

Influencia del contenido aire en la calidad del concreto determinado mediante pruebas de ensayos ultrasónicos

Influence of air content on concrete quality determined by ultrasonic testing

Luis Carlos Calvo-Navarro¹

Fecha de recepción: 17 de agosto, 2025

Fecha de aprobación: 19 de enero, 2026

Calvo-Navarro, L.C. Influencia del contenido aire en la calidad del concreto determinado mediante pruebas de ensayos ultrasónicos. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 N° 3. Julio-Setiembre, 2026. Pág. 148-163.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i3.8062>



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 ultrasónica; pulso ultrasónico; tiempo de curado; velocidad ultrasónica.

Resumen

La prueba de medición de velocidad del pulso ultrasónico es un ejemplo de ensayo no destructivo (END) que se ejecuta en elementos de concreto, y que permite determinar la calidad de este, basándose en la magnitud de la velocidad del pulso ultrasónico obtenida de la prueba. Los END, permiten realizar inspecciones en sitio, no invasivas, con resultados en tiempo real y con facilidad de ejecución, incluso durante el proceso constructivo. La física de este ensayo se basa en el envío de pulsos a frecuencias ultrasónicas que son susceptibles a la densidad del material evaluado, al contenido de aire en su interior (vacíos) y a los agrietamientos o discontinuidades existentes. Esta capacidad, es de gran utilidad al evaluar concreto hidráulico, ya que, de manera generalizada, se evita que las estructuras de concreto tengan vacíos, grietas o poca densidad, ya que cualquiera de estas condiciones disminuye las capacidades estructurales deseables en el concreto. La presente investigación, determina la influencia que tiene el contenido de aire atrapado dentro del concreto, en el tránsito de ondas ultrasónicas a través de este, y la disminución de velocidad ultrasónica debido al aumento de una cuantía mínima de aire dentro de la mezcla de concreto.

Keywords

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

Abstract

The ultrasonic pulse velocity measurement test is an example of non-destructive testing (NDT), which is performed on concrete elements, and allows to establish the quality of the concrete, based on the magnitude of the ultrasonic pulse velocity obtained from the test. NDT allows on-site, non-invasive inspections, with real time results and ease of execution, even during the construction process. The physics of this test is based on sending pulses at ultrasonic frequencies that are susceptible to the density of the material being evaluated, the air content in its interior (voids) and the existing cracks or discontinuities. This capability is very useful when evaluating hydraulic concrete, since, in a generalized way, it avoids that concrete structures have voids, cracks or low density, since any of these conditions diminishes the desirable structural capabilities of concrete. The present investigation determines the influence that the content of air trapped inside the concrete has on the transit of ultrasonic waves through it, and the decrease of ultrasonic velocity due to the increase of a minimum amount of air inside the concrete mixture.

Introducción

El ensayo ultrasónico es un método de prueba no invasiva que permite analizar la uniformidad interna de un material, en este caso, del concreto; mediante la disposición de un transductor que emite un pulso ultrasónico que atraviesa el medio y otro transductor que recibe la señal y determina el tiempo de vuelo y la velocidad de la onda ultrasónica. La utilidad de este ensayo en el control de calidad del concreto procede de la sensibilidad de la onda ultrasónica a la presencia de aire en el medio analizado. Esto se debe a que la frecuencia de trabajo

de los pulsos ultrasónicos no se transmite a través de las partículas gaseosas, debido a la separación de éstas, y el aire atrapado en cualquier elemento de concreto no aporta ninguna ventaja estructural, por lo cual, el ensayo ultrasónico se convierte en una excelente forma de determinar la calidad del concreto. De manera general, la velocidad ultrasónica es alta en concretos con buena densidad y bajos contenidos de vacíos o discontinuidades, mientras que, la velocidad ultrasónica es baja cuanto menor densidad y mayor nivel de porosidad, vacíos o agrietamientos estén presentes el concreto analizado. Existen al menos tres procesos que pueden modificar el contenido de aire dentro del concreto endurecido: el diseño de la mezcla, la colocación del concreto y el curado correcto. El diseño de la mezcla del concreto determina si existe aire incluido o no dentro de la mezcla, y el contenido de aire depende en particular de los agregados utilizados para la producción de concreto y de su tamaño máximo nominal. El proceso de colocación implica factores de trabajabilidad, vibrado y segregación que, de no ejecutarse apropiadamente, promueven los vacíos o la mala densificación de la estructura colada. El proceso de curado implica factores químicos de endurecimiento y aumentos de temperatura por calor de hidratación del cemento hidráulico utilizado en el concreto, que, si no se controlan, dejarán vacíos por evaporación del agua utilizada para la mezcla. Los detrimentos en las actividades de diseño, colocación y curado del concreto dispondrán de una menor o mayor presencia de aire dentro del concreto endurecido y, por ende, de un resultado menor o mayor de velocidad ultrasónica.

Marco teórico

Estándares

El ensayo ultrasónico se ejecuta según 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” [1]. 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” [2].

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.

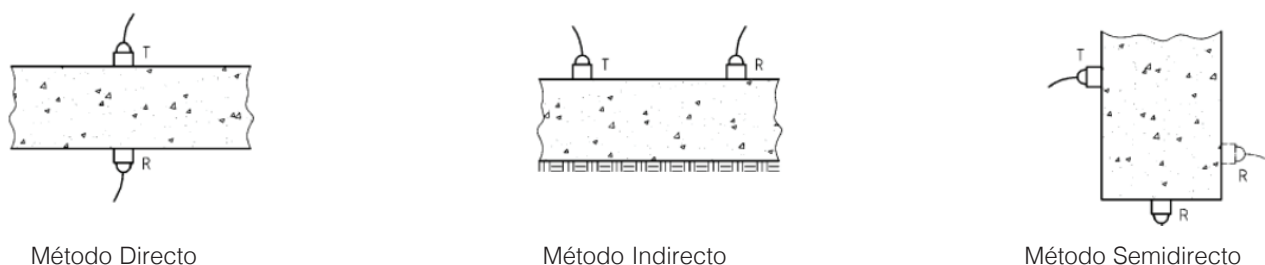


Figura 1. Métodos de inspección ultrasónica en concreto. Fuente, [3]

Se conoce bien la teoría de la transmisión directa, en la cual la trayectoria de las ondas es recta entre los dos transductores y con una mayor energía. Este 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, de manera general, son la más deseables para este ensayo no destructivo [4].

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 [5].

La metodología indirecta se emplea en situaciones donde únicamente es accesible una cara del elemento de concreto, así como en la evaluación de la profundidad de fisuras superficiales. La disposición de los transductores en esta metodología presenta una menor sensibilidad que las metodologías directas y semidirectas. Para una misma longitud de trayectoria, la amplitud de la señal registrada en el transductor receptor representa solo una fracción reducida (aproximadamente entre el 2% y el 3%) en comparación con la obtenida mediante transmisión directa. Además, las mediciones de velocidad ultrasónica obtenidas bajo esta configuración están condicionadas por las propiedades del concreto cercano a la superficie, donde puede haber diferencias en composición y características a las del interior del elemento, limitando la representatividad de los resultados. [6]

En términos generales, la velocidad de pulso determinada mediante transmisión indirecta resulta inferior a la correspondiente a la transmisión directa en un mismo elemento, con diferencias que pueden oscilar entre el 5% y el 20%, dependiendo principalmente de la calidad del concreto analizado. Por esta razón, se recomienda la realización de mediciones in situ que permitan cuantificar dicha discrepancia y adicionalmente, es conveniente efectuar múltiples mediciones variando la separación entre transductores para establecer una velocidad ultrasónica promedio más certera. [6]

Las consideraciones de ejecución ultrasónica mencionadas en los apartados anteriores son las que determinan que la se utilizara el método directo para el presente estudio, dado que sus resultados se obtienen a partir de una metodología con mayor sensibilidad, trayectorias de viaje del pulso ultrasónico bien definidas y la disposición de dos caras opuestas planas dentro de las probetas cilíndricas utilizadas para la investigación. La Figura 2 muestra el esquema de ejecución del ensayo ultrasónico en una probeta cilíndrica que se utilizará tanto para la determinación de velocidad ultrasónica como para la resistencia a la compresión.

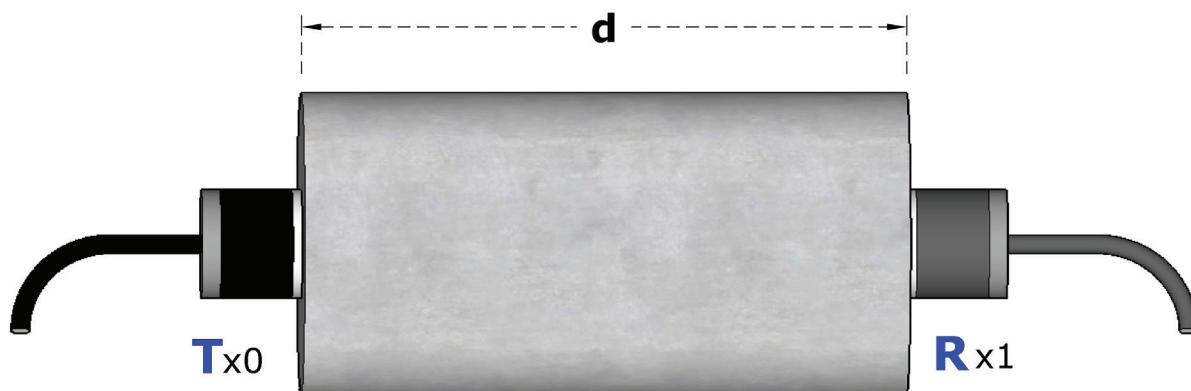


Figura 2. Esquema de la prueba por metodología directa en probetas cilíndricas.

Velocidad ultrasónica

La propagación de 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 siguiente ecuación: [3]

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

V = Velocidad de propagación de ondas.

E = Módulo de Elasticidad.

μ = Coeficiente dinámico de Poisson. [1]

ρ = Densidad del material.

El concreto, no se apeg a la hipótesis de un material elástico, isotrópico e ilimitado, si no, a un material heterogéneo con múltiples características físicas, debido a la variabilidad de los materiales que lo conforman, tales como: cemento, agregados, agua, aire e incluso aditivos. Por tanto, otra manera de determinar la velocidad del pulso ultrasónico a través de un medio implica magnitudes que se pueden obtener al utilizar el equipo ultrasónico: la distancia entre los transductores y el tiempo que dura la onda ultrasónica en viajar dentro del medio. Por consiguiente, la ecuación que rige la obtención de la velocidad ultrasónica aún en medios heterogéneos como el concreto se obtiene la siguiente forma:

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

V = Velocidad de pulso ultrasónico (m/s).

d = Distancia entre los transductores (m). [1]

t = Tiempo de vuelo de la onda ultrasónica (s).

El resultado de la prueba ultrasónica se utiliza para la clasificar la calidad del concreto según la velocidad ultrasónica admitida por el concreto. Para la clasificación se utiliza la escala de Maholtra & Carino (2004), que se muestra en el cuadro 1.

Cuadro 1. Clasificación de calidad del concreto. Fuente, [7].

Clasificación de calidad	Velocidad de onda ultrasónica (m/s)
Excelente	> 4575
Buena	3660 – 4575
Regular	3050 – 3660
Pobre	2135 – 3050
Muy Pobre	< 2135

Contenido de aire dentro de la 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 [8]. Se utilizaron tres configuraciones de tamaño máximo nominal (TMN) de agregado grueso, para verificar la afectación en la velocidad ultrasónica atribuible al porcentaje de aire atrapado en la mezcla debido a la iteración de TMN en el concreto. La tabla A1.5.3.3 de la ACI 211.1-91 indica que existe un aumento en el contenido de aire atrapado dentro de la mezcla conforme se disminuye el TMN [7]. La Tabla 2 muestra el extracto de la tabla A1.5.3.3 de la ACI 211.1-91 que indica los contenidos de agua y aire aproximados para considerar en el diseño de mezcla de concreto, pero sin aire incorporado de manera adicional. Estos valores de aire atrapado corresponden exclusivamente a los aportados por el tipo de agregado grueso utilizado. Los TMN utilizados para el análisis experimental fueron de 12,5, 19 y 25 mm y las consideraciones de agua y aire para diseño de mezcla se señalan en el cuadro 2.

Cuadro 2. Contenidos de agua y aire aproximados para concretos sin aire incorporado [8].

Revenimiento (mm)	Agua (kg/m ³ de concreto de los tamaños máximos nominales de agregado indicados)							
	9,5	12,5	19	25	37,5	50	75	150
25 a 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 a 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 a 175	243	228	216	202	190	178	160	---
Cantidad aproximada de aire atrapado (%)	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2

Influencia del contenido de aire en la velocidad ultrasónica

Si se considera que la velocidad ultrasónica depende de propiedades elásticas y la densidad del medio en el cual se propagan las ondas (Ecuación 1), la señal ultrasónica demora menos tiempo cuando se transmite a través de sólidos y líquidos, sin embargo, cuando pasa de un medio sólido a uno gaseoso, se genera una dispersión de la onda, causando un incremento en el tiempo que le toma viajar del emisor del equipo al receptor, afectando el resultado de velocidad ultrasónica [9]. Esta particularidad genera que, distintos porcentajes de aire atrapado en la mezcla por iteraciones de TMN, sean susceptibles a la detección por parte del ensayo ultrasónico.

En el caso del concreto hidráulico, cuando una onda ultrasónica se propaga a través de este y se encuentra una interfaz entre el material y el aire, la transmisión de energía a través de esta frontera es prácticamente nula. En consecuencia, la presencia de cavidades llenas de aire ubicadas directamente entre los transductores puede interrumpir el paso del pulso ultrasónico. En estas condiciones, la primera señal que alcanza al receptor corresponde a un pulso que se ha desviado alrededor del contorno de la cavidad, lo que provoca un incremento en el tiempo de tránsito en comparación con un concreto homogéneo, denso y sin vacíos. [6]

Marco metodológico

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 normalizados. El tipo de investigación según su propósito se puede clasificar como básica o pura, ya que se pretende aumentar el conocimiento sobre un fenómeno conocido, en este caso el aumento de contenido de aire en la mezcla de concreto ocasionado por la disminución del TMN del agregado grueso, observado a través de los resultados de velocidad ultrasónica en el concreto. La investigación también incluye una arista correlacional, ya que se pretende observar la relación entre variables que afectan directamente el resultado de velocidad ultrasónica, que en este caso son: la edad que tiene el concreto al momento de la medición y el contenido de aire dentro de la mezcla. [10].

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 (CSCR) en su sección 8.1.2 [11]; 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. La cantidad de especímenes es sugerida por la guía ACI 214, que, a su vez, cita a la guía ACI 318 indicando que, la cantidad mínima de especímenes necesarios para la evaluación de resistencia es de dos cilindros por edad, si estos son de la misma batida [12] [13]. 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 [14].

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, por lo cual, 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 criterios de precisión e incertidumbre. Los criterios anteriores determinaron la obtención de tres probetas por cada edad de ensayo, de manera que a nivel estadístico un promedio de datos se obtenga de entre tres resultados, donde cada ítem equivale a un 33,3% de la muestra, y que, en caso de un valor atípico (*outlier*), la cantidad de ítems remanentes todavía evoquen una mayoría porcentual. Se evaluaron probetas cilíndricas a 1, 3, 7, 10, 14, 21 y 28 días de edad. Solamente las evaluaciones de 1 día de edad se hicieron con dos probetas, debido a la alta variabilidad que se puede esperar en sus resultados debido a las condiciones de curado inicial dentro de los moldes, las cuales se ajustan a las condiciones ambientales de las instalaciones. Las edades restantes, tienen un proceso de curado con temperatura y humedad relativa controlada dentro de una cámara húmeda.

Limitaciones de la investigación

El concreto es un material sujeto a una variedad de consideraciones de diseño, muy en particular la resistencia objetivo que se plantea al inicio de cualquier proyecto constructivo. La medición ultrasónica a través del concreto podría requerir una amplitud de resistencias de diseño bastante grande para generalizar conclusiones de una investigación, pero factores de orden temporal limitaron la cantidad de diseños de mezcla posibles a ejecutar para la consecución

de una cantidad de resultados finales estadísticamente aceptables. La utilización de diseños de mezcla de varias resistencias $f'c$ hubiera requerido de un tiempo mayor de evaluación, tanto de la compresión como de la velocidad ultrasónica, por lo cual, la investigación se limitó al parámetro mínimo de resistencia a la compresión descrito en el CSCR, el cual es de $f'c$ 210 kg/cm².

Es importante destacar que la respuesta ultrasónica ante cambios en la resistencia de diseño podría no ser tan representativa cuando se está estudiando la influencia del aire dentro de la mezcla de concreto. Para esta consideración, la variabilidad en el contenido de aire aportado por las iteraciones de TMN se convierte en una variable de mayor peso al momento de considerar la población y muestreo requeridos en la investigación.

Diseño de mezcla de concreto

Siguiendo las consideraciones para el diseño de mezcla aportados por la guía ACI 211.1-91 [8], se ejecutaron ensayos de caracterización de los agregados requeridos para las batidas de concreto y así realizar el proporcionamiento de mezcla adecuado para la fabricación de concretos de 210 kg/cm². El cuadro 3 muestra los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización efectuados.

Cuadro 3. Caracterización de agregados para diseño de mezcla de concreto.

Agregado		Grueso			Fino	Estándar
		25 mm	19 mm	12 mm	Arena	
Número de tamaño		56	67	7		ASTM C33/C33M-23
Peso unitario suelto	kg/m ³	1493	1457	1435	1365	ASTM C29/C29M-17a
Peso unitario compactado	kg/m ³	1635	1619	1617	1490	
Gravedad específica bruta		2,647	2,633	2,579	2,420	ASTM C127-15 ASTM C128-22
Gravedad específica sss		2,691	2,686	2,649	2,607	
Gravedad específica aparente		2,769	2,781	2,773	2,975	
Absorción	%	1,67	2,01	2,72	7,71	ASTM C117-17
Lavado malla N°200	%	0,20	2,00	0,60	3,40	
Módulo de finura					3,21	ASTM C136/C136M-19

Una vez que se tienen las propiedades de los agregados, podemos proporcionar el concreto, determinando revenimientos a utilizar, resistencias requeridas ($f'cr$), relación agua cemento (A/C) y muy en particular, el contenido de aire atrapado en la mezcla según cada TMN utilizado. El cuadro 4 muestra las proporciones de los diseños de mezcla utilizados para la fase experimental.

Cuadro 4. Diseños de mezcla de concreto según su TMN.

Tamaño Máximo Nominal		12 mm	19 mm	25 mm
Revenimiento	mm	150 - 175		
Agua	litros	228	216	202
Contenido de aire atrapado (ACI 211.1-91)	%	2,5	2	1,5
f'c	kg/cm ²	210		
f'cr	kg/cm ²	281		
Relación A/C		0,59		
Contenido de Cemento	kg	395	375	355
Agua corregida por humedad y absorción de agregados	litros	263	241	224
Agregado grueso				
Volumen	litros	308	365	413
Peso seco	kg	815	925	1016
Volumen bruto	m ³	0,316	0,351	0,384
Agregado fino				
Volumen	litros	298	265	243
Peso seco	kg	699	599	529
Volumen bruto	m ³	0,29	0,63	0,656
Concreto				
Peso unitario teórico	kg/m ³	2137	2116	2102

Resultados

Una vez realizadas las batidas de concreto, se realizaron los ensayos en concreto fresco, sobre todo, para la determinación real del peso unitario y del contenido de aire atrapado dentro de la mezcla. El cuadro 5 muestra los resultados de los ensayos en concreto fresco efectuados.

Cuadro 5. Resultados de ensayos en concreto fresco.

TMN		25 mm	19 mm	12 mm	Estándar
Revenimiento	mm	150	115	120	ASTM C143/ C143M – 20
Temperatura	°C	24,4	24,5	24,8	ASTM C1064/ C1064M – 17
Peso Unitario	kg/m ³	2296	2253	2208	ASTM C138/ C138M – 23
Contenido de Aire	%	0,9	1,5	1,8	

Posteriormente se ejecutaron los ensayos de velocidad ultrasónica y resistencia a la compresión. Estos resultados se utilizan para observar su desarrollo a través del tiempo de curado del concreto, hasta alcanzar la edad de 28 días. El cuadro 6 y la Figura 3 muestran los resultados de compresión.

Cuadro 6. 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

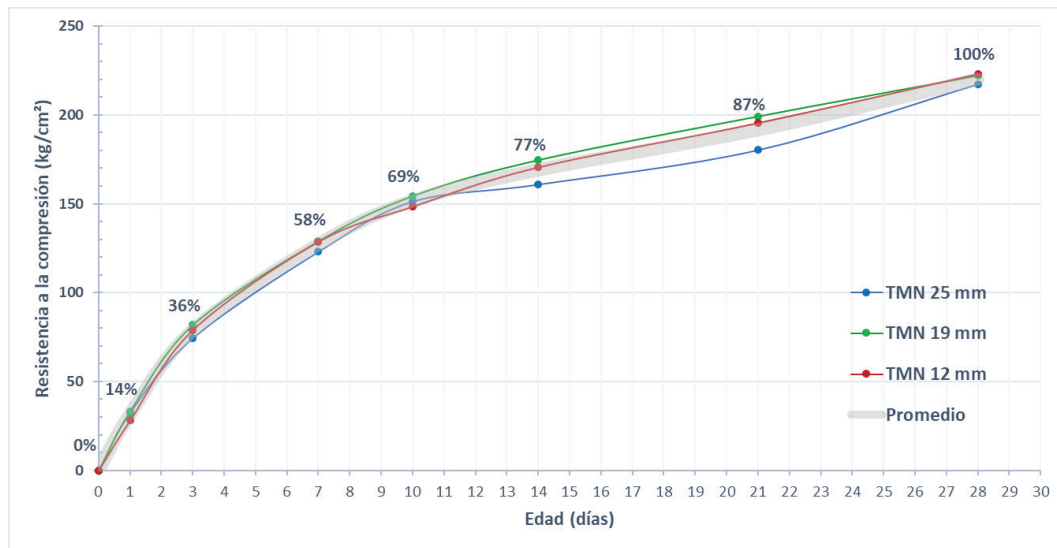


Figura 3. Desarrollo de resistencia a la compresión en los concretos analizados.

En el caso de la velocidad ultrasónica, los tres concretos demuestran una diferencia entre los valores de velocidad obtenidos, pero la curva de desarrollo presenta la misma característica evolutiva a través del tiempo para cualquiera de los concretos analizados. Los tres concretos alcanzan la clasificación de Bueno, según los criterios de Maholtra & Carino. [6], 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 7 y la Figura 4.

Cuadro 7. Resultados promedio de velocidad ultrasónica .

TMN	25 mm		19 mm		12 mm	
Edad	Datos	Velocidad ultrasónica (m/s)	Datos	Velocidad ultrasónica (m/s)	Datos	Velocidad ultrasónica (m/s)
1 día	16	2548	25	2448	23	2819
3 días	28	3641	28	3396	26	3347
7 días	29	3831	28	3674	37	3574
10 días	61	3929	26	3784	63	3603
14 días	27	4095	39	3863	35	3703
21 días	42	4176	41	3913	86	3739
28 días	27	4231	54	3963	69	3808

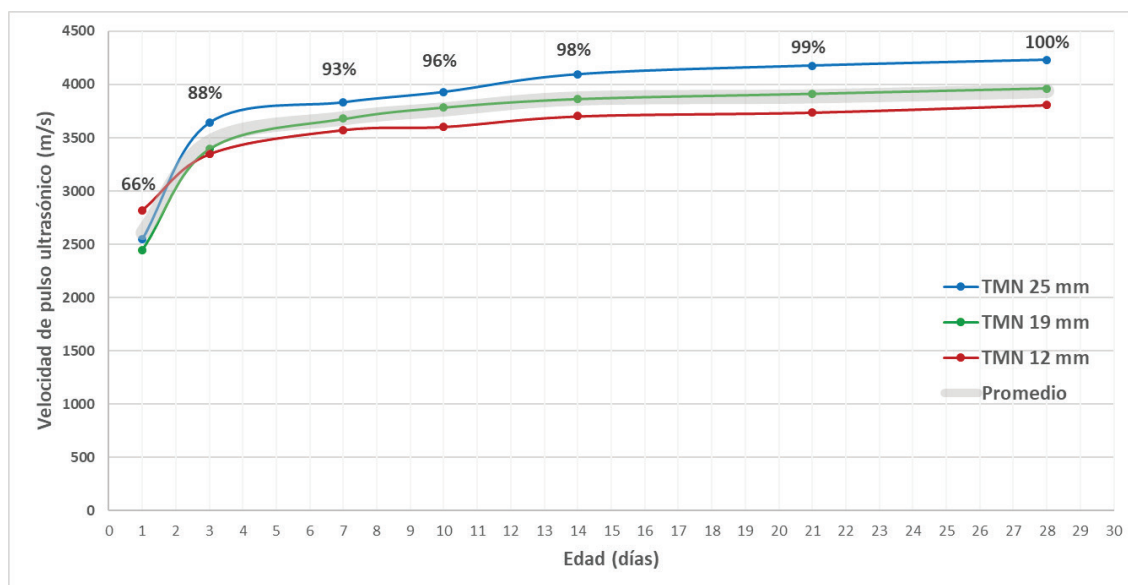


Figura 4. Desarrollo de velocidad ultrasónica en los concretos analizados

Tomando en consideración las curvas de desarrollo de resistencia a la compresión y de velocidad ultrasónica, podemos tabular los porcentajes de ganancia de cada ensayo ejecutado. El cuadro 8 y la Figura 5 muestran este comparativo.

Cuadro 8. Porcentajes de disminución de velocidad ultrasónica entre TMN.

Edad	Concreto con TMN de 25mm a 19 mm	Concreto con TMN de 19 mm a 12 mm	Concreto con TMN de 25 mm a 12 mm
3 días	6,7%	1,4%	8,1%
7 días	4,1%	2,7%	6,7%
10 días	3,7%	4,8%	8,3%
14 días	5,7%	4,1%	9,6%
21 días	6,3%	4,4%	10,5%
28 días	6,3%	3,9%	10,8%
Promedio	5,5%	3,6%	8,9%
Desviación Estándar	1,3%	1,3%	1,4%

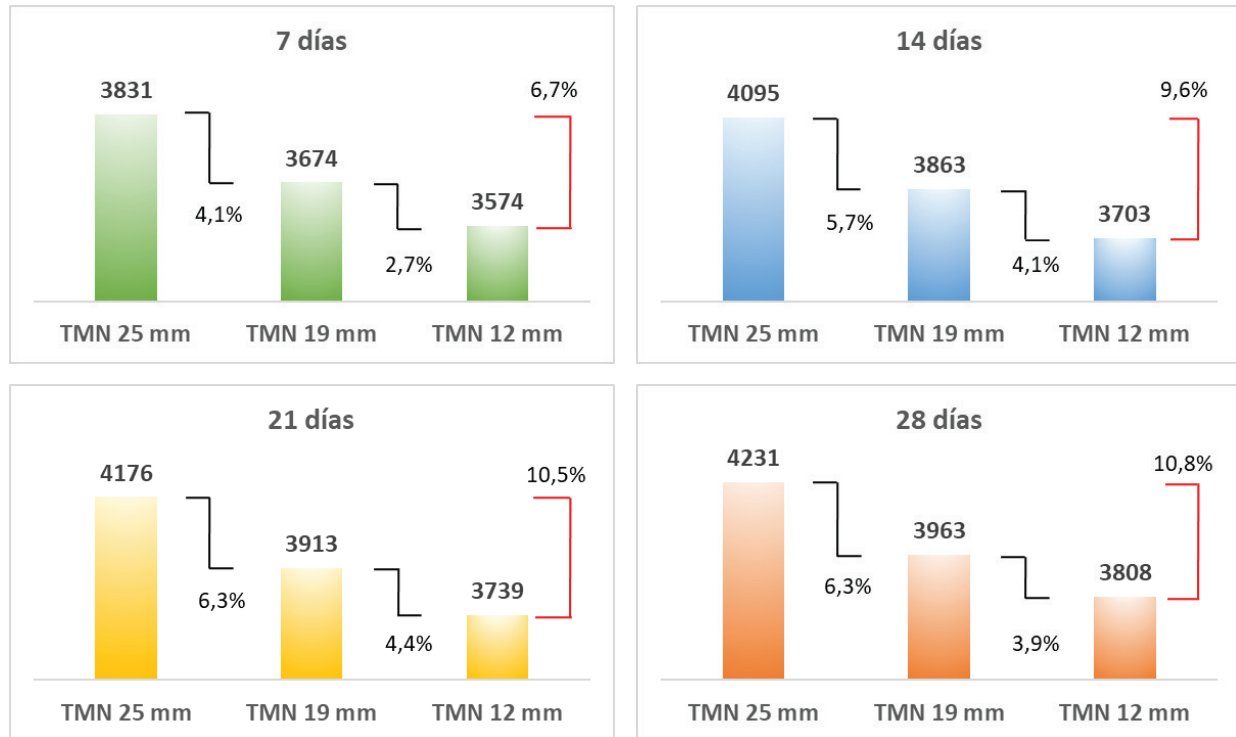


Figura 5. Porcentajes de disminución de velocidad ultrasónica en edades de 7, 14, 21 y 28 días.

Utilizando los resultados promedio finales, podemos determinar tendencias en la población analizada, y realizar un modelo de regresión lineal múltiple para determinar el efecto causado por las variables, y en este caso, el porcentaje de aire presente en la mezcla (ver cuadro 9).

Cuadro 9. Tendencias obtenidas en propiedades de los concretos analizados.

TMN	25 mm	19 mm	12 mm	Tendencia
Contenido Aire (%)	0,9	1,5	1,8	Sube
Densidad concreto (kg/m³)	2296	2253	2208	Baja
Velocidad ultrasónica (m/s)	4231	3963	3808	Baja

La ejecución del modelo de regresión lineal involucra los datos del porcentaje de contenido de aire, la velocidad ultrasónica obtenida y la edad de ejecución de la prueba; los resultados se muestran en el cuadro 10.

Cuadro 10. Ejecución de regresión lineal múltiple.

Resumen Estadístico	Coeficiente de correlación múltiple		0,93868897
	Coeficiente de determinación R ²		0,88113699
	R ² ajustado		0,86528859
	Error típico		88,6535139
	Observaciones		18

ANOVA		Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
	Regresión	2	873936,496	436968,248	55,5978468	1,1557E-07
	Residuos	15	117891,683	7859,44552		
	Total	17	991828,179			

Coeficientes		Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
	Intercepción	4073,827	87,824645	46,385923	1,289E-17	3886,63	4261,02
	Edad	19,41410	2,4659296	7,8729329	1,0482E-06	14,16	24,67
	% Aire	-391,7725	55,846464	-7,015171	4,173E-06	-510,81	-272,74

La ecuación resultante del modelo de regresión lineal se describe a continuación:

$$Y = 4074 + (19,4 \cdot X_1) - (391,8 \cdot X_2) \quad (\text{Ecuación 3})$$

Y = Velocidad de pulso ultrasónico (m/s).

X₁ = Edad de curado del concreto (días).

X₂ = Contenido de aire de la mezcla (%).

Discusión

Los ensayos ejecutados confirman que los cambios en el TMN del agregado grueso utilizado en el concreto modifican el porcentaje de contenido de aire atrapado en la mezcla, tal y como indica la tabla A1.5.3.3 de la ACI 211.1-91. Se destaca que, los porcentajes de aire obtenidos en la fase experimental son menores a los considerados en los parámetros de diseño. Esto se atribuye al correcto proceso de mezclado, moldeo normalizado de las probetas, un correcto curado de los especímenes y la corrección de agua ejecutada al momento de la batida, considerando humedad y absorción de los agregados, limitando así el desarrollo de vacíos dentro de las probetas por aspectos de ejecución. La tendencia teórica si se plasma en los resultados experimentales, donde, conforme disminuye el TMN del agregado grueso en el concreto, aumenta el porcentaje de contenido de aire atrapado en la mezcla.

Por su parte, la evaluación ultrasónica, destaca que el resultado de velocidad ultrasónica disminuye cuanto más contenido de aire se encuentra dentro de mezcla, debido a la susceptibilidad del pulso ultrasónico a difractarse ante la presencia de vacíos dentro de la matriz del material analizado. La disminución de la magnitud de velocidad ultrasónica no

tiene relación alguna con cambio en la resistencia a la compresión, ya que los tres concretos mantienen curvas de desarrollo de resistencia muy equiparables y que cumplen con la resistencia de diseño pautada.

La única variable que aporta aire a la mezcla es el cambio en el TMN, la ejecución de las batidas de concreto y el curado de las probetas se realizó según estándares internacionales que rigen dichos procedimientos. Esto demuestra la sensibilidad del ensayo ultrasónico a la presencia de aire dentro del concreto, aún en la conformación de tres concretos con el mismo $f'c$ y sin variaciones destacables en su resistencia a la compresión.

Los resultados y metodología sugieren que, una comparación entre una diversa cantidad de concretos, con fabricantes diferentes, menos rigor en los procesos de mezclado y un curado con ciertas deficiencias puede generar resultados aún más diferentes, y que, si demuestren un detrimento en la resistencia a la compresión, ocasionada por disminución en la densificación del concreto o el aumento de variables que introducirían aire a la mezcla de concreto. En cualquier caso, el ensayo ultrasónico se presenta como un equipo confiable para la detección de la calidad del concreto a pesar de cambios pequeños de contenido de aire dentro del material.

Conclusiones

Se logra determinar que la disminución en el TMN de agregado grueso del concreto también disminuye la velocidad ultrasónica del concreto, aunque el desarrollo de resistencia a la compresión sea similar entre los tres concretos. En la edad de 28 días, la velocidad disminuye un 6,3 % entre el concreto con agregado de 25 mm y el de 19 mm, y un 3,9 % adicional entre el concreto con agregado de 19 mm y el de 12 mm; una disminución total de 10,8 % en la velocidad ultrasónica. Esta disminución no significó un detrimento en el rango de clasificación de calidad, ya que todos los concretos se mantienen en la clasificación de Bueno según la escala de Maholtra & Carino.

El modelo de regresión lineal múltiple ejecutado y la revisión iterativa de resultados, nos demuestra que el porcentaje de contenido de aire afecta el resultado en gran medida, ya que, un aumento de un 1,0 % en el contenido de aire, disminuye hasta un 10 % la velocidad ultrasónica por metodología directa. Esto quiere decir que, si le aplicamos un 1,0 % adicional de aire, por cualquier factor, a los concretos con TMN de 19 mm y 12 mm, la disminución en la velocidad ultrasónica será suficiente para rebajar la clasificación de calidad obtenida, pasando de Bueno a Cuestionable, y, por lo tanto, el desarrollo de resistencia a la compresión puede ponerse en duda dentro del concreto en obra.

La versatilidad de la prueba ultrasónica permite detectar estos parámetros de calidad en sitio y tomar decisiones tempranas para la corrección de algún detrimento de calidad, pero basado en un ensayo no destructivo que puede ejecutarse durante el proceso constructivo y dentro de los 28 días de desarrollo de resistencia del concreto hidráulico.

Recomendaciones

Los procesos de elaboración de concreto en nuestro país se encuentran bastante estandarizados, y en ocasiones, existe un exceso de confianza en el diseño, elaboración y colocación del concreto. Los diseños de concreto se sustituyen por relaciones proporcionales conocidas, pero que no son comprobadas mediante control de calidad que verifique el correcto desarrollo de resistencia, la corrección de agua de la mezcla según el aporte de los agregados, o incluso, la correcta dosificación de materiales, que garantice eficiencia de los recursos. Así mismo, se delegan responsabilidades del profesional de la construcción en personal técnico que, por su experiencia, se hacen responsables de procesos de elaboración, colocación y curado de

concreto que no siempre son los correctos. Se recomienda el uso de mecanismos de control de calidad ordinarios como los muestreos de concreto y la elaboración de especímenes cilíndricos para la obtención de resistencia a la compresión, o al menos, optar por los ensayos no destructivos como el ultrasonido en el concreto, por medio del cual, se puede determinar la calidad del concreto en sitio y durante el procesos constructivo, con resultados en tiempo real que pueden determinar conclusiones estadísticamente confiables.

Esta investigación utilizó parámetros de diseño de la guía ACI 211.1-91, sobre todo en la incorporación del porcentaje de aire atrapado en la mezcla. La ejecución de las mezclas, y la revisión de este parámetro con el ensayo respectivo (ASTM C231), nos demostró que, aunque se cumplió la tendencia teórica y esperada, los porcentajes de contenido de aire fueron menores a los diseñados. Esto sugiere que se pueden obtener concretos incluso mejores a los diseñados con buenas prácticas de elaboración del concreto, por lo que se recomienda la dosificación e hidratación ordenada de los componentes de la mezcla, la corrección de agua en la mezcla, según la humedad y absorción de los agregados utilizados, un tiempo de mezclado adecuado, control de la temperatura ambiental y del concreto al momento de colar, para evitar microfisuramientos, expansiones o contracciones inesperadas, y un correcto curado del concreto, que en muchas ocasiones no se ejecuta durante los 28 días de desarrollo de resistencia.

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 de la influencia del aire en el resultado de velocidad ultrasónica obtenida, pero desde la evaluación ultrasónica indirecta.
- Investigar otras resistencias de diseño (f'_c) para el concreto puede 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.

Agradecimientos

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

Referencias

- [1] ASTM International, «Designation C597 – 22 Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete,» 2022.
- [2] 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.
- [3] A. Domato Jayo, «Ultrasonidos: principios generales y alcance,» International Atomic Energy Agency (IAEA), 2022.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] International Atomic Energy Agency, «Guidebook on non-destructive testing of concrete structures,» Vienna, 2002.
- [7] V. M. Maholtra y N. Carino, Nondestructive Testing of concrete, Florida: CRC Press, 2004.

- [8] American Concrete Institute, «Standar Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweighth, and Mass Concrete (ACI 211.1-91),» 2002.
- [9] L. A. Quintero Ortiz, R. A. Cruz Hernández y D. Y. Peña Santos, «Efecto del contenido de agua sobre la resistencia y la velocidad de pulso ultrasónico del concreto,» *Tecnura. Tecnología y Cultura Afirmando el Conocimiento*, vol. 18, n° 42, pp. 103-113, 2014.
- [10] O. Narváez Trejo y L. Villegas Salas, «Introducción a la investigación:,» Universidad Veracruzana, 2014.
- [11] Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica, Código Sísmico de Costa Rica, Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2010.
- [12] American Concrete Institute, «Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete (ACI 214R-11),» United States, 2011.
- [13] American Concrete Institute, «Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318SUS-14) y Comentario (ACI 318SUSR-14),» United States, 2015.
- [14] ASTM International, «Designation C39/C39M – 24 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens,» 2024.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

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