa en probetas cilíndricas.

Materiales y métodos (metodología)

Tipo de investigación

El presente trabajo define sus conclusiones a través de resultados cuantitativos, los cuales se obtienen a partir de métodos de investigación experimentales. El tipo de investigación se clasifica como aplicado, ya que busca la utilización de los conocimientos adquiridos al analizar el fenómeno estudiado [8]. Los resultados demuestran la utilidad del ensayo ultrasónico para el control de calidad del concreto en obras nuevas, y determina la edad desde la cual, el concreto ya puede ser inspeccionado con el método ultrasónico, con resultados confiables para la toma de decisiones.

Población y muestreo

La población analizada es el concreto de 210 kg/cm², el cual es el parámetro mínimo de resistencia a compresión definido por el Código Sísmico de Costa Rica 2010 en su sección 8.1.2 [9]; además, dicha resistencia es considerada f'_c , por lo cual, la edad de 28 días determina el período máximo en el cual se ejecutarán mediciones del desarrollo de resistencia y su consecuente análisis del desarrollo de velocidad de onda ultrasónica. Se realizaron mediciones en edades intermedias dentro del proceso de ganancia de resistencia, pero ninguna de ellas menor a las 24 horas desde el moldeo de los especímenes.

La guía ACI 214 cita a su vez la guía ACI 318 indicando que, la cantidad mínima de especímenes necesarios para la evaluación de resistencia es de dos cilindros por edad [10] [11]. La norma ASTM C39 indica que se pueden utilizar dos cilindros para edades inferiores a la de diseño y tres cilindros para la edad de diseño. [12]

La elaboración del concreto y el muestreo respectivo, se ejecutó en las instalaciones del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO), adscrito a la Escuela de Ingeniería en Construcción del Tecnológico de Costa Rica. El CIVCO se encuentra acreditado bajo las normas ISO/IEC 17025:2017 e ISO/IEC 17020:2012, y por ende, su sistema de gestión de calidad sigue procedimientos normalizados para la ejecución de las labores, demostrando competencia técnica en la elaboración de muestreos y ajustando sus ensayos a parámetros de precisión e incertidumbre. Debido a los criterios antes descritos se obtuvieron 3 probetas por cada edad de ensayo, de manera que a nivel estadístico un promedio de datos se obtenga de entre 3 probetas, donde cada ítem equivale a un 33,3% de muestra, y que, en caso de un valor atípico (*outlier*), la cantidad de muestras remanentes todavía evoquen una mayoría porcentual. La cantidad de muestras por cada batida de concreto realizado se describe en el cuadro 2.

Cuadro 2. Tamaño de muestra para cada batida de concreto.

Edad de análisis	1 día	3 días	7 días	10 días	14 días	21 días	28 días	Total
Cantidad de muestras	2 ²	3	3	3	3	3	3	20

Diseño de mezcla de concreto

El diseño de mezcla de concreto se elaboró mediante las recomendaciones de la “Práctica estándar para seleccionar proporciones para concreto normal, pesado y masivo” ACI 211.1-91 [13]. Se utilizaron tres tamaños máximos nominales (TMN) de agregado grueso utilizados en la construcción en general, permitiendo una mayor generalización del concreto $f'c$ 210 kg/cm² y verificar si había una disminución en la velocidad ultrasónica que se pudiera atribuir al cambio de TMN, de acuerdo con los valores de aire atrapado dentro del concreto descritos en la tabla A1.5.3.3 del ACI 211.1-91 [13].

Ejecución de ensayos

La fase experimental del presente trabajo se estratificó en varias etapas secuenciales descritas en la Figura 3.

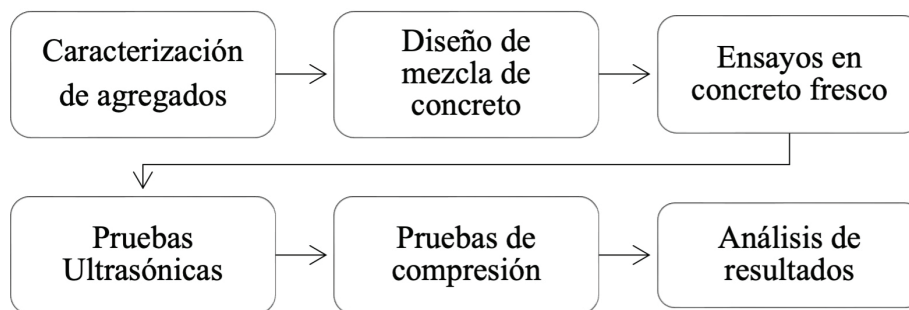


Figura 3. Esquema de la fase experimental del trabajo de investigación.

2 La evaluación a 24 horas de edad puede presentar una mayor variabilidad debido a que el proceso de curado inicial no mantiene condiciones iguales para las tres batidas, ya que las muestras continúan en sus moldes y no dentro de una cámara húmeda con condiciones controladas. Las pruebas ultrasónicas y de compresión a 24 horas se efectuaron justo al momento del desencofrado.

Resultados

La evaluación de probetas cilíndricas brindó resultados tanto de resistencia a la compresión como de velocidad ultrasónica. Estos resultados se grafican para observar las curvas de desarrollo a través del tiempo de curado del concreto. Los resultados de los tres concretos con diferente TMN, cumplen con la resistencia de diseño solicitada y mantienen una curva típica de desarrollo de resistencia a la compresión. Los resultados de resistencia se presentan en el cuadro 3 y la Figura 4.

Cuadro 3. Resultados promedio de resistencia a la compresión.

TMN		25 mm	19 mm	12 mm	Promedio
1 día	kg/ cm ²	32,4	33,5	28,1	31,3
3 días		74,8	82,2	79,0	78,6
7 días		123	129	129	127
10 días		151	155	149	152
14 días		161	175	171	169
21 días		180	199	196	192
28 días		217	220	223	220

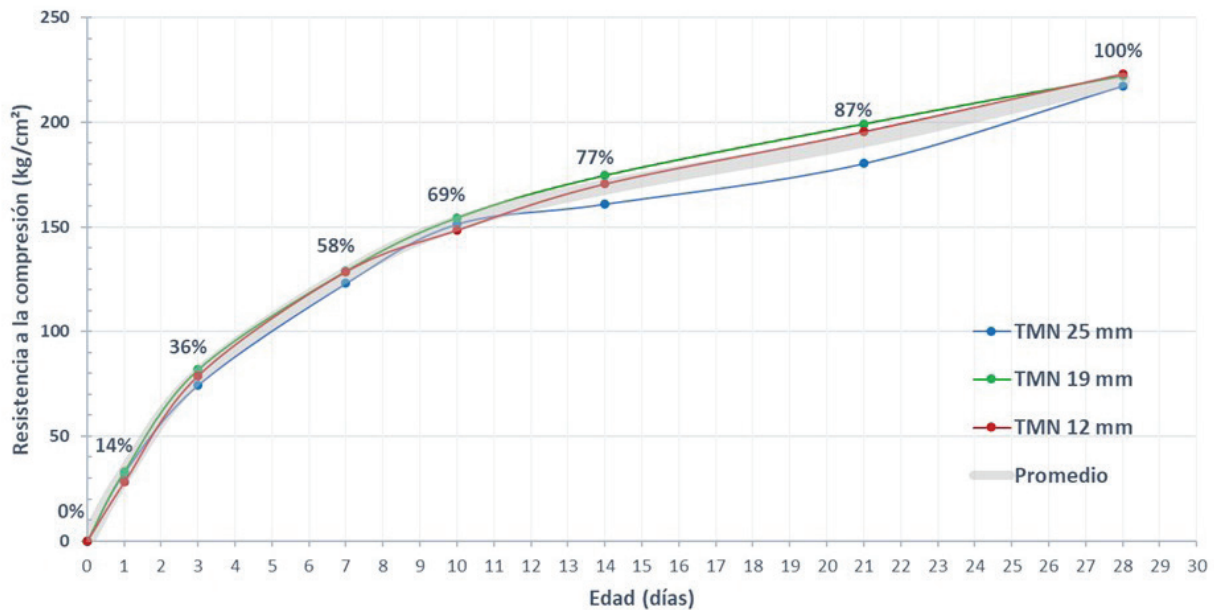


Figura 4. Desarrollo de resistencia a la compresión en los concretos analizados.

En el caso de la velocidad ultrasónica, los tres concretos muestran una diferencia visualmente notoria en los resultados obtenidos, pero la curva de desarrollo de velocidad ultrasónica sigue la misma evolución a través del tiempo para cualquiera de los concretos analizados. Las tres mezclas de concreto alcanzan la clasificación de Bueno, según los criterios de Maholtra & Carino. [1], ya que a partir de los 3660 m/s, el concreto ingresa a esta clasificación. Los resultados de velocidad ultrasónica se presentan en el cuadro 4 y se grafican en la Figura 5, comparando los resultados con la escala de clasificación de Maholtra & Carino [1].

Cuadro 4. Resultados promedio de velocidad ultrasónica.

TMN		25 mm	19 mm	12 mm	Promedio
1 día	m/s	2548	2448	2819	2607
3 días		3641	3396	3347	3464
7 días		3831	3674	3574	3683
10 días		3929	3784	3603	3767
14 días		4095	3863	3703	3869
21 días		4176	3913	3739	3890
28 días		4231	3963	3808	3940

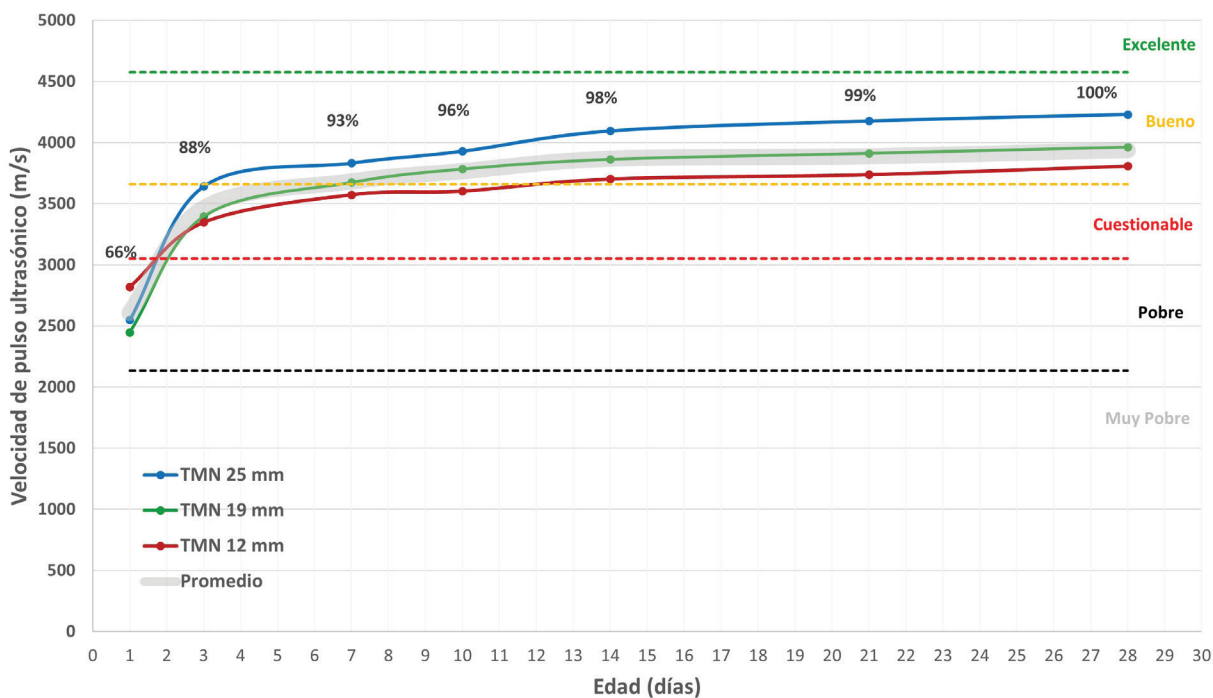


Figura 5. Desarrollo de velocidad ultrasónica en los concretos analizados y su comparación con la clasificación de Maholtra & Carino, 2004.

Tomando la edad de 28 días como la máxima ganancia, tanto de resistencia a la compresión como de la velocidad ultrasónica, se tabulan los porcentajes de ganancia en cada edad en la que se ejecutaron los ensayos. El cuadro 5 y la Figura 6 muestran este comparativo.

Cuadro 5. Porcentajes de ganancia de las magnitudes estudiadas a través del tiempo.

Edad (días)	Ganancia resistencia a la compresión	Ganancia velocidad ultrasónica	Velocidad ultrasónica Promedio (m/s)	Clasificación [1]
1	14 %	66 %	2607	Pobre
3	36 %	88 %	3464	Cuestionable
7	58 %	93 %	3683	Bueno
10	69 %	96 %	3767	Bueno
14	77 %	98 %	3869	Bueno
21	87 %	99 %	3890	Bueno
28	100 %	100 %	3940	Bueno

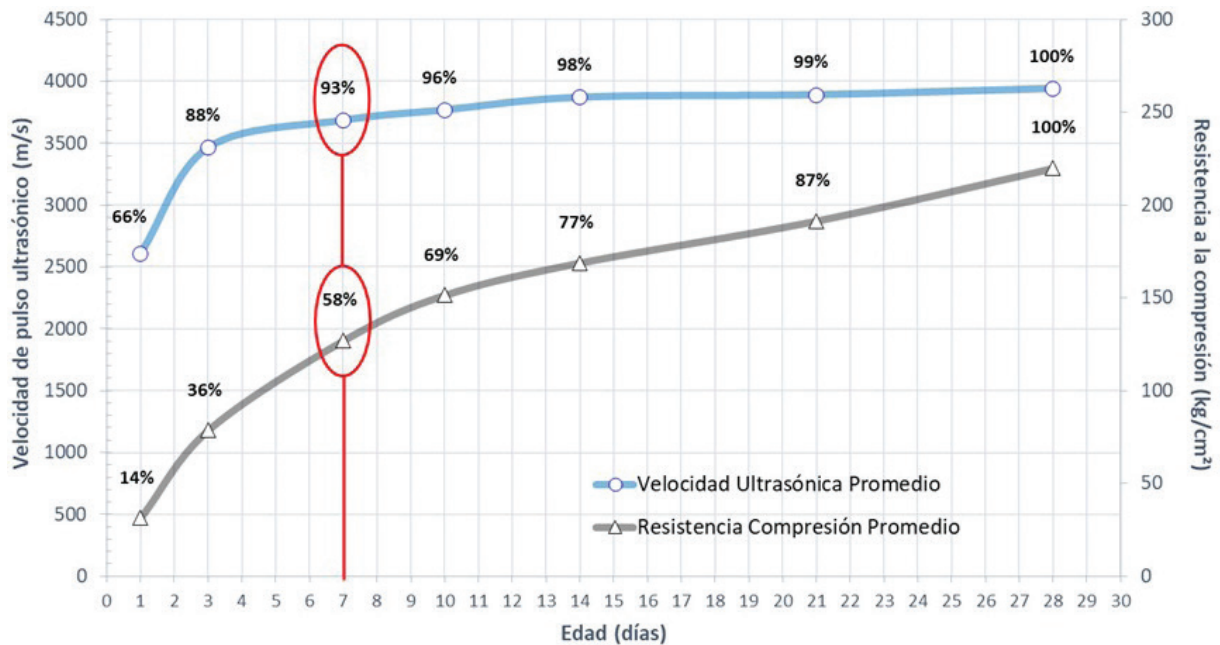


Figura 6. Desarrollo porcentual de velocidad ultrasónica y resistencia a la compresión en el tiempo.

Discusión

El análisis de los porcentajes de ganancias obtenidos a partir de las curvas de desarrollo promedio nos permite visualizar que, un concreto $f'c$ 210 kg/cm² con 7 días de colado, desarrolla un 58% de la resistencia a la compresión esperada a 28 días y, en el caso de la velocidad ultrasónica, para la misma edad, se tiene un 93% de ganancia. Mientras la curva de resistencia a la compresión aún le falta un 42% de desarrollo, la velocidad ultrasónica solo tendrá un incremento de 7% en los siguientes 21 días. La edad de 7 días se posiciona como un buen punto de partida para la inspección de concreto recién colado mediante el ensayo ultrasónico. Las edades de 1 y 3 días no se consideran ideales para una inspección ultrasónica debido a que en ellas ocurren los mayores incrementos de velocidad ultrasónica.

En cuanto a clasificación de calidad, la edad de 7 días nos presenta un valor de velocidad ultrasónica promedio de 3683 m/s, clasificándose el concreto como Bueno, y al finalizar el período de 28 días, la velocidad ultrasónica tiene un valor de 3940 m/s, manteniéndose en la misma escala de clasificación. No ocurre así con la resistencia a la compresión, que entre 7 y 28 días aún tiene un margen de crecimiento considerable.

Sin compararnos el ensayo ultrasónico con otro ensayo no destructivo que pueda brindarnos parámetros de calidad del concreto de obra nueva, podríamos utilizar la esclerometría (martillo Schmidt) que mediante un mecanismo de rebotes nos permite obtener la dureza superficial del concreto evaluado; sin embargo, esta metodología tiene algunas limitaciones como: el requerimiento de una superficie lisa donde el mecanismo golpea, el tamaño y espesor del elemento evaluado, la edad del concreto ya que la ejecución del ensayo en edades tempranas o con resistencias bajas pueden dañar la superficie del elemento analizado [1] y por último, la precisión del ensayo, que tiene cierta permisividad en el rango de resultados admitido. En contraparte, el ensayo ultrasónico es un equipo que se calibra previo a la ejecución del ensayo, utiliza una variedad de acoplantes con cierta viscosidad que permite garantizar el contacto con la superficie de concreto, las diferencias en el tamaño o espesor de un elemento se pueden solventar modificando la frecuencia del transductor utilizado y la precisión admitida por norma debe ser inferior al 2%. Los análisis de esta investigación se obtuvieron a partir de 20 probetas por concreto colado, para un total de 60 probetas. En ellas se ejecutaron 810 determinaciones ultrasónicas con una variabilidad de los resultados de entre 0,32% y 1,97%, dependiendo del concreto y edad analizados.

Conclusiones

La relación entre la resistencia a la compresión y la velocidad ultrasónica no es proporcional para todas las edades. En edades tempranas, la velocidad ultrasónica aumenta rápidamente, mientras que, a partir de los 7 días de edad, mantiene un comportamiento bastante lineal hasta los 28 días. La resistencia a la compresión no tiene este comportamiento, sigue una curva ascendente bastante gradual a través del tiempo y su pendiente dependerá del proceso de reacción química inherente al endurecimiento del concreto hidráulico y su proceso de curado.

Utilizando la clasificación del concreto según Maholtra y Carino [1], se determina que, a 7 días de edad, un concreto convencional $f'c$ 210 kg/cm², ya tiene una Buena calificación de calidad, y en los 21 días restantes solo desarrollará en promedio 7% más de velocidad, lo cual mantendrá su calificación invariable. Si se inspecciona un concreto de obra nueva a los 7 días de edad, un valor de velocidad ultrasónica aceptable permite una confianza en el proceso ejecutado sin realizar una inspección invasiva. En caso de obtenerse un resultado de velocidad ultrasónica deficiente, tenemos un alto nivel de confianza para tomar decisiones prontas, sin la necesidad de esperar 28 días para el desarrollo de resistencia a la compresión.

La velocidad ultrasónica depende en gran medida de la elaboración de la mezcla de concreto y la colocación dentro de los elementos estructurales a construir, ya que se debe evitar que estos procesos generen aire dentro del concreto, vacíos por evaporación del agua (curado incorrecto) o discontinuidades que generen agrietamiento interno o externo en la estructura colada. Cualquiera de estas fallas iniciales puede afectar el proceso de densificación del material o la respuesta elástica del concreto, y estas variables afectan el resultado del ensayo ultrasónico.

La ejecución del ensayo ultrasónico es preferible mediante el método directo, ya que el pulso ultrasónico atraviesa la matriz del material analizado completamente. Realizar inspecciones ultrasónicas en obras recién construidas, con edades de entre 7 y 10 días, garantiza que aún no se colocan instalaciones mecánicas, repellos o acabados que eviten el correcto acoplamiento

de los transductores ultrasónicos o que eviten alcanzar caras opuestas de la estructura a analizar. Lo anterior permite realizar una mayor cantidad de ensayos en una sola inspección, mayor cobertura de elementos estructurales y resultados en tiempo real, con alta confiabilidad estadística.

Recomendaciones

El ensayo ultrasónico se puede utilizar para inferir resistencia a la compresión, pero se requiere acompañar la inspección ultrasónica con la ejecución de muestras de concreto en probetas que permitan la correlación. Incluso una muestra patrón con la calidad deseada, puede ser insumo para una evaluación comparativa mediante el ensayo ultrasónico. En ausencia de muestras para resistencia a la compresión, el ensayo ultrasónico aún provee parámetros de calidad y confianza en sus resultados sin importar la edad de ensayo.

A pesar de la modernización de los equipos de medición y la mejoras tecnológicas que ofrecen los dispositivos de inspección no destructiva en la actualidad, el control de calidad del concreto en nuestro país sigue determinándose casi en su totalidad, por la resistencia a la compresión del concreto. A pesar de esta aseveración, el control de calidad del concreto no es una constante en los proyectos constructivos hoy en día, y se justifica la experiencia, los diseños de mezcla empíricos o la subcontratación, para no evaluar la calidad del concreto o para realizar solo una muestra al inicio del proyecto que representa globalmente el diseño de mezcla utilizado, sin considerar las variables que afectan la uniformidad de las batidas de concreto.

En la actualidad, se desea eficiencia y eficacia en el proyecto constructivo, pero en ocasiones esto justifica algunas falencias de ejecución, monitoreo y control. Esta investigación propone una forma innovadora de brindar inspección de calidad, sin ser invasivos en el proceso de construcción y que puede generar conclusiones confiables sin depender obligatoriamente de la resistencia a la compresión.

Trabajo futuro

- El ensayo ultrasónico también admite el método indirecto de inspección, y algunos elementos de concretos como losas y muros pueden solamente revisarse bajo este método. Se puede promover la investigación del porcentaje de ganancia de velocidad ultrasónica por medio del método indirecto y correlacionarla tanto con la resistencia a la compresión, como con los valores de velocidad ultrasónica por método directo.
- Investigar otras resistencias de diseño (f'_c) del concreto, pueden brindar un mayor alcance de los comportamientos y tendencias del ensayo ultrasónico. Este trabajo se limitó a la resistencia de 210 kg/cm², dado que es el más común en obra convencional.
- Algunos elementos estructurales de tipo prefabricado, pretensado o postensado solo pueden revisarse en campo, y a su vez, utilizan concretos con aditivos que incrementan resistencia, reducen el agua requerida para la mezcla, retardan el proceso de fraguado o lo aceleran. Investigar la respuesta del ensayo ultrasónico en este tipo de elementos o de concretos adicionados puede brindarnos nuevas aplicaciones de uso para los ensayos no destructivos.
- Dada la sensibilidad del ensayo ultrasónico a detrimentos de densidad o al aumento del aire dentro de una estructura de concreto, se puede sugerir la investigación de concretos que han sido expuestos al eventos de incendio o a diversas patologías que pueden mermar la capacidad estructural del concreto, y que, a partir de la prueba ultrasónica pueda determinarse la calidad remanente y la viabilidad o no de restaurar o reutilizar una estructura dañada.

Agradecimientos

Se agradece a la Escuela de Ingeniería en Construcción del Tecnológico de Costa Rica por el soporte brindado para la ejecución de esta investigación, así como al Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción por el aporte del equipo ultrasónico, instalaciones del laboratorio y tiempo de ejecución.

Referencias

- [1] International Atomic Energy Agency, «Guidebook on non-destructive testing of concrete structures,» Vienna, 2002.
- [2] V. M. Maholtra y N. Carino, Nondestructive Testing of concrete, Florida: CRC Press, 2004.
- [3] ASTM International, «Designation C597 – 22 Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete,» 2022.
- [4] Asociación Española de Normalización, «EN 12504-4:2021 Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos,» Madrid, 2022.
- [5] A. Domato Jayo, «Ultrasonidos: principios generales y alcance,» International Atomic Energy Agency (IAEA), 2022.
- [6] J.-L. Henry y A. Aguado De Cea, «Optimización del control de la resistencia del hormigón de la obra de la depuradora del Besós mediante ultrasonidos,» Barcelona, 2003, pp. 28-61.
- [7] O. Carrasco y A. Freitas , «Evaluación de la influencia del acero de refuerzo en la aplicación del ensayo de velocidad de pulso ultrasónico en elementos de concreto armado,» Caracas, 2014.
- [8] O. Narváez Trejo y L. Villegas Salas, «Introducción a la investigación:,» Universidad Veracruzana, 2014.
- [9] Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica, Código Sísmico de Costa Rica, Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2010.
- [10] American Concrete Institute, «Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete (ACI 214R-11),» United States, 2011.
- [11] American Concrete Institute, «Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318SUS-14) y Comentario (ACI 318SUSR-14),» United States, 2015.
- [12] ASTM International, «Designation C39/C39M – 24 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens,» 2024.
- [13] American Concrete Institute, «Standar Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweighth, and Mass Concrete (ACI 211.1-91),» 2002.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Utilizamos la herramienta de inteligencia artificial *DeppL.com* para traducir el resumen de este artículo del español al inglés. La herramienta nos ayudó a agilizar el proceso de traducción, pero realizamos una revisión exhaustiva para asegurar la calidad y precisión de las traducciones.