

Evaluación del ensayo de ultrasonido para la estimación de la profundidad de fisuras en concreto

M. T. A. Silva^{1*} , J. H. A. Rocha² , E. C. B. Monteiro¹ , Y. V. Póvoas¹ , E. R. Kohlman Rabbani¹ 

*Autor de Contacto: marcelajtavares@hotmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i1.289>

Recepción: 08/01/2019 | Aceptación: 18/10/2018 | Publicación: 30/12/2018

RESUMEN

Este trabajo tuvo como objetivo evaluar el ensayo de ultrasonido para estimar la profundidad de fisuras en concreto, utilizando un modelo matemático de la literatura, además de verificar la profundidad con mejores resultados. Se moldearon 4 prismas de hormigón para cada profundidad de fisura propuesta (5 cm, 10 cm y 15 cm), simuladas a través de chapas de zinc, colocadas durante el moldeo y retiradas antes de que el hormigón endurezca. Los resultados muestran que el ensayo es sensible para detectar la presencia de fisuras en el hormigón. El modelo matemático utilizado permitió estimar la mayoría de las profundidades de fisuras; pero los resultados se presentan dispersos y con un margen de error elevado para las profundidades de 5 cm y 15 cm, ya para 10 cm se presentó mejores resultados.

Palabras clave: ultrasonido; fisuras; concreto.

Citar como: M. T. A. Silva, J. H. A. Rocha, E. C. B. Monteiro, Y. V. Póvoas, E. R. Kohlman Rabbani (2019), "Evaluación del ensayo de ultrasonido para la estimación de la profundidad de fisuras en concreto", Revista ALCONPAT, 9 (1), pp. 79 – 92, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i1.289>

¹ Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil.

² Universidad Privada del Valle, Cochabamba, Bolivia.

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

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

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

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2019 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2019.

Evaluation of the ultrasound test for estimating the depth of cracks in concrete

ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate the ultrasound test to estimate the depth of cracks in concrete, using a mathematical model published in the literature, and to verify this depth with more accurate results. Four concrete test specimens were molded for each proposed crack depth (5 cm, 10 cm, and 15 cm), simulated using zinc plates, placed during molding and removed before concrete hardening. The results show that the test is sensitive enough to detect the presence of the cracks in the concrete. The mathematical model used allowed for an estimation of the depths of most cracks, but the results are scattered and have a high margin of error for the depths of 5 cm and 15 cm. The cracks of 10-cm depth produced better results.

Keywords: ultrasound test; cracks; concrete.

Avaliação do ensaio de ultrassom para a estimação da profundidade de fissuras em concreto

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar o ensaio de ultrassom para estimar a profundidade de fissuras em concreto, utilizando modelo matemático da literatura, também verificar a profundidade com melhores resultados. Foram moldados 4 prismas de concreto para cada profundidade de fissura proposta (5 cm, 10 cm e 15 cm), simuladas através de chapas de zinco, colocadas durante a moldagem e retiradas antes do concreto endurecer. Os resultados mostram que o ensaio é sensível para detectar a presença de fissuras no concreto. O modelo matemático utilizado permitiu estimar a maioria das profundidades de fissuras; mas, os resultados apresentam-se dispersos e com margem de erro elevada para as profundidades de 5 cm e 15 cm, já para 10 cm apresentou melhores resultados.

Palavras chave: ultrassom; fissuras; concreto.

1. INTRODUCCIÓN

Las fisuras son las manifestaciones patológicas más comunes en las estructuras de hormigón, normalmente aparecen como el resultado de los esfuerzos de tracción, los cuales el hormigón tiene dificultad para absorber. Entre los tipos de fisuras, se tienen aquellas como el resultado de los esfuerzos provocados por fenómenos térmicos o de retracción - que no traen peligro estructural, pero comprometen la estanqueidad y desempeño - y las provenientes de la falta de capacidad de la estructura en absorber tensiones, sea por subestimación de los esfuerzos durante el dimensionamiento o por la disminución de la resistencia del material, siendo estas últimas las más preocupantes según Silva Filho y Helene (2011). La detección oportuna de estos defectos puede evitar el rápido deterioro y prolongar la vida útil de las estructuras (Aggelis et al., 2010).

La evaluación de estructuras normalmente se la realiza a través de una inspección visual, cuyos resultados son subjetivos porque dependen de la experiencia del inspector (Rocha y Póvoas, 2017). Sin embargo, existen varios ensayos no destructivos (END) que permiten extraer información importante de las propiedades del concreto (Rehman et al., 2016), estos ensayos normalmente son utilizados para localizar y evaluar defectos en el concreto endurecido (Lorenzi et al., 2016). Lee, Chai y Lim (2016) consideran que los métodos disponibles de evaluación de fisuras de hormigón presentan sus propias limitaciones. Las técnicas de END más utilizadas en la inspección de estructuras de hormigón son: el ultrasonido (Aggelis et al., 2010), la termografía infrarroja

(Bagathiappan et al., 2013), la pacometría (Maran et al., 2015), el radar (Dabous et al., 2017) y la esclerometría (Tomazali y Helene, 2017).

El ensayo de ultrasonido puede determinar el módulo de elasticidad y masa específica del concreto (Pacheco et al., 2014), estimar la resistencia a la compresión con buena aproximación (Bungey, Millard y Grantham, 2006), como también localizar y dimensionar discontinuidades en la estructura (Menezes et al., 2016).

Varios trabajos vienen siendo desarrollados para detectar fallas y fisuras en el concreto a través del ensayo de ultrasonido (Aggelis et al., 2010; Wolf, Pirskawetz y Zang, 2015) y otros para estimar la profundidad de estas (Bungey, Millard y Grantham, 2006; Pinto et al., 2010; Souza, 2016). El trabajo desarrollado por In et al. (2017) utilizó la técnica de ultrasonido difusa para estimar la profundidad de fisuras en piezas de concreto que simulaban vigas reales, realizando una simulación bidimensional de elementos finitos, su investigación concluyó que es posible estimar la profundidad de fisuras como desvíos de 1 cm em relación a su medida central real. Seher et al. (2013) también utilizaron el ultrasonido difuso, combinando simulaciones bidimensionales con elementos finitos, para esto, analizaron los parámetros de onda para verificar sus variaciones en elementos fisurados y no fisurados. Llegando a la conclusión que es posible estimar la profundidad de fisuras con un error máximo de 10%.

Se demuestra que, en todas las investigaciones, los resultados son influenciados por varios factores como: profundidad de fisura, calidad de concreto, saturación del material, entre otros. En este contexto, el objetivo del presente artículo es evaluar el ensayo de ultrasonido para la estimación de la profundidad de fisuras en estructuras de concreto y, específicamente, la influencia de la profundidad de las fisuras en los resultados. Analizando la variación del tiempo que lleva el recorrido de la onda en las regiones fisuradas y no fisuradas.

2. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE ULTRASONIDO

Los equipos de ultrasonido utilizados en el concreto están diseñados para generar ondas longitudinales, también denominadas ondas sonoras (Bungey, Millard y Grantham, 2006). Solo las que se encuentran en el rango de frecuencia entre 20Hz y 20.000Hz son perceptibles al oído humano, ya las ondas inferiores a 20Hz se denominan infrasónicas y las ondas superiores a 20.000Hz son denominadas ultrasónicas (Posani et al., 2017).

Los resultados obtenidos por el ensayo se ven afectados por diversos factores como la distancia entre las superficies de contacto de los transductores; la presencia de armadura, principalmente en el sentido de propagación de la onda; la masa específica del concreto, que depende de la dosificación y de las condiciones del hormigonado; el tipo, la masa específica y otras características del agregado; el tipo de cemento y grado de hidratación; el tipo de vibrado, y la edad del concreto (Pacheco et al., 2014, Lorenzi et al, 2013, Mohamad et al., 2015).

La ejecución del ensayo de ultrasonido en estructuras de concreto presenta diversas ventajas, tales como: el equipo utilizado para el ensayo es de fácil operación y no tiene un costo muy elevado; es un ensayo no destructivo, y puede aplicarse en cualquier momento, ya que no deteriora la estructura. Sin embargo, el ensayo tiene algunas limitaciones, pues la interpretación de sus resultados es meramente cualitativa en relación con la calidad del concreto, por lo que es necesario utilizarlo junto con otros ensayos para obtener resultados más conclusivos (Aggelis et al., 2010).

El ensayo de ultrasonido en Brasil está regulado por la NBR 8802 - Concreto endurecido - Determinación de la propagación de ondas ultrasónicas (ABNT, 2013). Según la norma, existen tres maneras para la transmisión de las ondas sobre la superficie del concreto: forma directa, semidirecta e indirecta, como se muestra en la Figura 1.

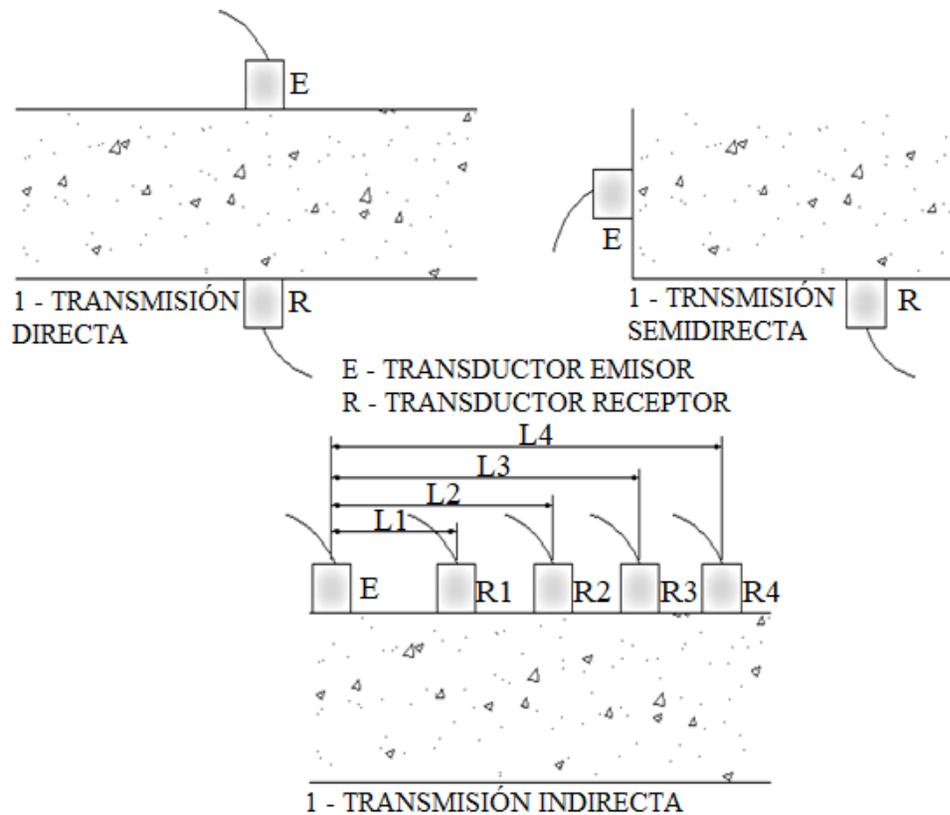


Figura 1. Posicionamiento de los transductores (ABNT, 2013)

3. METODOLOGIA

Para alcanzar el objetivo de la presente investigación, fueron moldeados prismas de concreto a fin de representar elementos reales, en los cuales fueron inducidas fisuras para estimar la profundidad de estas utilizando el modelo matemático propuesto por Bungey, Millard y Grantham (2006). Se realizaron un total de 12 prismas de concreto, cuatro para cada una de las tres profundidades de fisuras propuestas (5 cm, 10 cm y 15 cm) y se consideraron cuatro distancias entre los transductores para la realización del ensayo (10 cm, 20 cm, 30 cm y 40 cm).

Para facilitar el análisis de los resultados, los prismas fueron divididos en 3 grupos (series) de acuerdo con la profundidad de la fisura: Serie I - prismas con 5 cm de profundidad; Serie II - prismas con 10 cm de profundidades, y Serie III - prismas con 15 cm de profundidad.

El equipo utilizado fue 58-E4800 UPV, de frecuencia estándar de 54 KHz y con transductores de 50 mm de diámetro (CONTROLS GROUP, 2017).

3.1 Primas de concreto

Las dimensiones de los prismas de concreto fueron 20 x 20 x 50 cm. La fisura fue inducida en el eje de estos a través de la colocación de una chapa de cinc, espesor de 0,95 mm, la cual fue retirada antes de que el concreto endureciera. Todos los prismas fueron ejecutados con la misma altura, pues en la revisión bibliográfica no se encontró la influencia directa de este parámetro en los resultados. La Figura 2 muestra el detalle de los cuerpos de prueba.

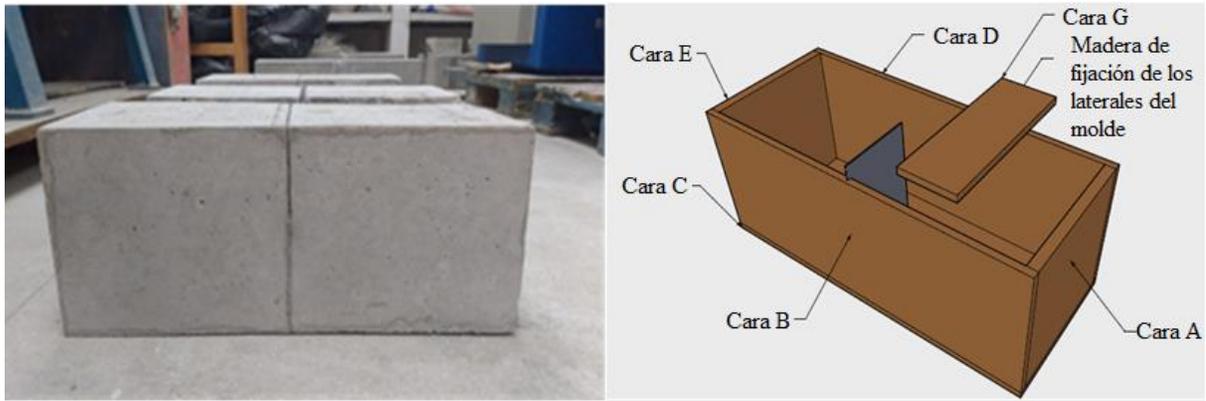


Figura 2. Detalle de los prismas de concreto

La relación agua/cemento utilizada fue de 0,5 y la dosificación (Cemento: Grava: Arena) fue de 1: 1,46: 2,51. El cemento utilizado fue el CPII Z-32. La grava y la arena fueron ensayadas de acuerdo con la NBR 7211 (ABNT, 2009), donde la distribución granulométrica encontrada atendió a los límites recomendados y el diámetro máximo de la grava utilizada fue de 19 mm.

Con el propósito que la cantidad de prismas utilizados en el trabajo sea representativa para el uso de la estadística en el análisis de los resultados, es importante que las observaciones de las variables independientes estén en una proporción mayor de 5 para 1, en otras palabras, 5 observaciones para cada variable independiente; sin embargo, el nivel recomendado está entre 15 y 20 para 1 variable, para que la muestra sea considerada representativa (Hair et al., 2009). En el presente estudio se consideraron 2 variables, profundidad de fisura y distancia de ejecución del ensayo, las cuales multiplicadas por 20, dan la cantidad ideal de 40 observaciones. No obstante, en total se realizaron 96 observaciones (4 prismas x 3 profundidades x 4 distancias x 2 Repeticiones), valor por encima de la cantidad recomendada.

3.2 Modelo matemático de estimación de profundidad de fisuras propuesto por Bungey, Millard y Grantham (2006)

El modelo permite estimar la profundidad de fisura perpendicular a la superficie de hormigón cuando el modo de transmisión es indirecto. Por lo tanto, los transductores deben colocarse equidistantes de la fisura, como se muestra en la Figura 3 (a) y (b).

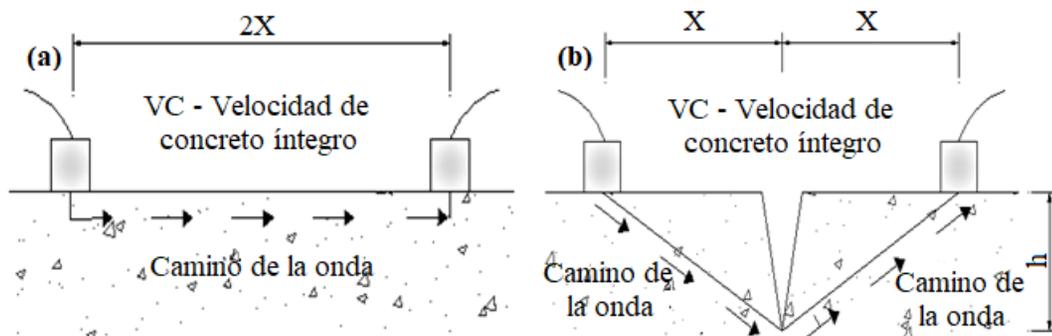


Figura 3 - (a) Recorrido de la onda en el concreto íntegro, (b) Recorrido de la onda alrededor de la fisura

Para aplicar este modelo, se debe adoptar como "Vc" la velocidad de la onda ultrasónica en el concreto íntegro obtenido a través del modo indirecto. Es decir, se encuentra una velocidad "Vc" en una región del concreto sin fisura con una distancia $Y = 2X$ entre los transductores.

Considerando que la onda se desviará de la fisura y que la velocidad será la misma por tratarse del mismo material, en el momento de la realización de la lectura en la región con fisura a una distancia "X" del eje de la fisura al transductor, como se muestra en la Figura 3, es posible estimar la profundidad de la fisura. La diferencia entre estos dos recorridos se dará en el tiempo de propagación de la onda, ya que la velocidad "Vc" será la misma.

El modelo tiene como premisa que la velocidad será igual para los dos recorridos y que la onda se desviará, por tratarse de una onda mecánica, la cual necesita un medio para propagarse. La ecuación (1) representa el modelo matemático, que es el resultado de velocidades iguales en ambas trayectorias de la onda.

$$h = x \sqrt{\left(\frac{T_f}{T_c}\right)^2 - 1} \text{ (cm)} \quad (1)$$

Donde:

h = profundidad de la fisura estimada por el modelo (cm);

x = distancia del eje del transductor al eje de la fisura (cm);

Tc = tiempo de propagación de la onda en el concreto íntegro, definido como la ecuación (2).

$$T_c = \frac{2x}{V_c} \text{ (\mu s)} \quad (2)$$

Tf = tiempo de propagación de la onda alrededor de la fisura, definido como la ecuación (3).

$$T_f = \frac{2\sqrt{x^2+h^2}}{V_c} \text{ (\mu s)} \quad (3)$$

3.3 Ejecución del ensayo

El ensayo de ultrasonido fue ejecutado a través del modo indirecto, evitando rugosidades en la superficie ensayada como indica la NM -58 (ABNT, 1996). La calibración del equipo se realizó antes de iniciar las mediciones de acuerdo con el procedimiento descrito en el manual (CONTROLS GROUP, 2017).

Se ha demarcado una malla de observaciones en la superficie ensayada, compuesta por dos líneas, superior e inferior, cuyo detalle se presenta en la Figura 4. En todos los puntos del ensayo donde se realizaron las mediciones se aplicó vaselina como acoplamiento del transductor a la superficie.

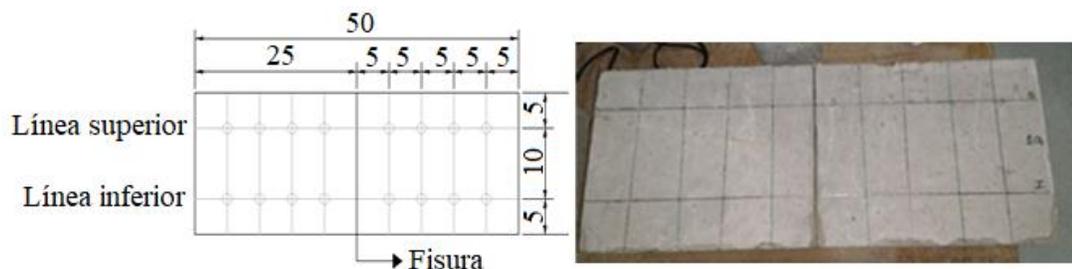


Figura 4. Esquema de la marcación del ensayo

Para cada punto de la malla, se realizaron dos lecturas de tiempo a través del ultrasonido y se consideró la media de las dos para aplicación del modelo.

La NBR 8802 (ABNT, 2013) proporciona directrices para la obtención de la velocidad de la onda a través del modo indirecto, donde el transductor emisor tiene un punto fijo y el transductor receptor se desplaza a distancias determinadas. Con los datos obtenidos se realiza un gráfico de tiempo versus distancia, para luego ser trazado la recta que mejor se ajusta a los puntos, donde la tangente de la recta es la velocidad de la onda.

Para aplicar el modelo de Bungey, Millard y Grantham (2006), es necesario la obtención de los tiempos de propagación de la onda por el modo indirecto en el concreto sin fisuras - T_c , los cuales deben ser obtenidos en las mismas distancias que se obtendrán los tiempos en la región de la fisura - T_f .

Para la obtención del T_c , el transductor emisor fue fijado en el primer punto de la malla y el transductor receptor fue desplazado cada 5 cm, obteniéndose de esta forma los tiempos para las distancias entre los transductores $Y = 5\text{cm}$, 10cm y 15cm , conforme Figura 5 (a), (b) y (c). Donde E - Transductor emisor; R - Transductor receptor, y Y - Distancia entre los transductores (cm).

Con los resultados de las tres lecturas de tiempo se trazó el gráfico de distancia (cm) versus tiempo (μs), para luego obtener la recta que mejor se ajusta a los puntos (Figura 6) y, de esta forma, encontrar los tiempos de propagación de la onda en el concreto íntegro ajustado por la recta - T_c' para todas las distancias necesarias para la aplicación del modelo, $Y = 10\text{cm}$, 20cm , 30cm e 40cm , como se muestra en la Tabla 1, que presenta los resultado de la primera repetición del primer prisma de la Serie II. La identificación de las mediciones está compuesta principalmente por el número de prisma de la serie (1, 2, 3 y 4), después por la profundidad ($P_5 = 5\text{ cm}$, $P_{10} = 10\text{ cm}$ y $P_{15} = 15\text{ cm}$), seguida por la distancia de ejecución del ensayo ($D_{10} = 10\text{ cm}$, $D_{20} = 20\text{ cm}$, $D_{30} = 30\text{ cm}$ y $D_{40} = 40\text{ cm}$) y al final por la repetición (-1 para la primera y -2 para la segunda).

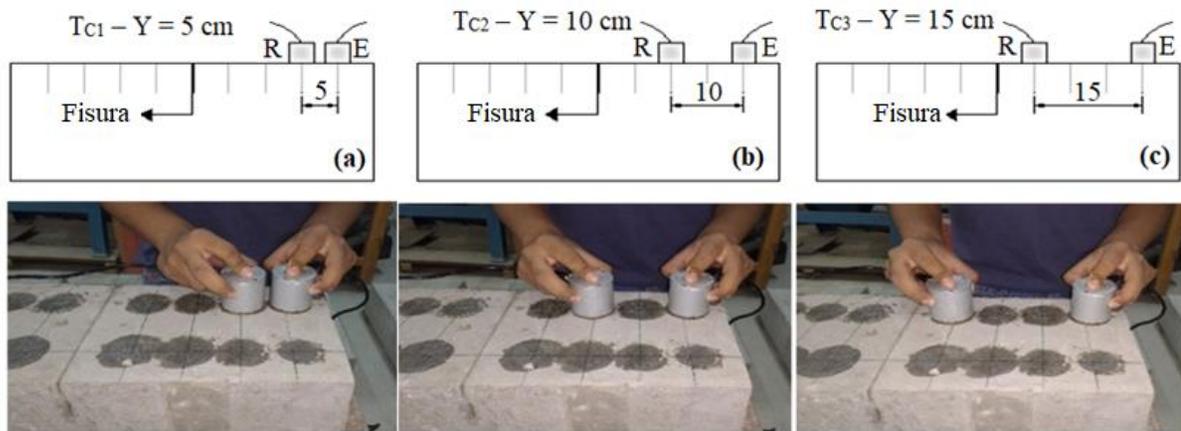


Figura 5. Lecturas del tiempo en el concreto íntegro - T_c con transductores distanciados a: (a) 5 cm; (b) 10 cm; (c) 15 cm

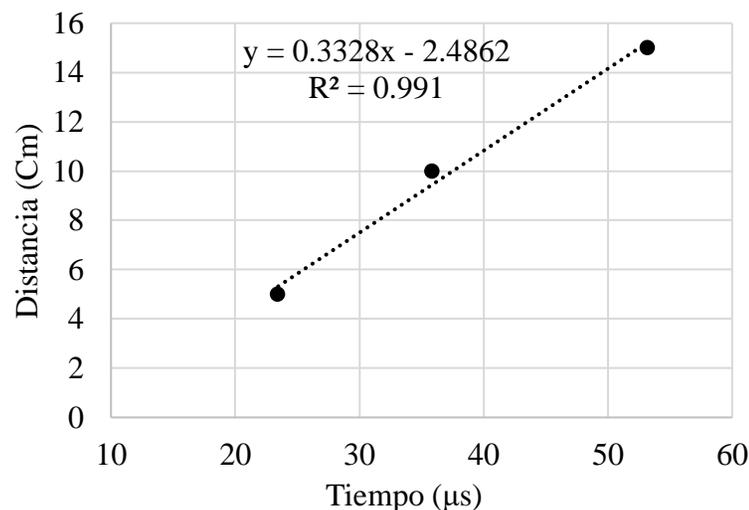


Figura 6. Gráfico distancia x tiempo (Serie II - Prisma 1 - Primera repetición)

Tabla 1. Tc' (Serie II - Prisma 1 - Primera repetición)

Tiempo ajustado - Tc' (μs) - Serie II - Prisma I			
Identificación	Tc (μs)	Y (cm)	Tc' (μs)
1P10D5-1	23,45	5,00	22,49
1P10D10-1	35,88	10,00	37,52
1P10D15-1	53,23	15,00	52,54
1P10D20-1	-	20,00	67,56
1P10D30-1	-	30,00	97,61
1P10D40-1	-	40,00	127,66
Ecuación lineal			$Y = 0,3328X - 2,4862$
Intercepción			-2,4862
"Vc"(cm/μs)- coef. Angular			0,3328

Los tiempos ajustados - Tc' fueron encontrados para las distancias Y = 10cm, 20cm, 30cm y 40cm, siendo $Y = 2X$, donde X es la distancia entre el eje de la fisura y el transductor.

En el caso de la medición del tiempo de propagación de la onda alrededor de la fisura - Tf, se realizaron las lecturas con las distancias entre los transductores de Y = 10 cm, 20 cm, 30 cm y 40 cm, como se muestra en la Figura 7 (a) (b) (c) (d).

Una vez obtenidos los tiempos Tc' y Tf para las mismas distancias, entre el eje de la fisura y el transductor, es posible estimar la profundidad de la fisura a través del modelo propuesto por Bungey, Millard y Grantham (2006) mediante el procedimiento presentado en la sección anterior. El procedimiento mostrado para obtener el Tc' y el Tf, fue repetido para todas las series, los 4 prismas de hormigón de cada serie y para las dos repeticiones.

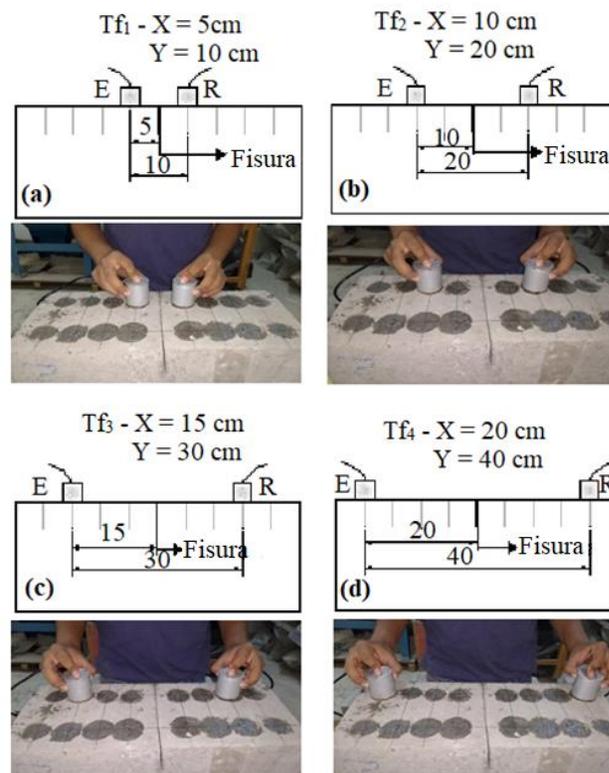


Figura 7. Lecturas alrededor de la fisura con transductores distanciados a: (a) 10 cm; (b) 20 cm; (c) 30 cm; (d) 40 cm

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Con los resultados de las profundidades de las fisuras (h') de las Series (I, II, III) encontrados en la aplicación del modelo matemático propuesto por Bungey, Millard y Grantham (2006), se realizó un análisis estadístico para verificar qué serie presentó los resultados más significativos.

La Tabla 2 presenta, de forma resumida, los resultados encontrados para las Series I, II y III.

Tabla 2 – Resultados de la profundidad de la fisura

PROFUNDIDAD DE LA FISURA h'					
Serie I		Serie II		Serie III	
Identificación	h' (cm)	Identificación	h' (cm)	Identificación	h' (cm)
1P5D10-1	5,68	1P10D10-1	6,71	1P15D10-1	10,43
1P5D20-1	6,34	1P10D20-1	9,82	1P15D20-1	12,27
1P5D30-1	11,20	1P10D30-1	11,22	1P15D30-1	10,51
1P5D40-1	11,15	1P10D40-1	9,78	1P15D40-1	7,23
2P5D10-1	3,82	2P10D10-1	6,05	2P15D10-1	24,40
2P5D20-1	4,00	2P10D20-1	7,15	2P15D20-1	19,57
2P5D30-1	7,35	2P10D30-1	*	2P15D30-1	24,56
2P5D40-1	3,12	2P10D40-1	*	2P15D40-1	21,86
3P5D10-1	4,43	3P10D10-1	5,63	3P15D10-1	11,10
3P5D20-1	3,08	3P10D20-1	7,74	3P15D20-1	15,79
3P5D30-1	9,13	3P10D30-1	6,64	3P15D30-1	14,64
3P5D40-1	14,97	3P10D40-1	11,60	3P15D40-1	11,08
4P5D10-1	3,32	4P10D10-1	6,22	4P15D10-1	9,56
4P5D20-1	4,05	4P10D20-1	8,70	4P15D20-1	9,19
4P5D30-1	3,20	4P10D30-1	5,11	4P15D30-1	5,92
4P5D40-1	10,62	4P10D40-1	7,35	4P15D40-1	*
1P5D10-2	4,82	1P10D10-2	6,38	1P15D10-2	12,21
1P5D20-2	3,74	1P10D20-2	4,96	1P15D20-2	14,95
1P5D30-2	15,17	1P10D30-2	*	1P15D30-2	10,25
1P5D40-2	15,21	1P10D40-2	*	1P15D40-2	7,94
2Z5D10-2	3,08	2P10D10-2	7,01	2P15D10-2	25,73
2P5D20-2	*	2P10D20-2	5,98	2P15D20-2	22,01
2P5D30-2	5,88	2P10D30-2	*	2P15D30-2	27,28
2P5D40-2	9,00	2P10D40-2	*	2P15D40-2	26,97
3P5D10-2	4,70	3P10D10-2	6,58	3P15D10-2	13,64
3P5D20-2	3,93	3P10D20-2	5,27	3P15D20-2	14,70
3P5D30-2	9,04	3P10D30-2	*	3P15D30-2	15,80
3P5D40-2	10,59	3P10D40-2	*	3P15D40-2	11,59
4P5D10-2	2,67	4P10D10-2	8,19	4P15D10-2	14,19
4P5D20-2	*	4P10D20-2	9,54	4P15D20-2	16,19
4P5D30-2	6,48	4P10D30-2	7,61	4P15D30-2	17,45
4P5D40-2	8,94	4P10D40-2	4,17	4P15D40-2	16,87

*Resultados que no pudieron ser calculados por el modelo, pues $T_c > T_f$.

En la Tabla 2, se puede observar que el modelo matemático de Bungey, Millard y Grantham (2006) permitió determinar la profundidad de las fisuras en el 88.5% de las observaciones realizadas. Es importante considerar que, en el porcentaje restante, 11.5%, no fue posible determinar la

profundidad debido a que el tiempo de propagación de onda en la región fisurada fue menor que el tiempo en la región íntegra, inviabilizando la aplicación del modelo. El análisis de los resultados de las Series (I, II, III) utilizando estadística descriptiva se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3 - Estadística descriptiva de la variable profundidad

Estadística dos resultados	Profundidad real (h)		
	Serie I (5 cm)	Serie II (10 cm)	Serie III (15 cm)
Valor mínimo encontrado	2,67	4,17	5,92
Valor máximo encontrado	15,21	11,60	27,28
Media	6,96	7,31	15,35
Mediana	5,78	6,86	14,64
Variancia	15,03	3,83	36,47
Desviación estándar	3,88	1,96	6,04
Coefficiente de variación	55,72%	26,78%	39,34%
Número de observaciones	30	24	31

Se percibe de los resultados encontrados que el modelo presentó variaciones significativas en las tres series. La Serie III (15 cm) presentó la mayor varianza y desviación estándar en comparación con las demás series, demostrando una gran dispersión en este conjunto de datos. La Serie II (10 cm) fue la que obtuvo mejores índices en el análisis de la dispersión de los datos, presentando menor varianza, desviación estándar y coeficiente de variación. La Serie I (5 cm) presentó dispersión intermedia, pero el coeficiente de variación fue más alto, ya que la desviación estándar representó cerca del 55% de la media.

Pinto et al. (2010) estudiaron también la estimación de la profundidad de fisuras en prismas de hormigón, analizaron cuatro profundidades diferentes (50 mm, 75 mm, 100 mm y 150 mm), con distancias de ejecución del ensayo de 100 mm y 150 mm, aplicando el mismo modelo matemático y llegaron las estimaciones presentadas en la Figura 8.

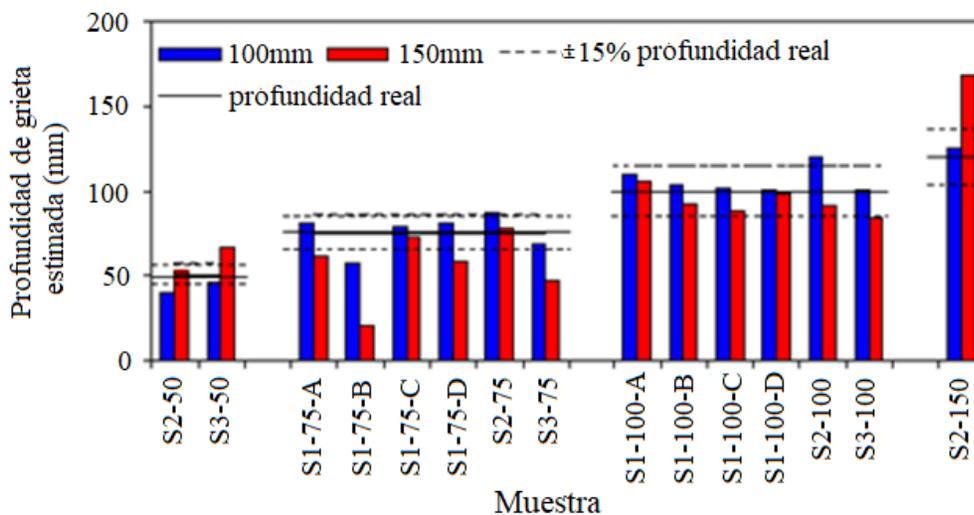


Figura 8. Profundidad de la Fisuras (Pinto et al, 2010)

Donde la nomenclatura fue identificada inicialmente por la serie analizada, a continuación, la profundidad y luego el prisma de concreto analizado, por ejemplo, S1-75-B (Serie 1, profundidad de 75 mm, prisma B).

Los autores concluyeron que los resultados en su mayoría quedaron dentro del margen de error del 15% de la profundidad real de la fisura. Resultado coherente del encontrado en este trabajo, donde los mejores resultados fueron encontrados en la profundidad de fisura de 10 cm.

Para facilitar el entendimiento del comportamiento de los resultados encontrados, fue utilizado en la Figura 9, el boxplot de las 3 series, herramienta gráfica de la estadística que representa la variación de los datos de una variable numérica por medio de cuartiles.

El boxplot (gráfico de caja) está formado por un cuadro paralelo al eje de la variable. El borde inferior representa el primer cuartil, la línea gruesa la mediana (2° cuartil) y la arista superior al 3° cuartil. La línea que se extiende en vertical indica el límite superior e inferior de los datos. Esta caja representa el 50% de los valores centrales de la distribución. Cuanto más achatada sea la caja, menos dispersos son los datos.

Se percibe que los datos de la Serie II (10 cm) fueron los que presentaron menor variabilidad, ya los datos de la Serie III (15 cm) presentaron mayor dispersión. De esta forma los datos de la Serie II (10 cm) se comportaron mejor en relación con las demás series en el análisis estadístico descriptivo.

Para complementar el análisis de los resultados se utilizó estadística inferencial, con la aplicación del intervalo de confianza (I.C) con nivel de confianza del 95%. Esto significa que se ha buscado un intervalo numérico en torno a la media, donde en el 95% de las veces la media se situará en este intervalo. El valor del I.C representa el margen de error, para más y para menos, en relación con la media.

Para este trabajo se consideró aceptable un margen de error del 20%, tomando como referencia la medida real de la profundidad de fisura, es decir, 1 cm para la Serie I; 2 cm para la Serie II y 3 cm para la Serie III.

Para el análisis de la variable profundidad, la Tabla 4 presenta los intervalos de confianza para las 3 series analizadas. La Figura 10 muestra los gráficos del intervalo de confianza para cada serie en relación con la variable profundidad.

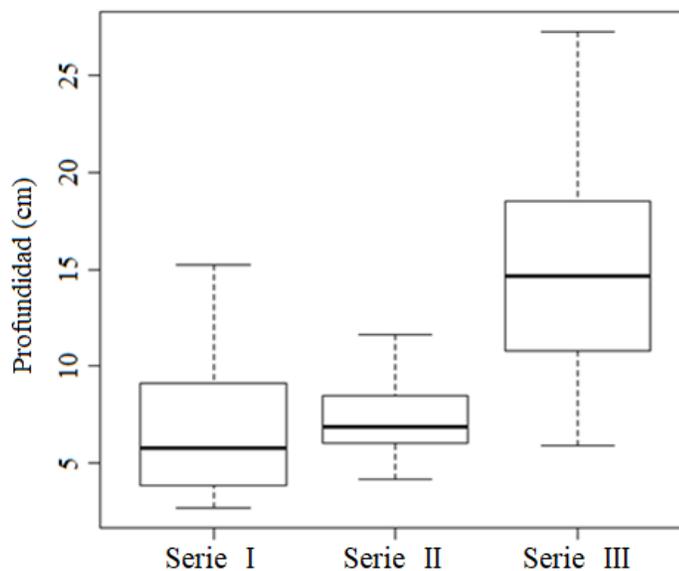


Figura 9. Boxplot variable: Profundidad

Tabla 4. Intervalo de confianza de la variable profundidad

Serie	I.C (erro)	Límite inferior	Media	Límite superior
Serie I	1,45 29%	5,51	6,96	8,40
Serie II	0,83 8%	6,48	7,31	8,14
Serie III	2,22 15%	13,14	15,35	17,57

Ratificando lo que fue comentado en el análisis descriptivo, los datos de la Serie III (15 cm) presentaron un valor del I.C mayor que las demás series, mientras que la Serie II (10 cm) presentó el menor valor del I.C. Siendo el I.C mayor, el margen de error aumenta para que la confianza del 95% sea atendida, haciendo que el intervalo sea mayor, lo que puede ser percibido a través de la Tabla 4.

La existencia de un intervalo o un margen de error alto, la aplicación en estructuras reales se vuelve inviable, pues conduce a una gran variación en la estimación de la profundidad de las fisuras.

Para la Serie III, la variación de la profundidad calculada por el modelo está entre el intervalo de 13,14 cm a 17,57 cm, siendo la profundidad real de 15 cm.

En la Serie II, que presentó el menor I.C, la profundidad calculada por el modelo puede variar de 6,48 cm a 8,14 cm. A pesar de ser un intervalo pequeño, se percibe que la medida real de la profundidad, que es de 10 cm, no se encuentra dentro del intervalo de confianza, hecho que compromete la aplicación del modelo.

La Serie I, que presentó un I.C intermedio, la profundidad de fisura calculada por el modelo varía de 5,51 cm a 8,40 cm, la profundidad real, que es de 5 cm, también se encuentra fuera del intervalo.

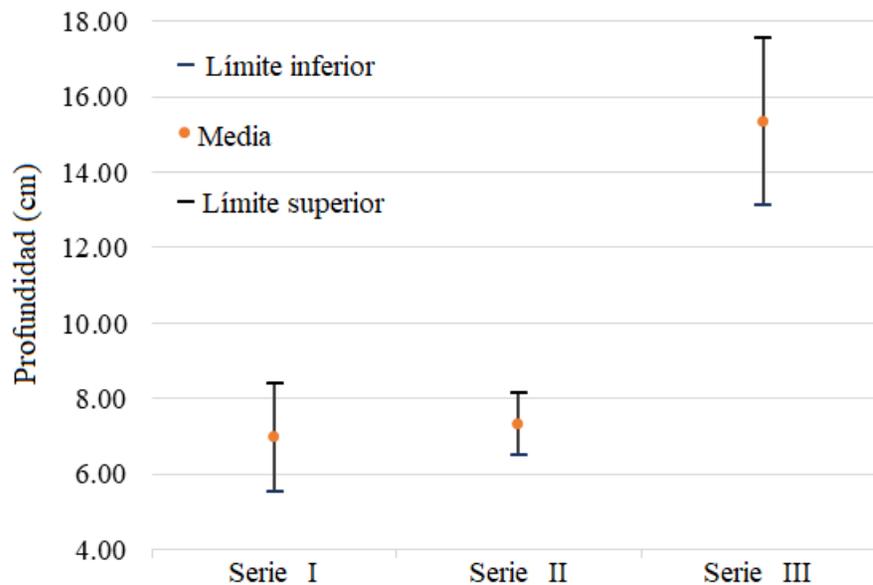


Figura 10. Gráfico do intervalo de confiança (Variável profundidade)

Es posible aún percibir de los resultados presentados, que para las distancias entre los transductores mayores (30 y 40 cm) existe una mayor variación de los datos, ya para las distancias de ejecución del ensayo menores (10 y 20 cm) se encuentra una menor dispersión y margen de error.

El modelo propuesto de Bungey, Millard y Grantham (2006) es aplicable para encontrar la profundidad de las fisuras, pero con gran dispersión de los resultados. Esta alta variabilidad de los resultados se debe principalmente al concreto que no es un material homogéneo y la velocidad de propagación de la onda puede variar, ya que el modelo adopta un camino de onda ideal; sin embargo, el recorrido puede ser diferente del adoptado.

5. CONSIDERACIONES FINALES

En el presente estudio, se realizó una investigación experimental para evaluar de manera estadística la eficiencia del método de ultrasonido para la estimación de fisuras.

El ensayo proporciona información evidente sobre la detección de fisuras en el hormigón, ya que el tiempo de propagación de onda es considerablemente mayor que en las regiones integras del hormigón.

La estimación de la profundidad de las fisuras mediante el modelo propuesto en la literatura permite encontrar valores para un porcentaje elevado de las observaciones realizadas; sin embargo, los valores se presentan muy dispersos, y, con relación a la profundidad de fisura, se percibe que los resultados presentan un margen de error alto, comprometiendo los resultados y aplicación en campo.

La combinación con otros ensayos no destructivos puede caracterizar mejor estos defectos además de proporcionar más información y, de esta forma, eliminar algunas incertidumbres que el ensayo del ultrasonido presenta.

6. AGRADECIMENTOS

A la CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) por el apoyo financiero.

7. REFERENCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), “*NBR 7211: Agregados para concreto - especificação*” (Rio de Janeiro, Brasil: ABNT).
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1996), “*NM 58: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica*” (Rio de Janeiro, Brasil: ABNT).
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013), “*NBR 8802: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica*” (Rio de Janeiro, Brasil: ABNT).
- Aggelis, D. G., Kordatos, E. Z., Soulioti, D. V., Matikas, T. E. (2010), “*Combined use of thermography and ultrasound for the characterization of subsurface cracks in concrete*”, Construction and Building Materials, V. 24, No. 10, pp. 1888-1897. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.014>
- Bagavathiappan, S., Lahiri, B., Saravanan, T., Philip, J. (2013). “*Infrared thermography for condition monitoring – A review*”, Infrared Physics & Technology, V.60, No. 1, pp. 35-55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2013.03.006>
- Bungey, J. H., Millard, S. G., Grantham, M. G. (2006), “*Testing of concrete in structures*” (Oxon, United Kingdom: Taylor & Francis), p. 353.
- Controls Group (2017), “*Catálogo técnico do medidor de pulso ultrassônico*”. Disponível em: <<http://www.controls-group.com/eng/concrete-testing-equipment/ultrasonic-pulse-velocity-tester.php>>. Acesso em 06 de janeiro 2018.
- Dabous, S., Yaghi, S., Alkass, S., Moselhi, O. (2017), “*Concrete bridge deck condition assessment using IR Thermography and Ground Penetrating Radar technologies*”, Automation in Construction, V.74, pp. 340-354. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.04.006>
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., Anderson, R. E., Tatham, R. L. (2009) “*Análise Multivariada de Dados*”. BOOKMAN, 6 ed. Porto Alegre, Brasil, p. 688.
- In, C. W., Arne, K., Kim, J. Y., Kurtis, K. E., Jacobs, L. J. (2017), “*Estimation of Crack Depth in Concrete Using Diffuse Ultrasound: Validation in Cracked Concrete Beams*”, Journal of Nondestructive Evaluation, V.36, No.4. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10921-016-0382-4>
- Lee, F. W., Chai, H. K., Lim, K. S. (2016). “*Assessment of Reinforced Concrete Surface Breaking Crack Using Rayleigh Wave Measurement*”, SENSORS, V.3, No. 3, 337. DOI: <https://dx.doi.org/10.3390/s16030337>
- Lorenzi, A., Reginato, L. A., Lorenzi, L. S., Silva Filho, L. C. P. (2016), “*Emprego de ensaios não destrutivos para inspeção de estruturas de concreto*”, Revista IMED, V.3, No. 3, pp. 3-13. DOI: <https://doi.org/10.18256/2358-6508/rec-imed.v3n1p3-133>

- Lorenzi, A., Reginato, L. A., Favero, R. B., Chies, J. A., Caetano, L. F., Silva Filho, L. C. P. (2013), “*Tomografia Ultrassônica 3D para Avaliação de Estruturas de Concreto*” Techne: Revista de Tecnologia da Construção (São Paulo), v. 198, p. 36-44, 2013. Disponível em: < <http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/198/artigo296324-1.aspx> >. Acesso em 18 de setembro 2018.
- Maran, A. P., Menna Barreto, M. F. F., Rohden, A. B., Dal Molin, D. C. C., Masuero, J. R. (2015), “*Análise da espessura do cobrimento de armadura em lajes com diferentes distanciamentos entre espaçadores e pontos de amarração*”, Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, V.8, No. 5, pp. 625-643. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952015000500005>
- Menezes, V. S., Ferronato, D. N. L., Santos, E. M., Feiteira, J. F. S. (2016), “*Estudo do comportamento da porosidade de pasta de cimento por ultrassom*” in: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 60. Águas de Lindóia: IBRACON (Brasil), Disponível em:< <http://www.metallum.com.br/60cbc/anais/PDF/06-048TT.pdf> >. Acesso em 06 de janeiro 2018.
- Mohamad, G., Carmo, P. I. O., Oliveira, M. J. D., Temp, A. L. (2015), “*Métodos combinados para avaliação da resistência de concretos*”, Revista Matéria, V.20, No. 1, pp. 83-99. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-707620150001.0011>
- Pacheco, J., Bilesky, P., Morais, T. R., Grando, F., Helene, P. (2014), “*Considerações sobre o Módulo de Elasticidade do concreto*” in: Congresso Brasileiro do Concreto, 56, Natal: IBRACON (Brasil), (2014). Disponível em:< <http://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/06/269.pdf> > . Acesso em 06 de janeiro 2018.
- Pinto, R. C. A., Medeiros, A., Padaratz, I. J., Andrade, P. B. (2010) “*Use of Ultrasound to Estimate Depth of Surface Opening Cracks in Concrete Structures*”, E-Journal of Nondestructive Testing and Ultrasonics, V.8, p. 1-11.
- Possani, D., Rodrigues, D., Correia, F., Morais, D. (2017), “*Ondas ultrassônicas: teoria e aplicações industriais em ensaios não-destrutivos*”, Revista brasileira de física tecnológica aplicada, V.4, No. 1, p.16-33. DOI: <http://dx.doi.org/10.3895/rbfta.v4n1.5073>
- Rehman, S., Ibrahim, Z., Memon, S., Jameel, M. (2016), “*Nondestructive test methods for concrete bridges: A review*”, Construction and Building Materials, V.107, No. 15, pp. 58-86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.0111>
- Rocha, J. H. A., Póvoas, Y. V. (2017), “*A termografia infravermelha como um ensaio não destrutivo para a inspeção de pontes de concreto armado: Revisão do estado da arte*”, Revista ALCONPAT, V.7, No. 3, p.200-2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i3.223>
- Seher, M., In, C. W., Kim, J. Y., Kurtis, K. E., Jacobs, L. J. (2013), “*Numerical and experimental study of crack depth measurement in concrete using diffuse ultrasound*”, Journal of Nondestructive Evaluation, V.32, No. 1, p.81-92. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10921-012-0161-9>
- Silva Filho, L. C. P., Helene, P. R. L. (2011), “*Análise de estruturas de concreto com problemas de resistência e fissuração*” in.: ISAIÁ, Geraldo C. Concreto: Ciência e Tecnologia, 1Edição, São Paulo: Editora IBRACON (Brasil), pp. 1124-1174.
- Souza, G. B. (2016), “*Avaliação do método de propagação de onda ultrassônica na determinação da profundidade de fissura em concreto*”, Dissertação de mestrado em engenharia civil, Universidade Católica de Pernambuco, p. 155.
- Tomazeli, A., Helene, P. R. L. (2017), “*Diretrizes para a inspeção em estruturas de obras paralisadas*”, Revista Estrutura, 4 ed, p. 30-37. Disponível em: < http://abece.com.br/Revista_estrutura/Edicao4/files/assets/basic-html/page30.html >. Acesso em 20 de setembro 2018.
- Wolf, J., Pirskawetz, S., Zang, A. (2015) “*Detection of crack propagation in concrete with embedded ultrasonic sensors*”. Engineering Fracture Mechanics, V.146, p. 161-171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2015.07.058>