

Determinación de la resistencia y rigidez del hormigón tras la simulación de un incendio mediante modelos de regresión múltiple entre la propagación de las ondas y la temperatura

R. R. C. Silva^{1*} , Y. B. Gomes² 

*Autor de Contacto: rodrigorogerioudourado@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i1.663>

Recibido: 30/01/2023 | Correcciones recibidas: 23/11/2023 | Aceptado: 11/12/2023 | Publicado: 01/01/2024

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue evaluar el comportamiento de los parámetros físicos, mecánicos y elásticos de hormigones fabricados con diferentes relaciones agua/cemento, sometidos a diferentes niveles de temperatura, utilizando la propagación de ondas ultrasónicas. Después de la exposición a altas temperaturas, muestras cilíndricas y prismáticas de hormigón fueron sometidas a enfriamiento lento y brusco, demostrando la influencia del tipo de enfriamiento en la resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, pérdida de masa y velocidad de propagación de ondas. Se desarrollaron modelos de regresión múltiple estadísticamente significativos con un nivel de confianza del 95% como predictores de la resistencia y rigidez del hormigón a través de las velocidades obtenidas por las pruebas de ultrasonidos, lo que permite controlar y verificar la integridad de las estructuras tras situaciones de incendio.

Palabras clave: altas temperaturas; hormigón; propagación de ondas ultrasónicas; resistencia y rigidez.

Citar como: Silva, R. R. C., Gomes, Y. B. (2023), " *Determinación de la resistencia y la rigidez del hormigón tras la simulación de un incendio mediante modelos de regresión múltiple entre la propagación de las ondas y la temperatura*", Revista ALCONPAT, 14 (1), pp. 40- 56, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i1.663>

¹ Laboratorio de Ensayos No Destructivos, Universidad Estatal de Campinas, Campinas/SP, Brasil.

² Laboratorio de Materiales de Construcción Civil, Universidad Nove de Julho, São Paulo/SP, Brasil.

Contribución de cada autor

En este trabajo, Silva, R. R. C., contribuyó a la adquisición de la actividad de financiación, metodología, investigación, preparación del programa experimental de muestras, supervisión y análisis de datos, Gomes, Y. B. contribuyó a la conceptualización, metodología, redacción de borrador y original.

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.

Determination of concrete strength and stiffness after fire simulation through multiple regression models between wave propagation and temperature

ABSTRACT

The aim of this research was to evaluate the behaviour of the physical, mechanical and elastic parameters of concretes made with different water/cement ratios, subjected to different temperature levels, using ultrasonic wave propagation. After exposure to high temperatures, cylindrical and prismatic concrete samples were subjected to slow and abrupt cooling, demonstrating the influence of the type of cooling on compressive strength, modulus of elasticity, mass loss and wave propagation speed. Statistically significant multiple regression models were developed at the 95% confidence level as predictors of concrete strength and stiffness through the velocities obtained by ultrasound testing, enabling the integrity of structures to be monitored and verified after fire situations.

Keywords: high temperatures; concrete; ultrasonic wave propagation; strength and stiffness.

Determinação da resistência e rigidez de concreto após simulação de incêndio através de modelos de regressão múltiplos entre propagação de ondas e temperatura

RESUMO

O objetivo dessa pesquisa foi avaliar o comportamento dos parâmetros físicos, mecânicos e elásticos de concretos confeccionados com diferente relação água/cimento, submetidos a diferentes patamares de temperaturas, através da propagação de ondas ultrassônicas. Após exposição a elevadas temperaturas, amostras de concretos cilíndricas e prismáticas foram submetidas ao resfriamento tipo lento e brusco, demonstrando a influência do tipo de resfriamento na resistência à compressão, módulo de elasticidade, perda de massa e velocidade de propagação de ondas. Foram desenvolvidos modelos de regressão múltiplos estatisticamente significativos, ao nível de 95% de confiança, como preditores de resistência e rigidez do concreto, através das velocidades obtidas pelo ensaio de ultrassom, permitindo realizar o monitoramento e a verificação da integridade de estruturas após situações de incêndio.

Palavras-chave: altas temperaturas; concreto; propagação de ondas ultrassônicas; resistência e rigidez

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

Una de las principales preocupaciones de la ingeniería civil está relacionada con los cambios en las propiedades de resistencia y deformación de los elementos estructurales de hormigón cuando se ven sometidos a situaciones de fuego a altas temperaturas. El conocimiento estructural post-acción de las altas temperaturas en el hormigón es un desafío en los medios académicos, dadas las velocidades de enfriamiento. Según Moreno y Souza (2010), la lucha contra un incendio representa la acción de enfriamiento brusco, provocando una reducción de la resistencia debido a las variaciones de los gradientes de temperatura que se originan en el hormigón. Los crecientes avances tecnológicos de las últimas décadas han traído nuevas tecnologías al sector de la construcción, especialmente los ensayos con ondas ultrasónicas, que permiten evaluar las estructuras de hormigón sin necesidad de extraer probetas de las estructuras para analizar los parámetros mecánicos y elásticos.

Las normas brasileñas ABNT-NBR 8802 (2019), europeas BS 1881:203 (1986), ACI 228 (2003) y EN 12504 (2004), proponen que las correlaciones entre la velocidad de propagación de las ondas de ultrasonido y la resistencia del hormigón deben ser utilizadas después de la calibración para una determinada mezcla y/o características de los componentes, tales como la proporción de agregados, relación agua-cemento. Sin embargo, los resultados de los ensayos de ultrasonidos son parámetros de medida indirectos y deben interpretarse como indicativos del comportamiento, pero en situaciones de toma de decisiones deben ir acompañados de ensayos destructivos que determinen las propiedades reales que se están evaluando. Según Estacechen (2020), el método de evaluación de la resistencia a compresión del hormigón mediante moldeo y rotura de probetas sigue siendo el sistema de evaluación más fiable, seguido de los testigos, que demuestran mejores parámetros de seguridad en una evaluación real de la estructura, en el caso de estructuras ya construidas.

Los ensayos por ultrasonidos ayudan a clasificar y caracterizar el hormigón, pero también se utilizan para detectar defectos internos y el espesor del hormigón (Ohdaira y Masuzawa, 2000; Sutan y Meganathan, 2003). Los investigadores han utilizado los ensayos con ultrasonidos para crear modelos de correlación que permitan predecir la relación entre la propagación de las ondas ultrasónicas y otras características físico-mecánicas. Sin embargo, hay que tener cuidado al utilizar curvas de correlación, ya que hay varios factores que pueden interferir en los resultados, como la resistencia (Silva, 2020), el módulo de elasticidad (Trtnik et al., 2008; Yildirim y Şengul, 2011), la densidad (Mohammed y Hasan, 2016), la porosidad (Lafhaj et al., 2006) y la permeabilidad (Panzera et al., 2008). Además, las propiedades de la relación agua-cemento (Ye et al., 2011; Silva, 2020), el tamaño de los áridos (Berriman et al., 2005), el proceso de hidratación (Zhang, et al., 2009), y las condiciones de curado cámara et al. (2019).

Además del estado de tensión que afecta a la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas, este fenómeno se denomina acustoelasticidad (Lillamand et al., 2010). La temperatura tiene una gran influencia en la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas en el hormigón, pero este efecto parece ser despreciable para temperaturas comprendidas entre 10 y 30 °C, según la norma DIN EN 12504 (2004). Estudios experimentales realizados en muestras de hormigón con diferentes relaciones agua-cemento, sometidas a altas temperaturas que van desde 400 a 600°C (Gyu-Yong et al.; 2009); 400 a 600°C (Yang et al, 2009); 100 a 400 °C (Ozawa et al., 2014); -18 a 180°C (Güneyli et al., 2017), 100 a 700°C (Hwang et al., 2018), encontraron una disminución de la velocidad de pulso ultrasónico del hormigón, así como de la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad, tras el enfriamiento en muestras sometidas a temperaturas superiores a 300°C. Es posible monitorizar los defectos internos del hormigón porque existe una correlación entre el aumento de las grietas causadas por la expansión a altas temperaturas y la disminución de la propagación de las ondas ultrasónicas.

El Eurocódigo 2 (2004) y la ABNT - NBR 15200 (2012) presentan modelos que determinan la resistencia característica a la compresión del hormigón y el módulo de elasticidad, en función del

Determinación de la resistencia y la rigidez del hormigón tras la simulación de un incendio mediante modelos de regresión múltiple entre la propagación de las ondas y la temperatura

aumento de la temperatura, a través de valores indicativos del factor de reducción de la resistencia característica (k_c, Θ) y reducción del módulo de elasticidad ($k_{cE, \Theta}$). En la literatura científica, los estudios que evalúan los parámetros mecánicos y elásticos del hormigón mediante ensayos con ultrasonidos para diferentes niveles de temperatura y tipos de enfriamiento (lento y brusco) utilizan ensayos directos, que se consideran los más adecuados para correlacionar las propiedades mecánicas del material con la velocidad de propagación de las ondas. Sin embargo, en la evaluación de estructuras post-incendio casi nunca se tiene acceso a los extremos de la pieza inspeccionada, por lo que es necesario realizar un ensayo indirecto. Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo general de la investigación fue obtener modelos de regresión múltiple entre diferentes niveles de temperatura y tipos de enfriamiento, asociados a los parámetros obtenidos por los ensayos de ultrasonidos mediante los métodos directo e indirecto, para determinar la resistencia y rigidez estimadas del hormigón, permitiendo la monitorización y evaluación de la integridad de las estructuras tras situaciones de incendio.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Áridos finos y gruesos.

El agregado fino elegido fue arena de cuarzo natural extraída del río. La caracterización de los agregados finos se realizó de acuerdo con las recomendaciones de las normas ABNT - NBR para agregados finos (NM 248, 2003; NM 52, 2009; NM 45, 2006; NM 46, 2003), y los resultados fueron los indicados en la Tabla 1. El agregado grueso utilizado es de origen granítico, extraído del estado de São Paulo, caracterizado de acuerdo con las normas ABNT-NBR (NM 248, 2003; NM 53, 2002; NM 45, 2006), específicas según la tabla (1), clasificando el agregado grueso como grava 1.

Tabla 1. Resultados de la caracterización física de los áridos finos y gruesos Resultados de la caracterización física de los áridos finos y gruesos.

Agregado	Específico masa (kg/m^3)	Unidad de masa (kg/m^3)	Diámetro máximo (mm)	Módulo de finura
Areia	2650	1410	2,4	2,25
Granito	2690	1500	12,5	5,80

2.2 Preparación de las muestras.

La metodología empleada para ensayar las muestras de hormigón durante el periodo de 28 días, sometidas a diferentes temperaturas, siguió la misma metodología según la bibliografía encontrada en los trabajos de Wendt (2006), Forigo (2017) y Hwang et al. (2018), a los que atribuyen credibilidad a la metodología propuesta en los ensayos.

La mezcla utilizada fue (1:2,3:2,5) con un consumo de cemento de 380 Kg/m^3 . Durante la preparación de las mezclas, únicamente se varió la relación agua/cemento en las siguientes proporciones (0,5; 0,6 y 0,7) para obtener diferentes resistencias a compresión del hormigón a 28 días. Las densidades medias de los hormigones producidos con los diferentes áridos disminuyeron al aumentar el factor agua/cemento, como era de esperar (Tabla 2). También como era de esperar, hubo un aumento del asentamiento (NM 67, 1998) a medida que aumentaba el factor agua-cemento (Tabla 2). A pesar de las variaciones, los valores para todas las densidades están dentro de los límites considerados normales para el hormigón, de 2000 kg.m^{-3} a 2800 kg.m^{-3} , según la norma brasileña (ABNT-NBR 9778, 2015) y la literatura (Silva, et al., 2020). La muestra para cada relación w/c consistió en 48 probetas cilíndricas (100 x 200 mm) fabricadas de acuerdo con la norma ABNT-NBR 5738 (2003) y 16 probetas prismáticas (200 x 200 x 400) mm, utilizando

cemento CII-F-32, comúnmente utilizado en la construcción. El programa experimental totalizó 144 probetas cilíndricas y 48 prismáticas. Variando la toma de muestras en relación con el factor agua cemento (w/c), será posible comprobar el comportamiento del hormigón sometido a temperatura ambiente y a altas temperaturas (250°C , 550°C y 850°C). Las probetas se desmoldaron 24 horas después del hormigonado y se sumergieron en agua y cal durante 28 días. Tras el periodo de curado, las probetas se colocaron a temperatura ambiente y después a altas temperaturas.

Tabla 2. Valores de asentamiento y densidad media de las muestras de hormigón. Valores de asentamiento y densidad media de las muestras de hormigón.

Factor (a/c)	Asentamiento (mm)	Densidad media (kg.m^{-3})
0,5	70	2295
0,6	110	2231
0,7	200	2145

2.2 Ensayos a alta temperatura

Para cada factor agua/cemento (0,5, 0,6 y 0,7), se sometieron 12 probetas cilíndricas y 4 prismáticas a temperaturas de 25°C (temperatura ambiente), 250°C , 550°C y 850°C en un horno eléctrico industrial de mufla (Figura 1a). Las muestras se pesaron antes y después de ser sometidas a las altas temperaturas para evaluar la pérdida de masa. La metodología de ensayo tuvo en cuenta las recomendaciones de las normas RILEM para el calentamiento del hormigón, concretamente RILEM TC 129-MHT (2004) y RILEM TC 200-HTC (2007), que recomiendan una velocidad de calentamiento de hasta $4^{\circ}\text{C}/\text{min}$. El tiempo necesario para alcanzar cada temperatura estudiada (250°C , 550°C y 850°C) fue de aproximadamente (45 min.; 1:30 min. y 2:15 min.). Tras alcanzar la temperatura deseada, las muestras se mantuvieron en el horno otros 60 minutos para que la temperatura se homogeneizara en el interior de la pieza. El enfriamiento de las probetas tras el proceso de homogeneización de la temperatura se realizó de dos formas en dos lotes. Para el lote 1, la mitad de las muestras cilíndricas y prismáticas se sometieron a un enfriamiento lento, expuestas a temperatura ambiente durante unas 3 o 4 horas, y después se rociaron 200 ml de agua sobre las muestras (Figura 1b). Tras exponerlas a cierta temperatura constante, la otra mitad de las muestras consideradas del lote 2 se enfriaron bruscamente y se colocaron en un recipiente con agua a temperatura ambiente durante 60 minutos, tras lo cual se sacaron y se expusieron a temperatura y humedad ambiente (Figura 1c).

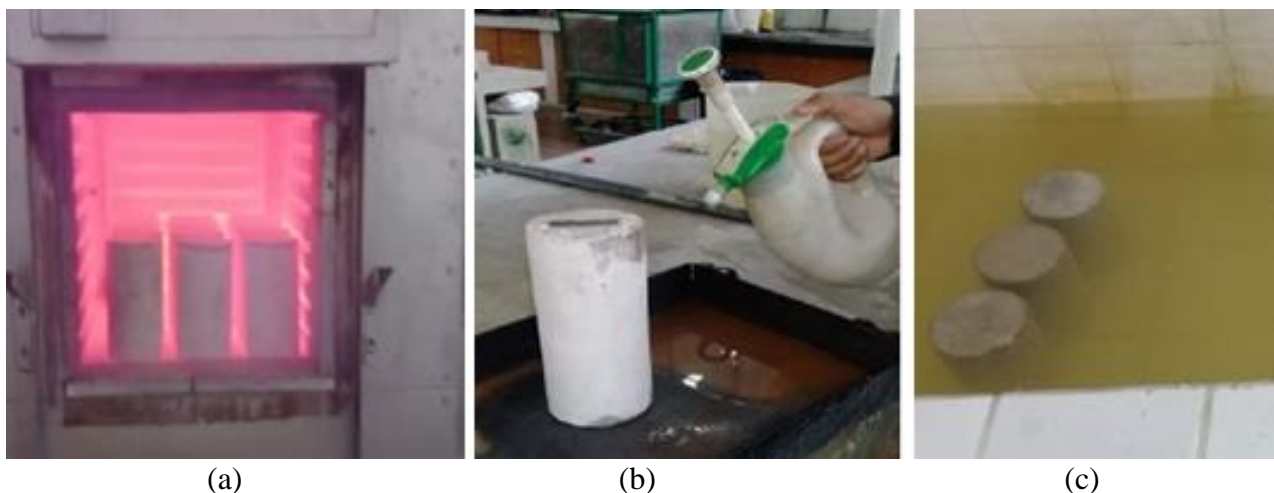


Figura 1. (a) muestras de hormigón en un horno de mufla, (b) enfriamiento lento con hormigón pulverizado, (c) enfriamiento repentino en un recipiente con agua. Autores (2023).

2.3 Ensayos no destructivos por ultrasonidos.

Tras un enfriamiento lento y brusco, las muestras cilíndricas y prismáticas se sometieron al ensayo de propagación de ondas utilizando un equipo de ultrasonidos (modelo Pundit), con ayuda de transductores longitudinales de caras planas y una frecuencia de 54 KHz. Antes de realizar las pruebas, se calibró el equipo utilizando un material acrílico de velocidad conocida. Las muestras cilíndricas fueron ensayadas por el método directo (Figura 2), donde a partir de los ensayos de ultrasonido fue posible obtener los tiempos de propagación de las ondas (t) y así calcular, para cada distancia entre transductores (L), la velocidad de propagación de las ondas de ultrasonido (V), utilizando la ecuación propuesta por la ABNT-NBR 8802 (2013), según la ecuación (1).

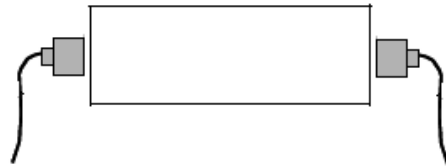


Figura 2. Ensayo directo realizado sobre probetas cilíndricas de hormigón.

$$V = \frac{L}{T} \quad (1)$$

Donde: V = velocidad de propagación de la onda (m.s⁻¹); L= longitud de la probeta (m), T = tiempo (s).

Para las muestras prismáticas se utilizó el método de propagación indirecta de ondas (Figura 3a), utilizando como metodología el cálculo propuesto por la norma ABNT-NBR 8802 (2019), según la ecuación (2). La norma brasileña propone una forma de cálculo de la velocidad de propagación ultrasónica por el modo de transmisión indirecta, cuyo procedimiento consiste en calcular la velocidad utilizando un gráfico de tiempo de propagación versus distancia entre transductores (Figura 3b). Las velocidades indirectas se obtuvieron a partir de los promedios en tres líneas de medición (superior, media e inferior de la muestra prismática).

$$V = \text{tg } \theta \quad (2)$$

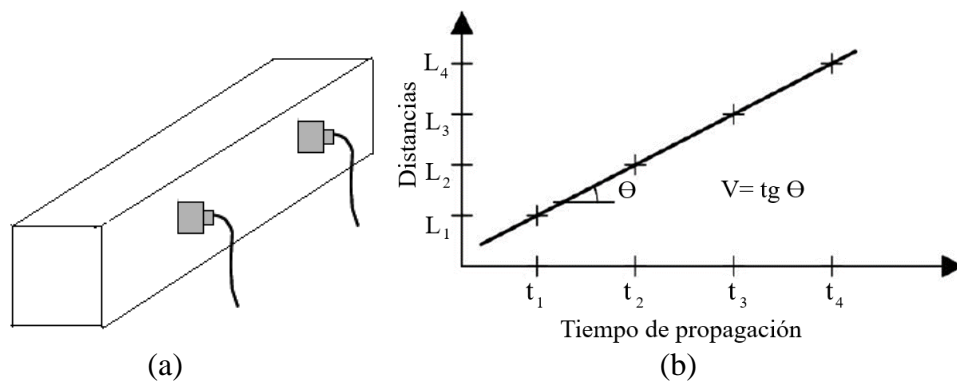


Figura 3. (a) Ensayo indirecto realizado en muestras prismáticas. (b) Determinación de la velocidad de propagación por el método indirecto. Fuente: ABNT-NBR 8802 (2019).

2.3 Ensayos destructivos.

Después de la prueba de ultrasonido, las muestras cilíndricas fueron sometidas a la prueba de resistencia a la compresión (f_c) realizada en máquina hidráulica, calculada de acuerdo con la norma (ABNT-NBR 5739, 2018) según la ecuación (3). Las probetas fueron instrumentadas con galgas extensométricas con resolución de 0,01 mm para determinar el modulo de elasticidad (E_{ci})

Determinación de la resistencia y la rigidez del hormigón tras la simulación de un incendio mediante modelos de regresión múltiple entre la propagación de las ondas y la temperatura

calculado de acuerdo con la norma brasileña (ABNT-NBR 8522, 2017) según la ecuación (4).

$$f_c = \frac{4.F}{\pi.D^2} \quad (3)$$

$$E_{ci} = \frac{\sigma_b^{-0,5}}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \quad (4)$$

Donde: f_c = resistencia a compresión de la probeta (MPa); F = fuerza máxima alcanzada (N); D = diámetro de la probeta (mm); L = longitud de la probeta (mm); E_{ci} = modulo de elasticidad; σ_b = tensión (MPa) obtenida al 30% de la resistencia a compresión; 0,5 = valor de la tensión inicial de referencia (MPa); ε_b y ε_a = deformaciones específicas del hormigón correspondientes a la tensión del 30% de la resistencia a compresión y bajo la tensión inicial de referencia.

2.3 Ensayos físicos.

Después de someter las muestras cilíndricas y prismáticas a los diferentes niveles de temperatura y tipos de enfriamiento (lento y brusco), se comprobó la pérdida de masa (P_m) de cada tipo de muestra según la ecuación (5), pesándolas en una balanza de precisión con una resolución de 0,1 g.

$$P_m = \frac{m - m_{temp}}{m} \quad (5)$$

Donde: P_m = Pérdida de masa (%); m = masa de la muestra a temperatura ambiente (kg); (%); m_{temp} = masa de la muestra sometida a una determinada temperatura (kg).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Utilizando programas informáticos estadísticos, fue posible analizar la distribución de frecuencias de los parámetros obtenidos en la prueba de ultrasonidos (velocidad de propagación directa e indirecta) y en la prueba de compresión simple con mediciones de deformación (resistencia y modulo de elasticidad). El objetivo del análisis estadístico era analizar la normalidad de los parámetros obtenidos en las pruebas destructivas y no destructivas para las distintas relaciones w/c, lo que permitiría utilizarlos para aplicar correlaciones estadísticas. La normalidad se evaluó mediante los límites de asimetría y curtosis, comprendidos entre -2 y + 2. Los resultados obtenidos en los ensayos de compresión, modulo de elasticidad, velocidad de propagación de ondas obtenidos por los métodos directo e indirecto en las muestras se evaluaron estadísticamente mediante análisis de varianza (ANOVA). Los análisis estadísticos se realizaron mediante la comparación de medias para verificar la existencia de diferencia entre los valores de los parámetros obtenidos, con énfasis en las variables aumento de temperatura, clase de resistencia y método de enfriamiento, considerando un nivel de confianza del 95%. Los valores de velocidad directa (V_D) e indirecta (V_I) para los diferentes niveles de temperatura (T) fueron entonces correlacionados con los parámetros obtenidos por el método de compresión destructiva (f_c) y (E_{ci}).

3.1 Efecto de la temperatura en la resistencia, la rigidez y la propagación de las ondas ultrasónicas.

La variación de las propiedades del hormigón expuesto a altas temperaturas depende de muchos factores, como los materiales constituyentes, la resistencia inicial, la edad, el factor agua-cemento y el tipo de enfriamiento. Estos factores dificultan el desarrollo de un modelo preciso para predecir los parámetros mecánicos y elásticos. Sin embargo, cuando el hormigón se expone a incrementos de temperatura de 550°C y 850°C, se produce una reducción significativa de la resistencia a la

compresión, independientemente de la variación del factor agua-cemento y del tipo de enfriamiento. El modulo de elasticidad muestra la misma tendencia a la baja que la resistencia a la compresión, pero independientemente del tipo de enfriamiento y del factor agua-cemento, la disminución de la rigidez es menos brusca que la de la resistencia, especialmente en relación con la temperatura a 550°C y 850°C.

Los resultados muestran que las pérdidas de resistencia a la compresión del hormigón se producen gradualmente, pero existe una tendencia general a la disminución de la resistencia en relación con la temperatura ambiente (50%) para la temperatura de 550°C, y para las muestras sometidas a la temperatura de 850°C (88 a 91%). El enfriamiento lento contribuyó mejor a los parámetros de resistencia (f_c), con valores más elevados de alrededor del 10% al 15% para las temperaturas de 250°C y 550°C, y del 23% para la temperatura de 850°C, en comparación con el enfriamiento repentino. En cuanto a la rigidez (E_{ci}), las muestras enfriadas lentamente mostraron un aumento de alrededor del 12% para todas las temperaturas en comparación con el enfriamiento repentino.

Estudios realizados por Moreno y Souza (2010) también evaluaron el tipo de enfriamiento en probetas de hormigón, y los resultados también indicaron una mayor pérdida de resistencia (f_c) y rigidez (E_{ci}) para probetas de hormigón enfriadas bruscamente. Según Yuzer et al. (2004), la disminución de los parámetros mecánicos y elásticos tras el enfriamiento brusco está relacionada con el aumento de volumen debido a la rehidratación del óxido de calcio (Cao), generando fisuras, aumento de la porosidad y desintegración del hormigón.

La reducción de la resistencia a la compresión, del módulo de elasticidad y de la velocidad de propagación de las ondas que se observa en las figuras (4 a 7) se atribuye a los daños causados por las virutas durante el calentamiento. Según Kirchhof et al. (2015), este comportamiento se debe a que el rápido aumento de la temperatura provoca cambios significativos en la porosidad y la permeabilidad del hormigón debido a la liberación de agua, la deshidratación del hidrato de silicato de calcio (C-S-H) y, probablemente, la formación de macro y microfisuras.

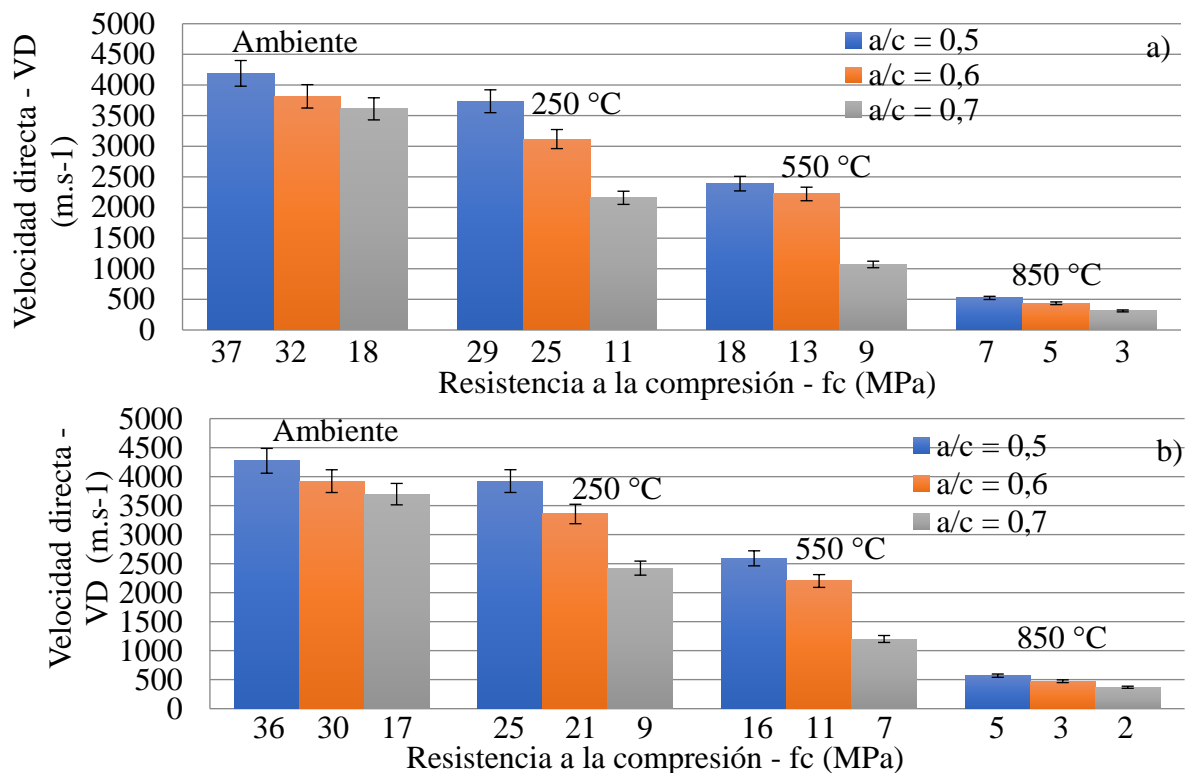


Figura 4. Valores medios (a) enfriamiento lento, (b) enfriamiento repentino. Para muestras ensayadas para resistencia a la compresión y velocidad directa en muestras cilíndricas, después de diferentes pasos de temperatura. Autores (2023).

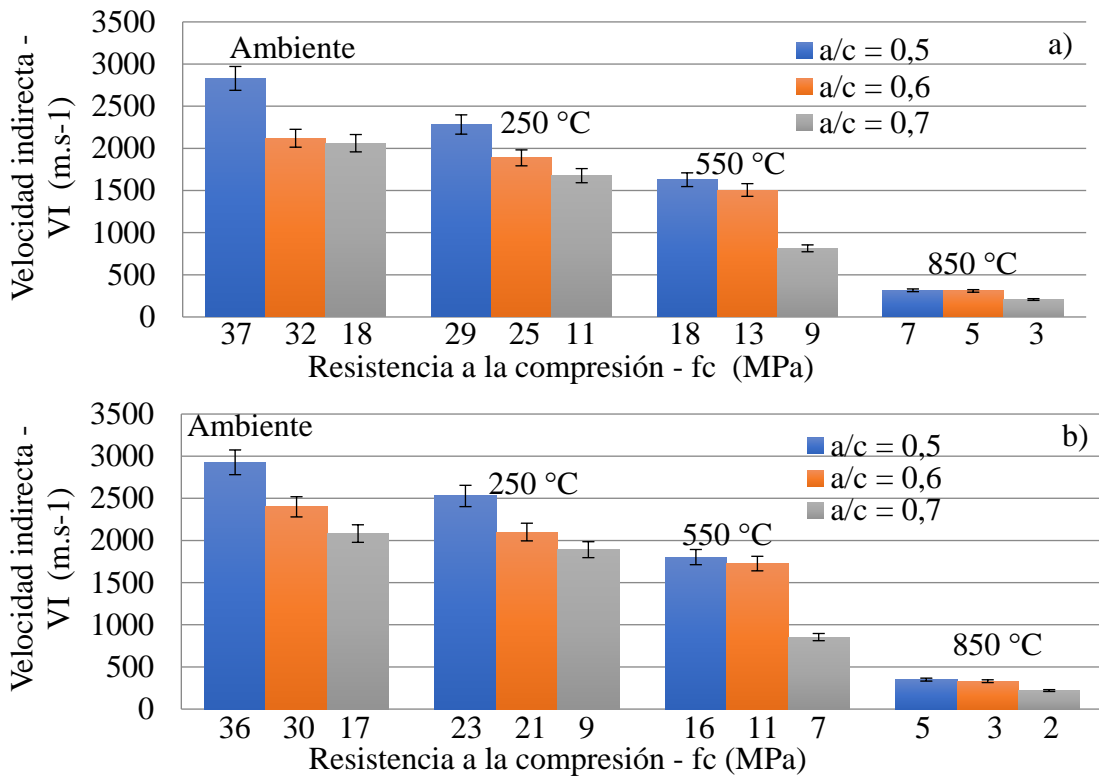


Figura 5. Valores medios (a) enfriamiento lento, (b) enfriamiento repentino. Para probetas cilíndricas ensayadas para resistencia a compresión y velocidad indirecta en probetas prismáticas, tras diferentes escalones de temperatura. Autores (2023).

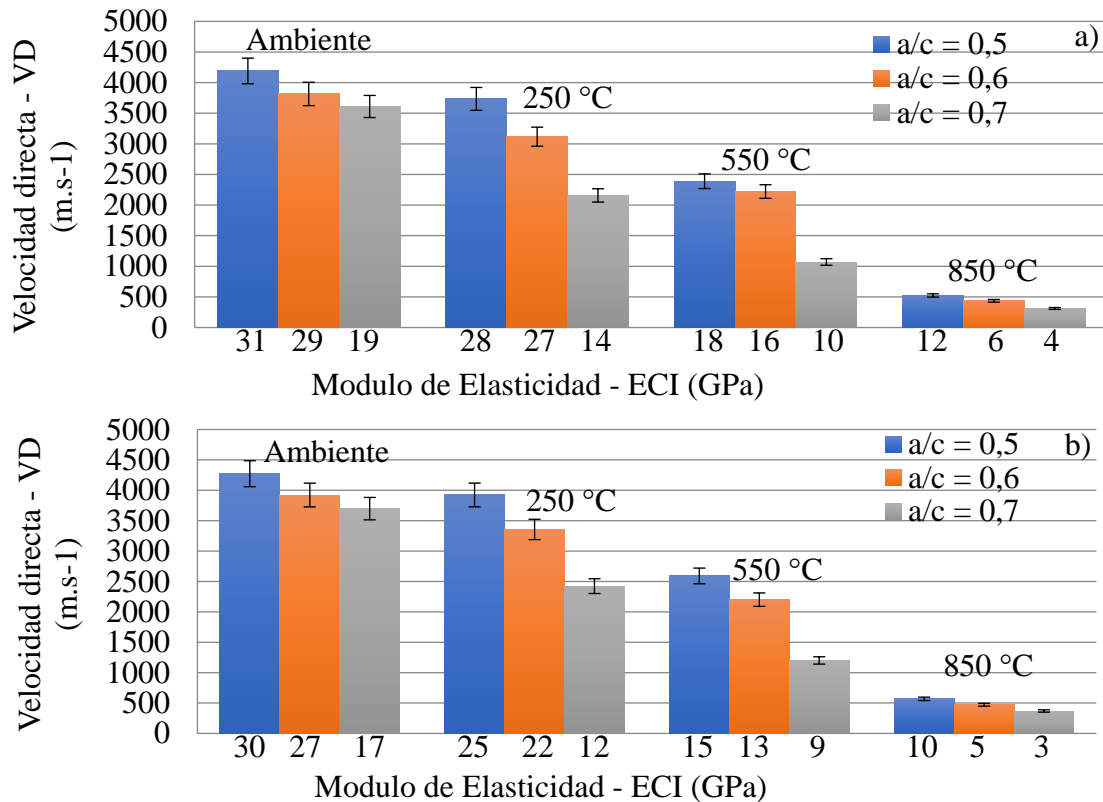


Figura 6. Valores medios (a) enfriamiento lento, (b) enfriamiento brusco. Para probetas cilíndricas ensayadas por modulo de elasticidad y velocidad directa en probetas cilíndricas, tras diferentes escalones de temperatura. Autores (2023).

Determinación de la resistencia y la rigidez del hormigón tras la simulación de un incendio mediante modelos de regresión múltiple entre la propagación de las ondas y la temperatura

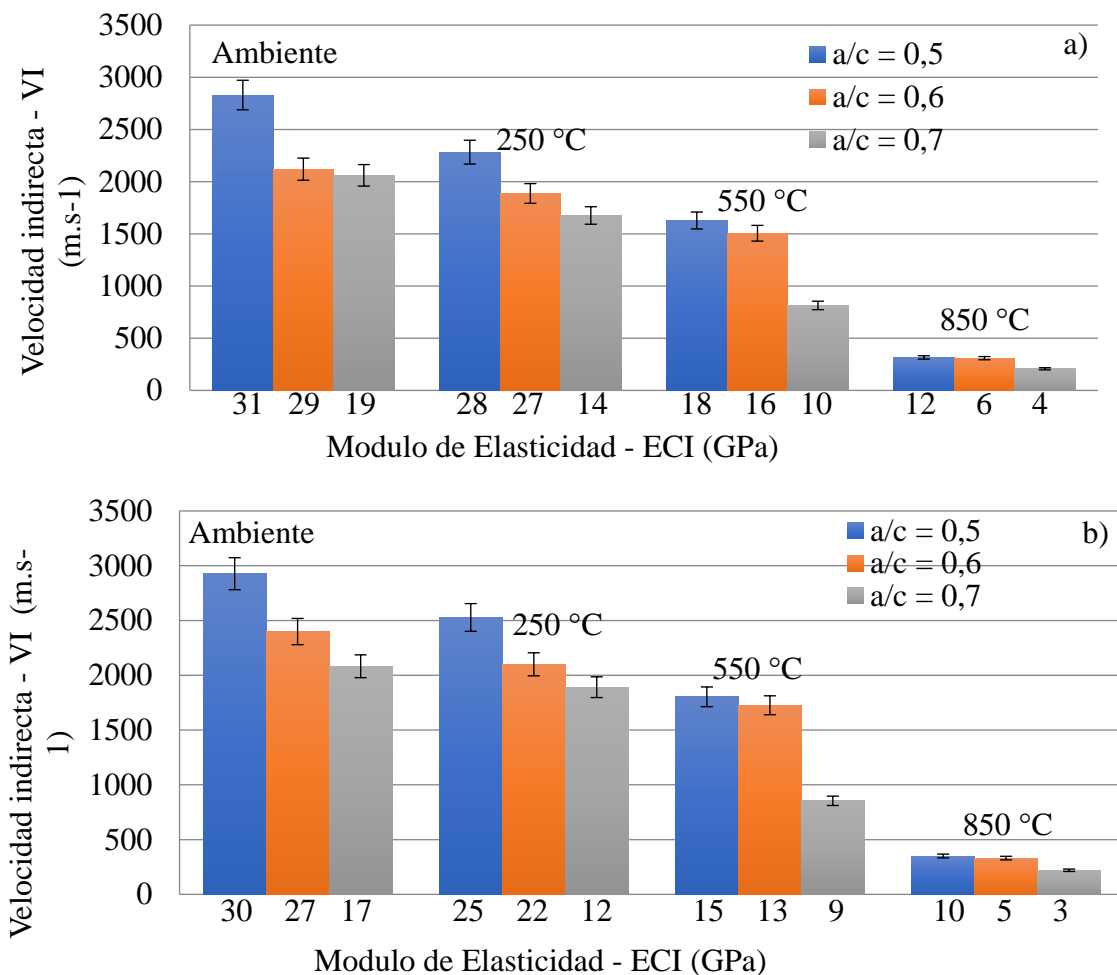


Figura 7. Valores medios (a) enfriamiento lento, (b) enfriamiento brusco. Para probetas cilíndricas ensayadas por modulo de elasticidad y velocidad indirecta en probetas prismáticas, tras diferentes escalones de temperatura. Autores (2023).

El aumento de la porosidad causado por la deshidratación del hidrato de silicato cálcico (C-S-H) puede representarse mediante los resultados de la pérdida de masa y la velocidad de propagación directa e indirecta de las ondas (figuras 8 y 9), ya que cualquier imperfección del hormigón, como grietas o huecos, contribuye a aumentar el tiempo de propagación de las ondas a través de la longitud de la probeta, lo que se traduce en menores velocidades de los impulsos ultrasónicos. La pérdida de masa se produce de forma significativa en muestras con un factor agua-cemento (0,5 y 0,6) a temperaturas de 550 °C y 850 °C, y a partir de 250 °C con un factor agua-cemento (0,7). Según Kirchhof et al. (2015) y Viana (2017), para temperaturas superiores a 400 °C, el aumento de agua libre en los poros del hormigón provoca un desconchamiento explosivo y una mayor pérdida de masa.

Las velocidades directa e indirecta de las muestras con factores agua-cemento (0,5 y 0,6) no mostraron grandes reducciones para la temperatura ambiente de 250 °C, con una variación de (8 a 12%) para el enfriamiento lento y de (13 a 19%) para el enfriamiento brusco. A partir de las temperaturas de 550 °C y 850 °C se observa una marcada reducción de la velocidad de propagación de las ondas para ambos tipos de enfriamiento. Sin embargo, las variaciones de velocidad directa e indirecta fueron mayores a partir de 250 °C para el factor agua-cemento (0,7), debido a una mayor evaporación del agua en el interior del hormigón que se traduce en una mayor pérdida de masa, independientemente del tipo de enfriamiento. Los valores encontrados para las velocidades indirectas fueron (30 a 37%) para los diferentes factores agua-cemento y niveles de temperatura.

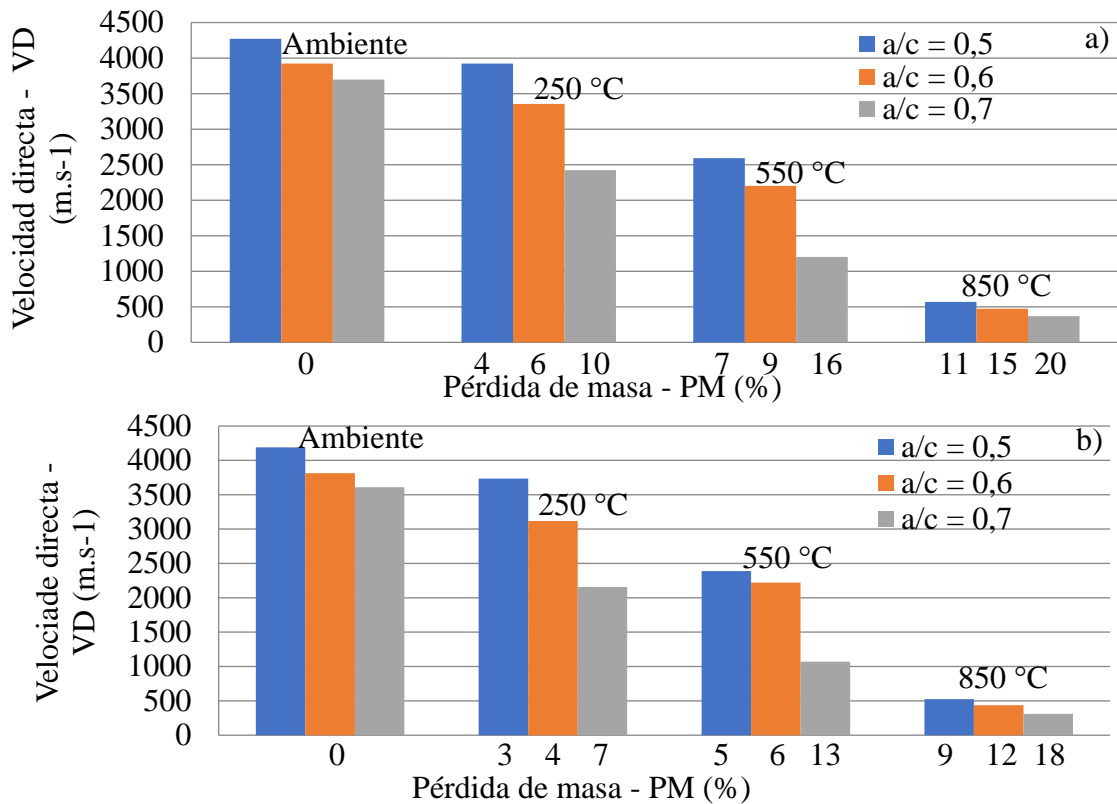


Figura 8. Valores medios (a) enfriamiento lento, (b) enfriamiento brusco. Para muestras ensayadas por velocidad directa y pérdida de masa en muestras cilíndricas, tras diferentes escalones de temperatura. Autores (2023).

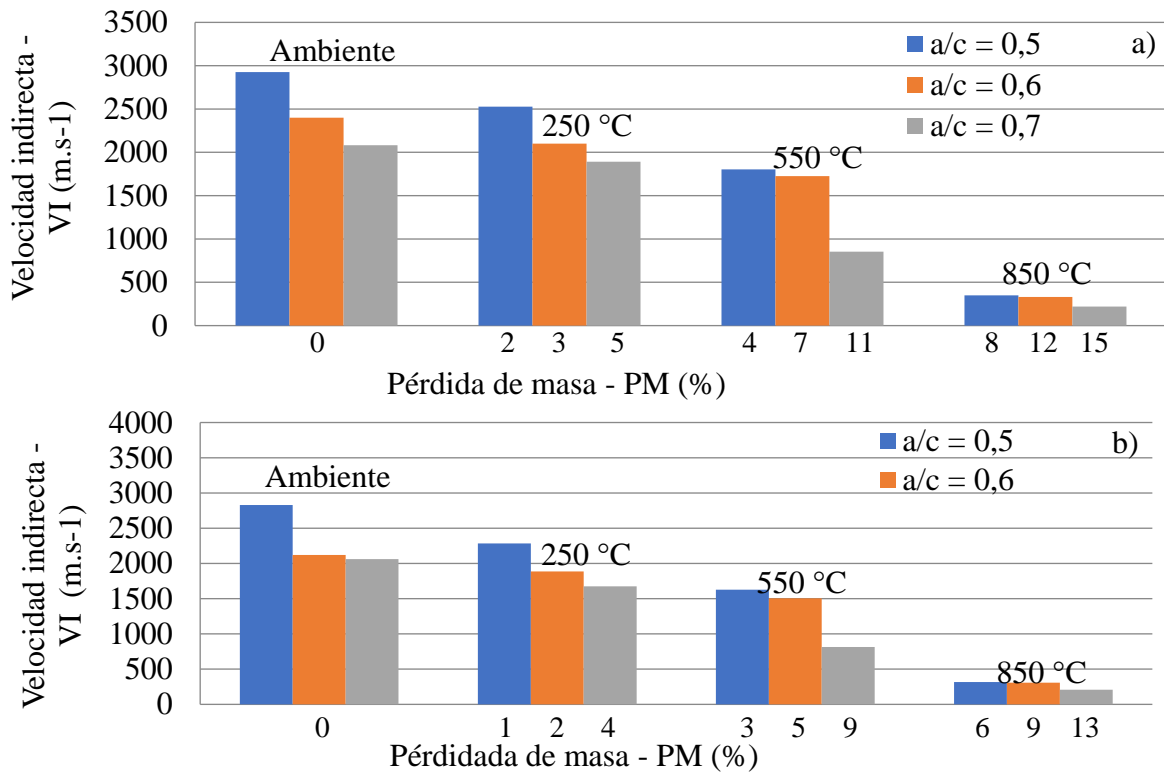


Figura 9. Valores medios (a) enfriamiento lento, (b) enfriamiento repentino. Para muestras ensayadas por velocidad indirecta y pérdida de masa en muestras prismáticas, después de diferentes niveles de temperatura. Fuente: Autores (2023).

Según Silva (2020), las velocidades ultrasónicas obtenidas a partir de mediciones indirectas son inferiores a la velocidad obtenida a partir de mediciones directas, debido a que la medición se realiza cerca de la superficie del hormigón, que generalmente tiene una composición diferente a la del hormigón interno.

Aunque el enfriamiento lento contribuyó a la resistencia (f_c) y la rigidez (E_{ci}), esto no afectó a la velocidad de propagación de las ondas en ambos métodos (directo e indirecto). A pesar de la baja tasa de cambio, las velocidades fueron mayores en el rango de 5 a 16% para los diferentes niveles de temperatura en las muestras de hormigón sometidas a enfriamiento repentino. Según Zhang, et al. (2009) uno de los mayores factores que afectan a la velocidad ultrasónica es la presencia de humedad, por lo que las muestras de hormigón enfriadas bruscamente absorben más agua, reduciendo la porosidad causada durante la evaporación del agua, lo que contribuye a aumentar la propagación de las ondas.

3.1 Análisis estadísticos de las pruebas no destructivas y destructivas.

Los parámetros obtenidos en los ensayos no destructivos de ultrasonido, velocidad directa (V_D) y velocidad indirecta (V_I), y en los ensayos destructivos de compresión estática, como resistencia a la compresión (f_c) y módulo de elasticidad (E_{ci}), para hormigones producidos con diferentes factores agua-cemento y temperaturas, presentaron una distribución de frecuencias compatible con la normal, verificada por la asimetría y curtosis dentro del rango -2,0 y +2,0, como se muestra en la tabla (3).

Tabla 3. Valores mínimos, máximos y medios, asimetría y curtosis para la velocidad directa (V_D) e indirecta (V_I) de propagación de las ondas ultrasónicas, resistencia (f_c) y modulo de elasticidad inicial (E_{ci}) obtenidos en los ensayos de compresión, para las trazas producidas con diferentes relaciones agua-cemento y niveles de temperatura.

Relación a/c	Parámetros	Mínimo	Máximo	Medio	Asimetría y curtosis
0,5	f_c (MPa)	4,4	35,8	20	-0,20 e -0,81
	E_{ci} (GPa)	10,8	30,6	21	-0,11 e -1,2
	V_D (m.s ⁻¹)	524	4273	2399	-0,54 e -0,93
	V_I (m.s ⁻¹)	316	2927	1622	-0,77 e 0,20
0,6	f_c (MPa)	2,8	31,5	17	-0,04 e -0,92
	E_{ci} (GPa)	4,7	29,2	17	-0,38 e -0,91
	V_D (m.s ⁻¹)	436	3815	2126	-0,82 e -0,56
	V_I (m.s ⁻¹)	309	2566	1438	-0,74 e -0,47
0,7	f_c (MPa)	1,9	17,6	10	0,34 e - 0,52
	E_{ci} (GPa)	3,6	18,5	11	-0,01 e -0,75
	V_D (m.s-1)	311	3798	2055	0,01 e -0,23
	V_I (m.s-1)	207	2282	1245	-0,27 e -0,98

Las velocidades obtenidas son compatibles con los resultados de estudios científicos que sometieron al hormigón a los mismos niveles de temperatura (Yang et al., 2009; Ozawa et al., 2014, Güneyli et al., 2017; Hwang et al., 2018), demostrando que la metodología aplicada (niveles de temperatura-ensayo de ultrasonidos-ensayo destructivo) se aplicó correctamente. Algunos autores (Wendt, 2006; Forigo, 2017; Hwang et al., 2018) proponen utilizar la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas obtenidas en el ensayo directo para inferir la calidad, resistencia y rigidez del hormigón sometido a diferentes niveles de temperatura. Sin embargo, estos mismos autores no tienen en cuenta que las estructuras post-incendio no siempre tienen acceso a los extremos de la pieza, y que el método indirecto es ideal para evaluar estructuras. Por lo tanto, una contribución

científica de esta investigación es la creación de modelos para determinar la resistencia y la rigidez, con la velocidad de ultrasonidos obtenida por el método directo e indirecto asociada al conocimiento de la temperatura en la estructura.

Turgut y Kucuk (2006) y Savaliya et al. (2014) concluyeron que el método indirecto es el más preciso para detectar patologías, demostrando que la prueba directa tiene mayor sensibilidad para detectar defectos, pero no permite localizarlos, mientras que la prueba indirecta permite localizar mejor el defecto una vez detectado. A través del análisis de distribución de frecuencias (Tabla 4), fue posible obtener modelos de regresión múltiple entre la velocidad de propagación de las ondas y la temperatura (Tablas 4 y 5), contribuyendo a la literatura con los modelos propuestos por el Eurocódigo 2 (2004) y ABNT - NBR 15200 (2012), en la inferencia de la resistencia (f_c) y rigidez (E_{ci}) del hormigón sometido a altas temperaturas y tipos de enfriamiento..

Tabla 4. Correlación entre ensayos destructivos combinados con velocidad de propagación de ondas y temperatura, para enfriamiento lento.

Relación a/c	Parámetros	Modelo	P-Value	R ² (%)	Error de estimación
0,5	f_c	$f_c = 54,20 - 0,0038.V_D - 0,055.T$	0,000	99,66	0,70
		$f_c = 30,24 + 0,0022.V_I - 0,030.T$	0,000	99,64	0,72
	E_{ci}	$E_{ci} = 14,40 + 0,0037.V_D - 0,0062.T$	0,000	96,59	1,49
		$E_{ci} = 16,05 + 0,0050.V_I - 0,0077.T$	0,000	95,79	1,66
0,6	f_c	$f_c = 35,98 - 0,00080.V_D - 0,037.T$	0,000	99,56	0,75
		$f_c = 35,57 - 0,0011.V_I - 0,037.T$	0,000	99,58	0,74
	E_{ci}	$E_{ci} = 22,03 + 0,0023.V_D - 0,020.T$	0,000	97,39	1,60
		$E_{ci} = 25,04 + 0,0025.V_I - 0,023.T$	0,000	98,67	1,23
0,7	f_c	$f_c = 7,41 + 0,0027.V_D - 0,0060.T$	0,000	95,52	1,22
		$f_c = 33,52 - 0,0071.V_I - 0,034.T$	0,000	98,15	0,78
	E_{ci}	$E_{ci} = 19,13 - 0,000096.V_D - 0,017.T$	0,000	96,87	1,02
		$E_{ci} = 20,74 - 0,00086.V_I - 0,019.T$	0,000	96,92	1,01

Tabla 5. Correlación entre los ensayos destructivos combinados con la velocidad de propagación de las ondas y la temperatura, para el enfriamiento brusco.

Relación a/c	Parámetros	Modelo	P-Value	R ² (%)	Erro de estimación
0,5	f_c	$f_c = 51,45 - 0,0032.V_D - 0,052.T$	0,000	99,13	1,10
		$f_c = 61,51 - 0,0084.V_I - 0,063.T$	0,000	99,05	1,22
	E_{ci}	$f_c = 24,42 + 0,0013.V_D - 0,0182.T$	0,000	97,48	1,29
		$f_c = 12,31 + 0,0060.V_I - 0,0053.T$	0,000	97,72	1,23
0,6	f_c	$f_c = 36,61 - 0,0015.V_D - 0,038.T$	0,000	98,90	1,14
		$f_c = 34,72 - 0,0018.V_I - 0,036.T$	0,000	98,93	1,15
	E_{ci}	$E_{ci} = 33,74 - 0,00067.V_D - 0,033.T$	0,000	99,26	0,89
		$E_{ci} = 33,0939 - 0,00087.V_I - 0,033.T$	0,000	99,27	0,88
0,7	f_c	$f_c = -7,56 + 0,0077.V_D + 0,0087.T$	0,000	90,50	2,01
		$f_c = 61,87 - 0,020.V_I - 0,066.T$	0,000	95,21	1,42
	E_{ci}	$E_{ci} = 18,88 - 0,00090.V_D - 0,017.T$	0,000	97,09	0,83
		$E_{ci} = 18,82 - 0,0012.V_I - 0,017.T$	0,000	97,07	0,84

Todos los modelos de regresión resultaron estadísticamente significativos a un nivel de significación del 95% (P-valor < 0,05) - Tablas (6) y (7), con coeficientes de correlación superiores

Determinación de la resistencia y la rigidez del hormigón tras la simulación de un incendio mediante modelos de regresión múltiple entre la propagación de las ondas y la temperatura

al 95% para el enfriamiento lento y al 90% para el enfriamiento súbito, lo que indica que ambos modelos pueden ser utilizados para inferir la resistencia y rigidez del hormigón para diferentes temperaturas cuando alcanzan un pico máximo de 850°C.

Los valores de los coeficientes de correlación (R^2) obtenidos se encuentran dentro de los rangos de variación de las magnitudes involucradas en los modelos propuestos por investigadores como Wendt (2006), Forigo, (2017) y Hwang et al. (2018), utilizando características y metodología similares de las muestras en estudio como el tamaño de los agregados gruesos, probetas cilíndricas y variaciones en la relación w/c. Aunque las expresiones no son las mismas, no existen discrepancias en el comportamiento en base a los valores R^2 encontrados en los modelos de regresión múltiple en comparación con los modelos de regresión simple encontrados en la literatura. Así, los modelos de regresión múltiple utilizados para inferir (f_c) y (E_{ci}), con las magnitudes medidas en los ensayos de propagación de ondas ultrasónicas (V_D y V_I) para diferentes niveles y temperatura (T), para hormigones con resistencias a compresión entre 2 y 35 MPa.

4. CONCLUSIONES

A través de los ensayos realizados para analizar la relación entre la propagación de ondas y la resistencia a compresión y el modulo de elasticidad del hormigón para hormigones fabricados con diferentes relaciones agua/cemento (0,5, 0,6 y 0,7) sometidos a diferentes niveles de temperatura (ambiente, 250°C, 550°C y 850°C), fue posible concluir que:

Para las muestras con factor agua-cemento (0,7) los cambios en los parámetros físicos (P_m), mecánicos (f_c), de rigidez (E_{ci}) y acústicos (V_D y V_I) se producen para temperaturas superiores a 250°C, y para el factor agua-cemento (0,5 y 0,6) por encima de 550°C.

La pérdida de masa de las muestras cilíndricas y prismáticas es mayor para las muestras sometidas a una temperatura de 850°C, debido a la evaporación total del agua intersticial del hormigón, y a un mayor desconchado debido al astillamiento.

El enfriamiento lento tiene una mayor influencia sobre los parámetros mecánicos (f_c) y la rigidez (E_{ci}), mientras que el enfriamiento repentino contribuye a un aumento de los parámetros acústicos (V_D y V_I), debido a la absorción de agua en las muestras de hormigón a temperaturas de (250°C, 550°C y 850°C), reduciendo los huecos y contribuyendo a la propagación de las ondas.

A través de la velocidad de propagación de ondas obtenida por los métodos directo e indirecto, es posible detectar la presencia de patologías para hormigones expuestos a temperaturas superiores a 250°C.

Los modelos de regresión múltiple, sin distinguir la relación agua-cemento, fueron estadísticamente significativos (P -valor $< 0,05$) a un nivel de confianza del 95%, con coeficientes de determinación (R^2) superiores al 90%, permitiendo la predicción de la resistencia (f_c) y rigidez (E_{ci}), a través de la velocidad de propagación de onda directa e indirecta asociada a la temperatura, para el seguimiento y evaluación de la integridad de las estructuras después de situaciones de incendio.

La prueba de ultrasonidos es una herramienta de evaluación preliminar para la detección de patologías en las estructuras, así como de su resistencia estructural, que debe ir seguida de pruebas complementarias mediante métodos destructivos para validar el diagnóstico.

Los resultados presentados son indicativos del comportamiento del material de hormigón a escala de laboratorio, pero no pueden extrapolarse de forma simple y directa al comportamiento de estructuras reales de hormigón armado en situación de incendio, que pueden mostrar un comportamiento completamente diferente al obtenido en el laboratorio durante un incendio.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del grupo de investigación a la Asociación Brasileña de Cemento Portland (ABCP) de São Paulo, que facilitó las instalaciones y la infraestructura utilizadas en esta investigación.

6. REFERENCIAS

- American Concrete Institute (2013). ACI 228. 2R. *Report On Nondestructive Test Methods For Evaluation Of Concrete In Structures*, Detroit.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1997). *NBR 11578: Cimento Portland Composto*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). *Agregados: Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas Rio de Janeiro. 2006.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009). NBR NM 53. *Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009). NBR NM 52. *Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio de frasco Chapman*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1998). *NBR NM 67. Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2005). NBR 9778. *Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009). NBR 7211. *Agregados para concreto - Especificação*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). NBR 5738. *Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018) NBR 5739. *Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017). NBR 8522. *Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2019). NBR 8802. *Concreto Endurecido – Determinação da velocidade de propagação da onda ultra-sônica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2012). *NBR 15200: projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio*. Rio de Janeiro.
- Berriman, J., Purnell, P., Hutchins, D.A., Neild, A. (2005). *Humidity and aggregate content correction factors for air-coupled ultrasonic evaluation of concrete*, *Ultrason.*, Vol. 43, No. 4, Pp. 211–217.
- British standards institution (1998). BS 1881 - PART 203: *Recommendations for measurement of velocity pulses in concrete*. London: p.20.
- Camara, L.A., Wons, M., Esteves, I.C., Medeiros-Junior, R. A. (2019). *Monitoring the self-healing of concrete from the ultrasonic pulse velocity*. *Journal Of Composites Science*, V. 3, N. 1, P. 16. <https://doi.org/10.3390/jcs3010016>.
- Din En 12504-4: (2004). *Testing concrete in structures. Part 4: Determination Of Ultrasonic Pulse Velocity*, German.
- Estacechen, T. A. C. (2020). *Comparativo da resistência à compressão do concreto através de ensaios destrutivos e não destrutivos*. *CONSTRUINDO*, v. 12, n. 2, p. 23-37.
- European committee for standardization. (2004). En 1992-1-2: *Eurocode 2: Design Of Concrete Structures – Part 1.2: General Rules – Structural Fire Design*.
- European committee for standardization (2004). BS EN 12504:4, *Testing Concrete. Determination of ultrasonic pulse velocity*, Brussels.

- Forigo, C. (2017). *Determinação da resistência à compressão em concretos expostos a altas temperaturas por meio de ensaios não destrutivos*. Dissertação de mestrado. Universidade estadual de maringá. P. 215.
- Güneyli, H., Karahan, S., Güneyli, A. (2017). *Water content and temperature effect on ultrasonic pulse velocity of concrete*. Russian journal of nondestructive testing, v. 53, n. 2, p. 159-166. <https://doi.org/10.1134/S1061830917020024>.
- Gyu-yong, k. I. M., Young-Sun, K. I. M., Tae-Gyu, L. E. E. (2009). *Mechanical properties of high-strength concrete subjected to high temperature by stressed test*. Transactions of nonferrous metals society of china, v. 19, p. S128-s133. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(10\)60260-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(10)60260-9).
- Hwang, E., Kim, G., Choe, G., Yoon, M., Gucunski, N., Nam, J. (2018). *Evaluation of concrete degradation depending on heating conditions by ultrasonic pulse velocity*. Construction and building materials, v. 171, p. 511-520. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.178>.
- Kirchhof, L. D., Lorenzi, A., Silva F., Luiz C. P. (2015). *Assessment of concrete residual strength at high temperatures using ultrasonic pulse velocity*. The e-journal of nondestructive testing, v. 20, n. 7, p. 1-9.
- Lafhaj, Z., Goueygou, M., Djerbi, A., Kaczmarek, M. (2006). *Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water/cement ratio and water content*, Cem. Concr. Res., vol. 36, no. 4, pp. 625–633. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.11.009>.
- Lillamand, I., Chaix, J. F., Ploix, M. A., Garnier, V (2010). *Acoustoelastic effect in concrete material under uni-axial compressive loading*. NDT & E International, v. 43, n. 8, p. 655-660. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2010.07.001>.
- Moreno Jr, A. L., Souza, A. A. A. (2010). *Efeito de altas temperaturas na resistência a compressão, resistência a tração e modulo de deformação do concreto*. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, vol. 3, n. 4, p. 432-448.
- Ohdaira, E. And Masuzawa, N. (2000). *Water content and its effect on ultrasound propagation in concrete—the possibility of nde, ultrason.*, vol. 38, nos 1-8, pp. 546–552. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(99\)00158-4](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(99)00158-4).
- Ozawa, M, Morimoto, Hi. (2014). *Effects of various fibres on high-temperature spalling in high-performance concrete*. Construction and building materials, v. 71, p. 83-92. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.068>.
- Panzer, T.H., Rubio, J.C., Bowen, C.R., Vasconcelos, W.L., Strecker, K. *Correlation between structure and pulse velocity of cementitious composites*, adv. Cem. Res, vol. 20, no. 3, pp. 101–108. <https://doi.org/10.1680/adcr.2008.20.3.101>.
- Rilem TC 129-MHT: (2000). *Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures*. Part1-9.
- Rilem TC 200-HTC: (2007). *Mechanical concrete properties at high temperatures - modelling and application*.
- Savaliya, K. D., Thaker, K. K., Dave, U. V. (2014). *Comparison between different methods of ultrasonic pulse velocity tests on concrete*. International journal of engineering research and applications (ijera), (march), 41–44.
- Silva, R. R. C., Gonçalves, R., Bertoldo, C. P. (2020). *Classification and inspection of reinforced concrete elements for use in retaining walls using ultrasound tests*. Construction and Building Materials, v. 262, p. 120010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120010>.
- Sutan, N., M., Meganathan, M. A. (2003). *Comparasion Between Direct And Indirect Method Of Ultrasonic Pulse Velocity In Detecting Concrete Defects*. Journal ntd, vol. 8 no.05, may.
- Trtnik, G., Turk, G., Kavcic, F., Bosiljkov, V.B. (2008). *Possibilities of using the ultrasonic wave transmission method to estimate initial setting time of cement paste*, Cement and Concrete. Res., vol. 38, no. 11, pp. 1336–1342. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.08.003>.
- Turgut, P., Kucuk, O. F. (2006). *Comparative Relationships Of Direct, Indirect, And Semi-Direct Ultrasonic Pulse Velocity Measurements In Concrete*. Russian journal of nondestructive testing, 2006, vol. 42, no. 11, pp. 745–751. <https://doi.org/10.1134/S1061830906110064>.

- Viana, A. Cl. (2017). *Comportamento de ondas ultrassônicas em concreto aquecido até 400 °c*. Dissertação de mestrado, Ufsc-Universidade Federal De Santa Catarina, p.132.
- Wendt, S. C. (2006). *Análise da mudança de cor em concretos submetidos a altas temperaturas como indicativo de temperaturas alcançadas e da degradação térmica*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, p.188.
- Yang, H., Lin, Y., Hsiao, C., Liu, J. Y (2009). *Evaluating residual compressive strength of concrete at elevated temperatures using ultrasonic pulse velocity*. Fire safety journal, 44(1), 121-130. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.05.003>.
- Ye, G., Van Breugel, K., And Fraaij, A. L. A. (2011). *Experimental study on ultrasonic pulse velocity evaluation of the microstructure of cementitious material at early age*, Heron, vol. 46, no. 3, pp. 161–167.
- Yildirim, H., Sengul, O. (2011). *Modulus of elasticity of substandard and normal concretes*. Construction And Building Materials, v. 25, n. 4, p. 1645-1652. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.10.009>.
- Yüzer, N.; Aköz, F.; Öztürk, L. D. (2004). *Compressive strength–color change relation in mortars at high temperature*. Cement and Concrete Research, v. 34, n. 10, p. 1803-1807. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.015>.
- Zhang, J., Qin, L., And Li, Z.J. *Hydration monitoring of cement-based materials with resistivity and ultrasonic methods*, Material and Structures. Vol. 42, no. 1, p.15-24. <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9363-0>.