

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

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

* Autor de Contato: marcelajtavares@hotmail.com

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

Recepção: 08/01/2018 | Aceitação: 18/10/2018 | Publicação: 30/12/2018

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.

Citar como: M. T. A. Silva, J. H. A. Rocha, E. C. B. Monteiro, Y. V. Póvoas, E.R. Kohlman Rabbani (2019), "Avaliação do ensaio de ultrassom para a estimação da profundidade de fissuras em 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.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT International A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2019, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 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.

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

RESUMEN

Este trabajo tuvo como objetivo evaluar el ensayo de ultrasonido para estimar la profundidad de fisuras en concreto, utilizando modelo matemático de la literatura, también 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 moldeado 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 presentó mejores resultados.

Palabras clave: ultrasonido; fisuras; concreto.

1. INTRODUÇÃO

As fissuras são as manifestações patológicas mais comuns nas estruturas de concreto, normalmente aparecem como resultado dos esforços de tração, os quais o concreto tem dificuldade em absorver. Dentre os tipos de fissuras, tem-se as decorrentes dos esforços provocados por fenômenos térmicos ou de retração – que não trazem perigo estrutural, porém comprometem a estanqueidade e desempenho – e as provenientes da falta de capacidade da estrutura em absorver tensões, seja por subestimação dos esforços durante o dimensionamento ou pela diminuição da resistência do material, sendo as últimas preocupantes segundo Silva Filho e Helene (2011). A detecção oportuna destes defeitos pode evitar a rápida deterioração e prolongar a vida útil das estruturas (Aggelis et al., 2010).

A avaliação de estruturas normalmente é realizada através de uma inspeção visual, cujos resultados são subjetivos porque dependem da experiência do inspetor (Rocha e Póvoas, 2017). No entanto, existem diversos ensaios não destrutivos (END) que permitem extrair informações importantes das propriedades do concreto (Rehman et al., 2016), e normalmente são utilizados para localização e avaliação de defeitos no concreto endurecido (Lorenzi et al., 2016). Lee, Chai e Lim (2016) consideram que os métodos disponíveis de avaliação de fissuras de concreto apresentam suas próprias limitações. As técnicas de END mais utilizadas na inspeção de estruturas de concreto são:

a ultrassonografia (Aggelis et al., 2010), a termografia (Bagathiappan et al., 2013), a pacometria (Maran et al., 2015), o radar (Dabous et al., 2017) e a esclerometria (Tomazali e Helene, 2017). O ensaio de ultrassom pode determinar o módulo de elasticidade e massa específica do concreto (Pacheco et al., 2014), estimar a resistência à compressão com boa aproximação (Bungey, Millard e Grantham, 2006), como também localizar e dimensionar descontinuidades na estrutura (Menezes et al., 2016).

Diversos trabalhos vêm sendo desenvolvidos para detectar falhas e fissuras no concreto através do ensaio de ultrassom (Aggelis et al., 2010; Wolf, Pirskawetz e Zang, 2015) e outros para estimar a profundidade das mesmas (Bungey, Millard e Grantham, 2006; Pinto et al, 2010; Souza, 2016). O trabalho desenvolvido por In et al. (2017) utilizou a técnica de ultrassom difusa para estimar profundidade de fissuras em peças de concreto que simulavam vigas reais, realizando simulação bidimensional de elementos finitos, sua pesquisa concluiu que é possível estimar profundidades de fissuras com desvios de 1 cm em relação a medida central real. Seher et al (2013) também utilizaram o ultrassom difuso, combinado com simulações bidimensionais em elementos finitos, para isto, analisaram os parâmetros de onda para verificar suas variações em elementos fissurados e não fissurados. Chegando à conclusão que é possível estimar a profundidade de fissuras com erro máximo de 10%.

Demonstrou-se que em todas as pesquisas os resultados são influenciados por vários fatores como: profundidade de fissura, qualidade de concreto, saturação do material, entre outros. Neste contexto, o objetivo do presente artigo é avaliar o método de ultrassom para estimação da profundidade de fissuras em estruturas de concreto e especificamente a influência da profundidade das fissuras nos resultados. Analisando a variação do tempo que leva o percurso da onda, nas regiões fissuradas e não fissuradas.

2. ENSAIO DE ULTRASSOM PROCEDIMIENTO

Os equipamentos de ultrassom utilizados no concreto são projetados para gerar ondas longitudinais, também denominadas ondas sonoras (Bungey, Millard e Grantham, 2006). Aquelas que se encontram na faixa de frequência entre 20Hz e 20.000Hz são audíveis ao ouvido humano, já as ondas abaixo de 20Hz são denominadas infrassônicas e as acima de 20.000Hz são ultrassônicas. (Possani et al., 2017).

Os resultados obtidos pelo ensaio são afetados por diversos fatores como a distância entre as superfícies de contato dos transdutores; a presença de armadura, principalmente no sentido de propagação da onda; massa específica do concreto, que depende do traço e das condições de concretagem; tipo, massa específica e outras características do agregado; tipo de cimento e grau de hidratação; tipo de adensamento e idade do concreto (Pacheco et al., 2014; Lorenzi et al, 2013; Mohamad et al.,2015)

A realização do ensaio de ultrassom nas estruturas de concreto apresenta diversas vantagens, tais como: o equipamento utilizado para o ensaio é de fácil operação e tem custo não muito elevado; é um ensaio não destrutivo; e, pode ser aplicado a qualquer momento, pois não deteriora a estrutura. No entanto, o ensaio possui algumas limitações, pois a interpretação dos seus resultados é meramente qualitativa em relação à qualidade do concreto, sendo necessário, por esta razão, utilizá-lo em conjunto com outros ensaios a fim de obter resultados mais conclusivos (Aggelis et al., 2010). O ensaio de ultrassom no Brasil é regulado pela NBR 8802 – Concreto endurecido – Determinação da propagação de ondas ultrassônicas (ABNT, 2013). Segundo a norma, existem três maneiras para a transmissão das ondas sobre a superfície do concreto: forma direta, semidireta e indireta, como ilustrado na Figura 1.

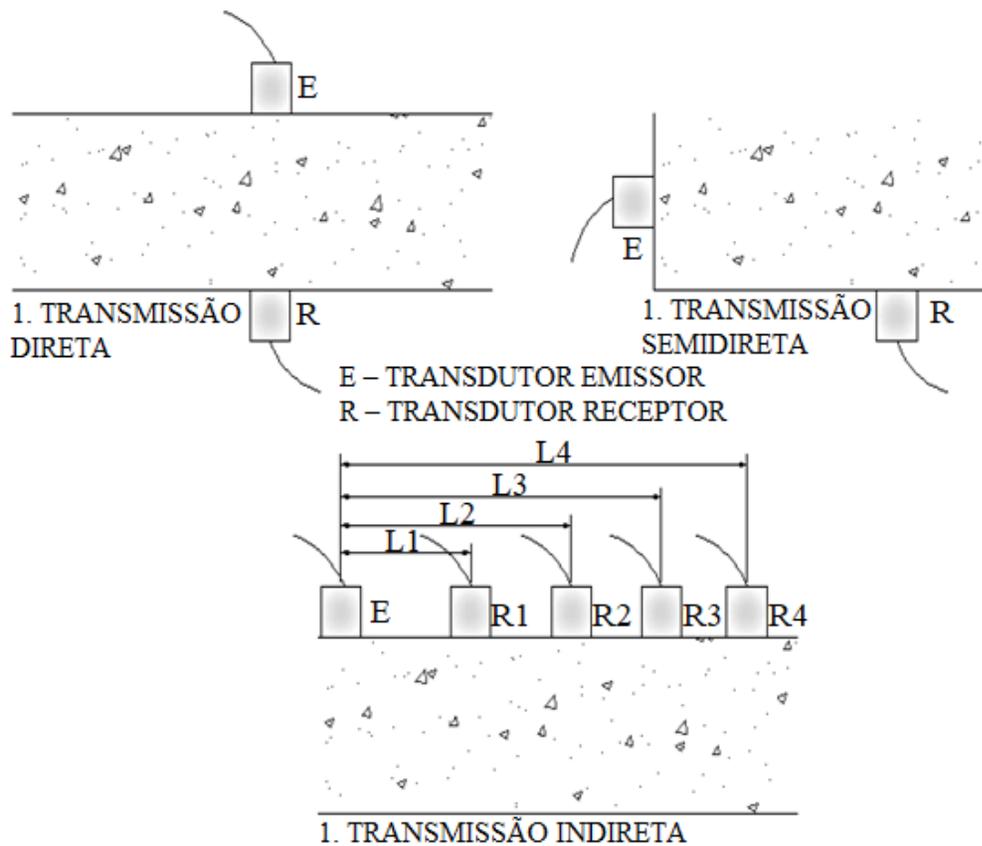


Figura 1. Posicionamento dos transdutores (ABNT, 2013)

3. METODOLOGIA

Para alcançar objetivo da presente pesquisa, foram moldados prismas de concreto a fim de representar elementos reais, nos quais foram induzidas fissuras para estimar a profundidade das mesmas utilizando o modelo matemático proposto por Bungey, Millard e Grantham (2006). Foram moldados um total de 12 prismas de concreto, quatro para cada uma das três profundidades de fissuras propostas (5 cm, 10 cm e 15 cm) e foram consideradas quatro distâncias entre os transdutores para realização do ensaio (10 cm, 20 cm, 30 cm e 40 cm).

Para facilitar a análise dos resultados, os prismas foram divididos em 3 grupos (séries) de acordo com a profundidade da fissura: Série I - prismas com 5cm de profundidade; Série II - prismas com 10 cm de profundidades; e Série III - prismas com 15cm de profundidade

O equipamento utilizado foi 58-E4800 UPV, de frequência padrão de 54 KHz e com transdutores com 50mm de diâmetro (CONTROLS GROUP, 2017).

3.1 Corpos de prova

As dimensões das primas de concreto foram 20 x 20 x 50 cm. A fissura foi induzida no eixo dos mesmos através da colocação de uma chapa de zinco de espessura 0,95 mm, a qual foi retirada antes do concreto endurecer. Todos os prismas foram executados com as mesmas profundidades, pois pesquisa bibliográfica demonstrou não influenciar nos resultados. A Figura 2 mostra o detalhe dos corpos de prova.

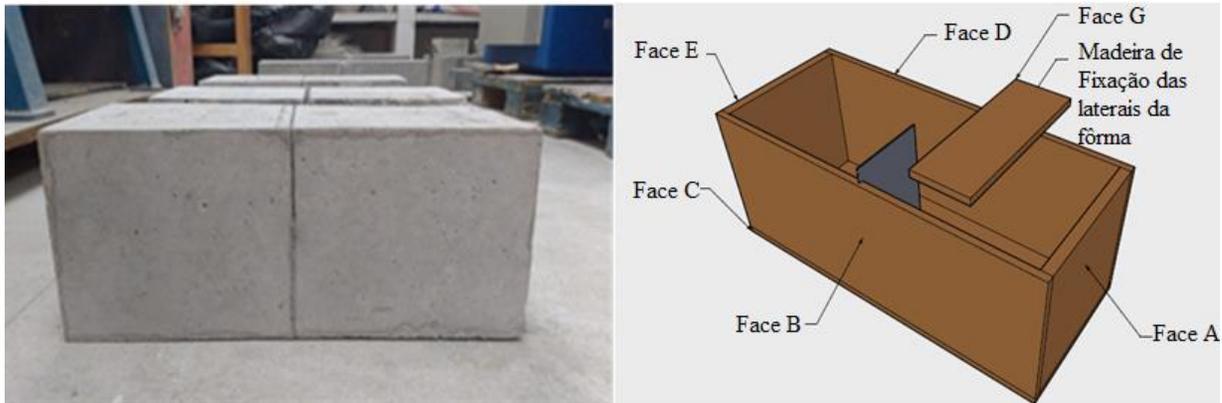


Figura 2. Detalhe dos prismas de concreto

A relação água/cimento utilizada foi de 0,5 e o traço (Cimento: Brita: Areia) foi de 1:1,46:2,51. O cimento utilizado foi o CII Z-32. A brita e a areia foram ensaiadas de acordo norma NBR 7211 (ABNT, 2009), onde a distribuição granulométrica atendeu aos limites recomendados e o diâmetro máximo da brita utilizada foi de 19 mm.

A fim de que a quantidade de prismas utilizada no trabalho seja representativa, para o uso da estatística na análise dos resultados, é importante que as observações das variáveis independentes estejam em proporção maior que 5 para 1, ou seja 5 observações para cada variável independente; no entanto, o nível recomendado está entre 15 e 20 para 1 variável, para que a amostra seja considerada representativa (Hair et al., 2009). No presente estudo foram consideradas 2 variáveis, profundidade de fissura e distância de execução do ensaio, as quais multiplicadas por 20, tem-se a quantidade ideal de 40 observações. Não obstante, no total foram realizadas 96 observações (4 prismas x 3 profundidades x 4 distâncias x 2 Repetições), valor acima da quantidade recomendada.

3.2 Modelo matemático de estimação de profundidade de fissuras proposto por Bungey, Millard e Grantham (2006)

O modelo permite estimar a profundidade de fissura perpendiculares à superfície de concreto quando o modo de transmissão é indireto. Por isso, os transdutores devem ser colocados equidistantes da fissura, como é mostrado na Figura 3 (a) e (b).⁷

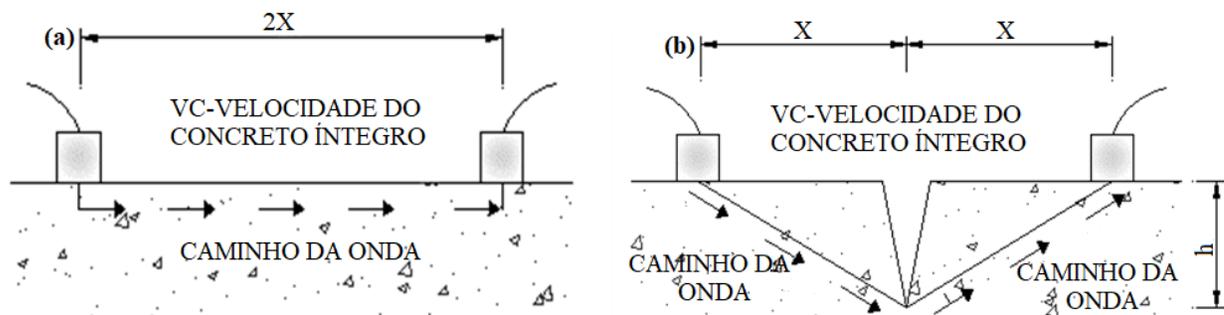


Figura 3. (a) Percurso da onda no concreto íntegro, (b) Percurso da onda ao redor da fissura

Para aplicar este modelo, deve-se adotar como “Vc” a velocidade da onda ultrassônica no concreto íntegro obtido através do modo indireto. Ou seja, encontra-se uma velocidade “Vc” numa região do concreto sem fissura com uma distância $Y = 2X$ entre os transdutores.

Considerando que a onda se desviará da fissura e que a velocidade será a mesma por se tratar do mesmo material, no momento da realização da leitura na região com fissura a uma distância “X” do eixo da fissura ao transdutor, como é mostrado na Figura 3, é possível estimar a profundidade

da fissura. A diferença entre estes dois percursos se dará no tempo de propagação da onda, uma vez que a velocidade “Vc” será a mesma.

O modelo tem como premissa que a velocidade será igual para os dois percursos e que a onda se desviará, por se tratar de uma onda mecânica, a qual necessita de um meio para se propagar. A equação (1) representa o modelo matemático proposto, ela é resultado da igualdade das velocidades nos dois percursos da onda.

$$h = x \sqrt{\left(\frac{Tf}{Tc}\right)^2 - 1} \quad (cm) \quad (1)$$

Onde:

h = profundidade da fissura estimada pelo modelo (cm);

x = distância do eixo do transdutor ao eixo da fissura (cm);

Tc – tempo de propagação de onda no concreto íntegro, definido como a (2).

$$Tc = \frac{2x}{Vc} \quad (\mu s) \quad (2)$$

Tf – tempo de propagação ao redor da fissura, definido como como a (3).

$$Tf = \frac{2\sqrt{x^2+h^2}}{Vc} \quad (\mu s) \quad (3)$$

3.3 Execução do ensaio

O ensaio de ultrassom foi executado através do modo indireto, evitando rugosidades na superfície ensaiada como indica a NM -58 (ABNT, 1996). A calibração do equipamento foi realizada antes de iniciar as medições de acordo ao procedimento descrito no manual (CONTROLS GROUP, 2017).

Foi demarcada uma malha de observações na superfície ensaiada, composta por duas linhas, superior e inferior, cujo detalhe é apresentado na Figura 4. Em todos os pontos do ensaio onde foram realizadas as medições foi aplicado vaselina como acoplamento do transdutor a superfície.

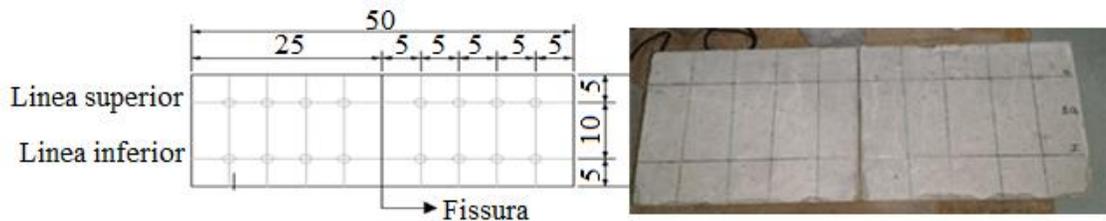


Figura 4. Esquema da marcação do ensaio

Para cada ponto da malha, foram realizadas duas leituras de tempo através do ultrassom e considerada a média das duas para aplicação do modelo.

A norma NBR 8802 (ABNT, 2013) fornece diretrizes para a obtenção da velocidade da onda através do modo indireto, onde o transdutor emissor tem um ponto fixo e transdutor receptor é deslocado a distâncias determinadas. Com os dados obtidos realiza-se um gráfico de tempo versus distância, para depois ser traçada a reta que melhor se ajusta aos pontos, onde a tangente da reta é a velocidade da onda.

Para aplicar o modelo de Bungey, Millard e Grantham (2006), é necessário a obtenção dos tempos de propagação da onda pelo modo indireto no concreto sem fissuras – T_c , os quais devem ser obtidos nas mesmas distâncias que serão obtidos os tempos na região de fissura – T_f .

Para obtenção do T_c , o transdutor emissor foi fixado no primeiro ponto da malha e o transdutor receptor foi deslocado a cada 5 cm, obtendo-se desta forma os tempos para as distâncias entre os transdutores $Y = 5\text{cm}$, 10cm e 15cm , conforme Figura 5 (a), (b) e (c). Onde E – Transdutor emissor; R – Transdutor receptor; e, Y – Distância entre os transdutores (cm).

Com os resultados das três leituras de tempo foi plotado o gráfico de distância (cm) versus tempo (μs), para em seguida obter a reta que melhor se ajusta aos pontos (Figura 6) e, desta forma, encontrar os tempos de propagação de ondas no concreto íntegro ajustados pela reta – T_c' para todas as medidas de distâncias necessárias para aplicação do modelo, $Y = 10\text{cm}$, 20cm , 30cm e 40cm , como mostrada na Tabela 1, que apresenta os resultados da primeira repetição do primeiro prisma da série II. A identificação das medições está composta primeiramente pelo número de prisma da série (1, 2, 3 e 4), depois pela profundidade ($P5 = 5\text{cm}$, $P10 = 10\text{cm}$ e $P15 = 15\text{cm}$), seguidamente pela distância de execução do ensaio ($D10 = 10\text{cm}$, $D20 = 20\text{cm}$, $D30 = 30\text{cm}$ e $D40 = 40\text{cm}$) e no final pela repetição (-1 para a primeira e -2 para a segunda).

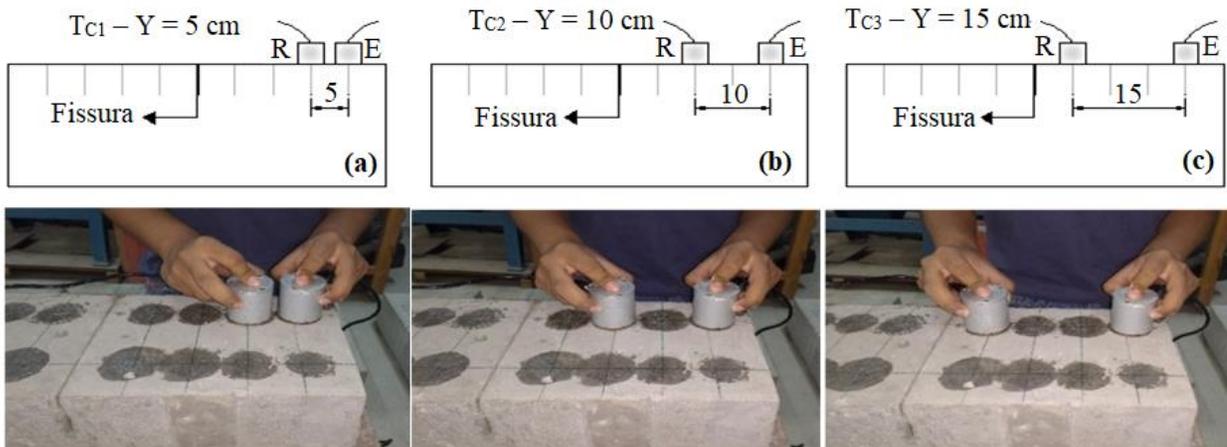


Figura 5. Leituras do tempo no concreto íntegro – T_c com transdutores distanciados a: (a) 5 cm; (b) 10 cm; (c) 15 cm.

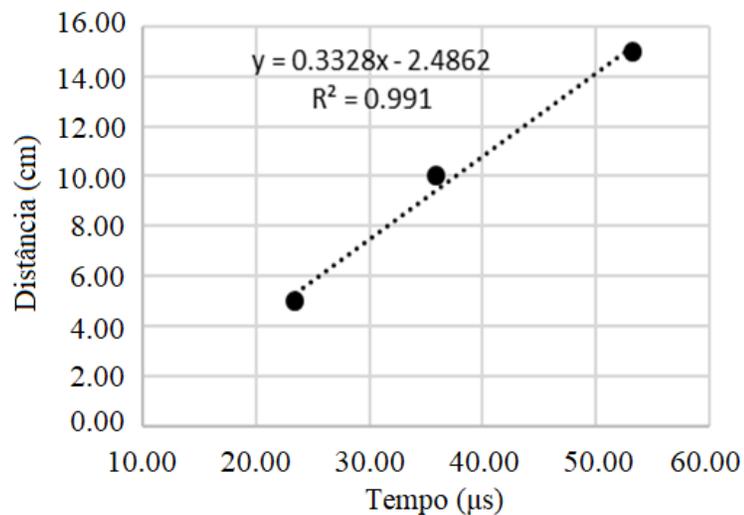


Figura 6. Gráfico distância x tempo (Série II – Prisma 1 – Primeira repetição)

Tabela 1. Tc' (Série II - Prisma 1 – Primeira repetição)

Tempo ajustado - Tc' (μs) - Série 2 - prisma I			
Identificação	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
Equação Linear			$Y = 0,3328X - 2,4862$
Intercepção			-2,4862
"Vc"(cm/μs)- coef. Angular			0,3328

Os tempos ajustados - Tc' foram encontrados para as distâncias Y = 10cm, 20cm, 30cm e 40cm, sendo $Y = 2X$, onde X é a distância entre o eixo da fissura e o transdutor.

No caso da medição do tempo de propagação da onda ao redor da fissura – Tf, foram realizadas as leituras com as distâncias entre os transdutores de Y = 10 cm, 20 cm, 30 cm e 40 cm, conforme mostrado na Figura 7 (a) (b) (c) (d).

Uma vez obtidos os tempos Tc' e Tf para as mesmas distâncias, entre o eixo da fissura e o transdutor, é possível estimar a profundidade da fissura através do modelo proposto por Bungey, Millard e Grantham (2006) mediante o procedimento apresentado na seção anterior.

O procedimento mostrado para obtenção do Tc' e do Tf, foi repetido para todas as 3 séries, os 4 prismas de concreto de cada série e para as duas repetições Tf₁ - X = 5cm

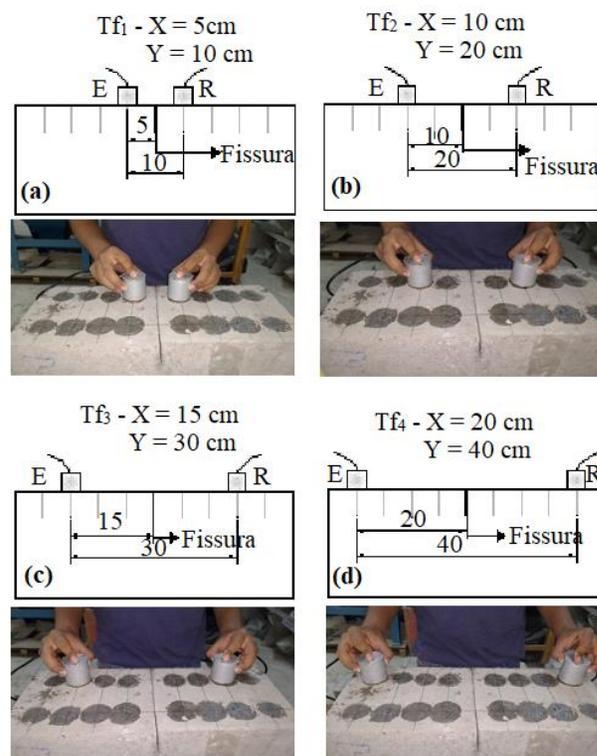


Figura 7. Leituras ao redor da fissura com transdutores distanciados a: (a) 10 cm; (b) 20 cm; (c) 30 cm; (d) 40 cm

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com os resultados das profundidades das fissuras (h') das Séries (I, II, III) encontrados na aplicação do modelo matemático proposto por Bungey, Millard e Grantham (2006), foi realizada uma análise estatística para verificar qual Série apresentou resultados mais significativos.

A Tabela 2 apresenta, de forma resumida, os resultados encontrados para as Séries I, II e III.

PROFUNDIDADE DA FISSURA h'					
Série I		Série II		Série III	
Identificação	h' (cm)	Identificação	h' (cm)	Identificação	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 não puderam ser calculados pelo modelo, pois $T_c > T_f$.

Mediante a Tabela 2, pode ser observar que o modelo matemático de Bungey, Millard e Grantham (2006) permitiu determinar a profundidade das fissuras em 88.5% das observações realizadas. É importante considerar que na porcentagem restante, 11.5%, não foi possível determinar a

profundidade devido a que o tempo de propagação de onda na região fissurada ter sido menor do que o tempo na região íntegra, inviabilizando a aplicação do modelo. A análise dos resultados das Séries utilizando a estatística descritiva estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Estatística descritiva da variável profundidade

Estatística dos resultados	Profundidade real (h)		
	Série I (5 cm)	Série II (10 cm)	Série III (15 cm)
Valor mínimo encontrado	2,67	4,17	5,92
Valor máximo encontrado	15,21	11,60	27,28
Média	6,96	7,31	15,35
Mediana	5,78	6,86	14,64
Variância	15,03	3,83	36,47
Desvio padrão	3,88	1,96	6,04
Coefficiente de variação	55,72%	26,78%	39,34%
Número de observações	30	24	31

Percebe-se dos resultados encontrados que o modelo apresentou variações significativas em todas as três Séries. A Série III (15 cm) apresentou a maior variância e desvio-padrão em comparação com as demais Séries, demonstrando uma grande dispersão neste conjunto de dados. A Série II (10 cm) foi a que obteve melhores índices na análise da dispersão dos dados, apresentando menor variância, desvio-padrão e coeficiente de variação. Já a Série I (5 cm) apresentou dispersão intermediária, porém o coeficiente de variação foi mais alto, já que o desvio-padrão representou cerca de 55% da média.

Pinto et al. (2010) estudaram também a estimativa da profundidade de fissuras em prismas de concreto, analisaram quatro profundidades diferentes (50 mm, 75 mm, 100 mm e 150 mm), com distância de execução do ensaio de 100 mm e 150 mm, aplicando o mesmo modelo matemático e chegaram as estimativas apresentadas na Figura 8.

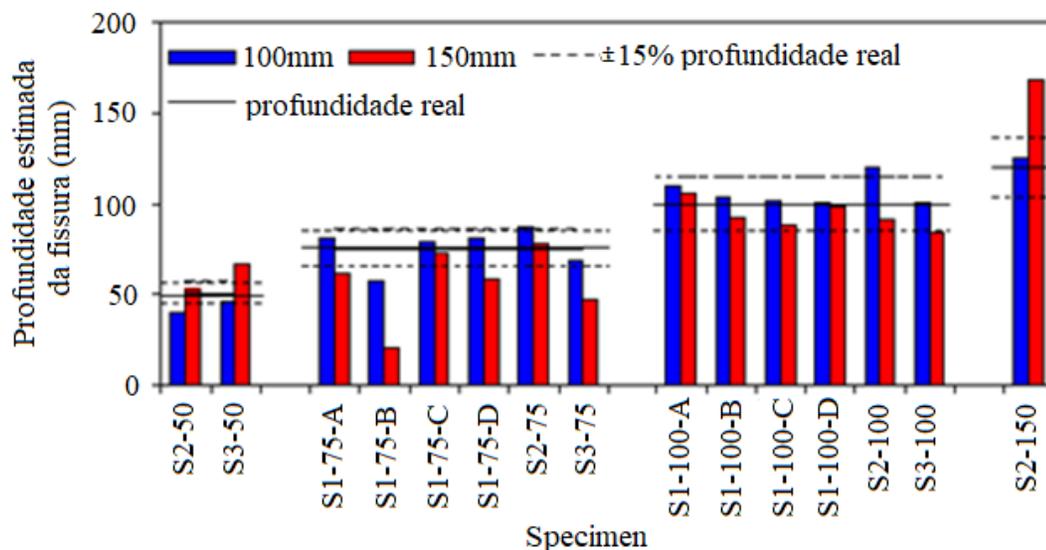


Figura 8. Profundidades de fissuras (Pinto et al, 2010)

Onde a nomenclatura era identificada inicialmente pela série analisada, em seguida a profundidade e depois o molde analisado, por exemplo, S1-75-B (Série 1, profundidade de 75 mm, prisma B).

Os autores concluíram que os resultados em sua maioria ficaram dentro da margem de erro de 15% da profundidade real da fissura. Resultado coerente do encontrado neste trabalho, onde os melhores resultados foram encontrados na profundidade de 10 cm.

Para facilitar o entendimento do comportamento dos resultados encontrados, foi utilizado na Figura 9 o boxplot das 3 Séries, ferramenta gráfica da estatística que representa a variação dos dados de uma variável numérica por meio de quartis.

O boxplot (gráfico de caixa) é formado por uma caixa paralela ao eixo da variável. A aresta inferior representa o 1º quartil, a linha grossa a mediana (2º quartil) e a aresta superior o 3º quartil. A linha que se estende na vertical indica o limite superior e inferior dos dados. Esta caixa representa os 50% dos valores centrais da distribuição. Quanto mais achatada a caixa, menos dispersos são os dados.

Percebe-se que os dados da Série II (10 cm) foram os que apresentaram menor variabilidade, já os dados da Série III (15 cm) maior dispersão. Desta forma os dados da Série II (10 cm) se comportaram melhor em relação as demais Séries na análise da estatística descritiva.

Para complementar a análise foi utilizada a estatística inferencial, com aplicação do intervalo de confiança (I.C) com nível de confiança de 95%. Isto significa que foi procurado um intervalo numérico em torno da média, onde em 95% das vezes a média se situará neste intervalo. O valor do I.C representa a margem de erro, para mais e para menos, em relação à média.

Para este trabalho foi considerado aceitável uma margem de erro de 20%, tomando como referência a medida real da profundidade de fissura, ou seja, 1 cm para a Série I; 2 cm para a Série II e 3 cm para a Série III.

Para análise da variável profundidade a Tabela 4 apresenta os intervalos de confiança para as 3 Séries analisadas. A Figura 10 apresenta os gráficos do intervalo de confiança para cada Série em relação a variável profundidade.

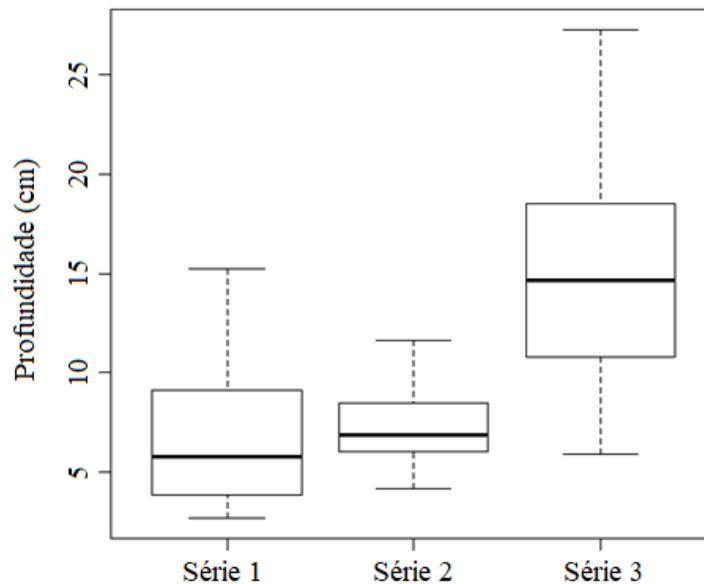


Figura 9. Boxplot variável: Profundidade

Tabela 4. Intervalo de confiança da variável profundidade

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

Ratificando o que foi apresentado na análise descritiva, os dados da Série III (15 cm) apresentaram um valor do I.C maior que as demais Séries, enquanto a Série II (10 cm) apresentou o menor I.C. Sendo o I.C maior, a margem de erro para que a confiança de 95% seja atendida aumenta, tornando o intervalo maior, o que pode ser percebido através da Tabela 4.

Existindo um intervalo ou margem de erro alta, a aplicação em estruturas reais se tornaria inviável, pois conduz a uma grande variação na estimação da profundidade das fissuras.

Para a Série III a variação da profundidade calculada pelo modelo está entre o intervalo de 13,14 cm a 17,57cm, sendo a profundidade real de 15 cm.

Na Série II, que apresentou o menor I.C, a profundidade calculada pelo modelo pode variar de 6,48 cm a 8,14 cm. Apesar de ser um intervalo pequeno, percebe-se que a medida real da profundidade, que é de 10 cm, não se encontra dentro do intervalo de confiança, fato que compromete a aplicação do modelo.

A Série I, que apresentou um I.C intermediário, onde a profundidade de fissura calculada pelo modelo variou de 5,51 cm a 8,40 cm, a profundidade real, que é 5 cm, também se encontra fora do intervalo.

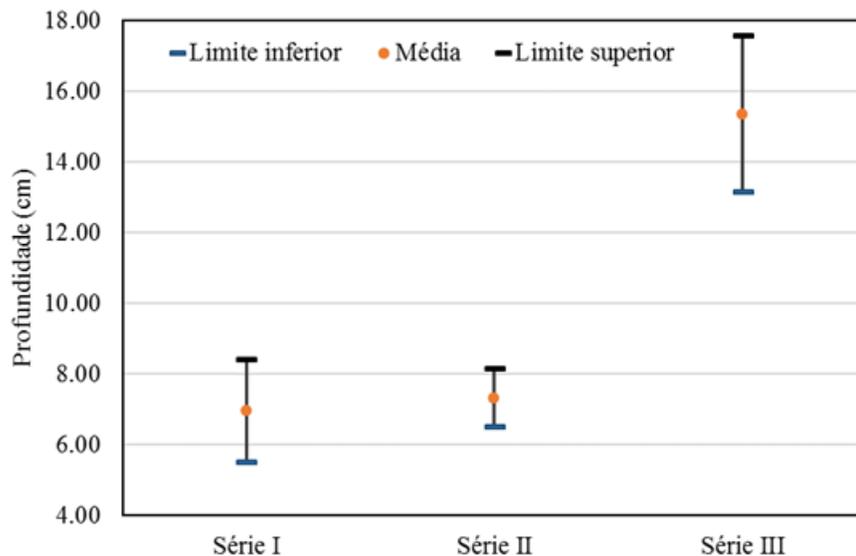


Figura 10. Gráfico do intervalo de confiança (Variável profundidade)

É possível ainda perceber dos resultados apresentados, que para as distâncias entre os transdutores maiores (30 e 40 cm) existe uma maior variação dos dados, já para as distâncias de execução do ensaio menores (10 e 20 cm) encontra-se uma menor dispersão e margem de erro.

Percebe-se que foi possível aplicar o modelo proposto e encontrar as profundidades das fissuras, porém com grande dispersão dos resultados. Esta alta variabilidade dos resultados é devida principalmente ao concreto que não é um material homogêneo e a velocidade de propagação da onda pode variar, uma vez que o modelo adota um caminho de onda ideal; no entanto, o percurso pode ser diferente do adotado.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente estudo, foi realizada uma pesquisa experimental a fim de avaliar de maneira estatística a eficiência do método de ultrassom para a estimação de fissuras.

O ensaio fornece informação evidente quanto a detecção de fissura no concreto, já que o tempo de propagação de onda é consideravelmente maior do que aqueles em regiões integras do concreto.

A estimação da profundidade das fissuras mediante o modelo proposto na literatura, permite encontrar valores para uma porcentagem grande das observações realizadas; no entanto, os valores apresentam-se muito dispersos, e, com relação a profundidade de fissura, percebe que os resultados apresentam uma margem de erro alta, comprometendo os resultados e aplicação em campo. A combinação com outros ensaios não destrutivos pode caracterizar melhor estes defeitos além de fornecer maior informação e desta forma, eliminar algumas incertezas que o ultrassom apresenta.

6. AGRADECIMENTOS

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro.

7. REFERÊNCIAS

- 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.: ISAIA, 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>