



Simulación de manifestaciones patológicas en muro pantalla mediante propagación de pulso ultrasónico

R. R. C. Silva^{1*} , C. Bertoldo² 

* Autor de Contacto: rodrigorogerioudorado@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.564>

Recepción: 01/11/2022 | Aceptación: 19/02/2022 | Publicación: 01/05/2022

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue simular manifestaciones patológicas en muros pantalla a través de hormigones elaborados con diferentes adiciones de polímero sintético, proponiendo obtener modelos de predicción de resistencia y rigidez a través de la propagación de ondas de ultrasonido. Se realizaron ensayos de compresión para determinar resistencia y rigidez, así como ensayos de ultrasonido por el método directo e indirecto sobre hormigones producidos con diferentes concentraciones de polímero sintético. Los resultados obtenidos indicaron una disminución de las propiedades mecánicas y acústicas del hormigón con el aumento de la concentración de polímero sintético en su confección. Los modelos generados por la prueba ultrasónica fueron estadísticamente significativos, con un nivel de confianza del 95%, y las correlaciones establecidas en concreto pueden ser utilizadas en la detección de manifestaciones patológicas in loco.

Palabras clave: muros pantalla; propagación de pulso ultrasónico; fuerza y rigidez.

Citar como: Silva, R. R. C., Bertoldo, C. (2022), "*Simulación de manifestaciones patológicas en muro pantalla mediante propagación de pulso ultrasónico*", Revista ALCONPAT, 12 (2), pp. 200 – 210, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.564>

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

Contribución de cada autor

En este trabajo, Silva, R. R. C., contribuyó a la adquisición de financiamiento actividad, metodología, investigación, elaboración del programa muestra experimental, borrador y redacción original, Pedroso, C. B. contribuyó a la conceptualización, metodología, supervisión y análisis de datos.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2022) 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 primer número del año 2023 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2022.

Simulation of pathological manifestations in diaphragm wall through ultrasonic wave propagation

ABSTRACT

This research aimed to simulate pathological manifestations in diaphragm wall using concrete produced with different additions of synthetic polymer, in order to obtain models of strength and stiffness prediction through ultrasound wave propagation. Compression tests were performed to determine strength and stiffness, as well as ultrasound tests by direct and indirect method on concrete produced with different concentrations of synthetic polymer. The results suggested a decrease in the mechanical and acoustic properties of concrete with the increase in the concentration of synthetic polymer. The models generated by the ultrasonic test were statistically significant, at 95% confidence level, and the correlations established in concrete can be applied in the detection of pathological manifestations in loco.

Keywords: diaphragm wall ultrasonic wave propagation; strength and stiffness.

Simulação de manifestações patológicas em parede diafragma através de propagação de ondas ultrassônicas

RESUMO

O objetivo dessa pesquisa foi simular manifestações patológicas em parede diafragma através de concretos produzidos com diferentes adições de polímero sintético, propondo obter modelos de predição de resistência e rigidez através de propagação de onda de ultrassom. Foram realizados ensaios de compressão para determinação da resistência e rigidez, assim como ensaios de ultrassom pelo método direto e indireto em concretos produzidos com diferentes concentrações de polímero sintético. Os resultados obtidos indicaram queda nas propriedades mecânicas e acústicas do concreto com o aumento da concentração de polímero sintético em sua confecção. Os modelos gerados pelo ensaio ultrassônico foram estatisticamente significativos, ao nível de confiança em 95%, podendo, as correlações estabelecidas em concreto, serem utilizadas na detecção de manifestações patológicas in loco

Palavras chave: parede diafragma; 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

Con el gran crecimiento de las construcciones civiles en las últimas décadas, se han estudiado formas de facilitar la ejecución de grandes obras que enfrentan dificultades por la inestabilidad de los suelos en los que se ubican. Según Hachich et al. (2019), una de las alternativas para ayudar en la excavación del suelo es el uso de un sistema de contención con muro pantalla, el cual consiste en zanjas abiertas en el suelo rellenas de hormigón armado, mantenidas estables mediante el uso de fluidos poliméricos o lodo bentonítico.

El uso de polímeros sintéticos en excavaciones presenta grandes ventajas frente a las formas tradicionales de estabilización de suelos, como el uso de bentonita. Según Mota (2010), podemos citar como ventaja el aspecto económico, el uso de polímeros a pesar de tener un costo mayor, en la adquisición por metro cúbico, en comparación con la adquisición de lodos bentoníticos, su uso en cuanto a cantidad es menor. , es decir, se utiliza menos para obtener mejores rendimientos que las formas tradicionales. Según Mota (2010), podemos mencionar el factor ambiental en cuestión, el uso de polímeros como estabilizadores en excavaciones no genera bioacumulación para el medio ambiente debido a algunos factores como alta solubilidad, sensibilidad química y acciones de los rayos ultravioleta que terminan fragmentando cadenas poliméricas y no generando acumulaciones (Mota 2010).

Estudios realizados por Mota (2010) encontraron que el polímero sintético altamente concentrado puede ser utilizado específicamente para interactuar químicamente con todo tipo de suelo, como base para su estabilización. Su estructura molecular le permite ser completamente soluble en agua, sin alterar su función principal como enlace químico activo en la estabilización de las partículas del suelo.

El uso de este polímero durante las excavaciones debe seguir las recomendaciones de la ABNT-NBR 6122 (2019), con hormigón de densidad entre 2,1 a 2,8 g/cm³ y consumo mínimo de cemento de 400 kg/m³, y fluido estabilizador como polímero con el pH del agua entre 9 y 12, densidad de 1,005 g/cm³ a 1,10 g/cm³ y contenido de arena hasta 4,5%. Según Djelal et al. (2020) una de las patologías resultantes del muro pantalla está relacionada con la mezcla del fluido polimérico durante el hormigonado, aumentando la infiltración de aguas subterráneas desde la masa de suelo después de la ejecución de los paneles, comprometiendo la capacidad de recepción de esfuerzos del hormigón.

Una de las dificultades es el control de los muros pantalla in loco, para verificar si la calidad del hormigón no se vio comprometida por la mezcla con el polímero sintético. De acuerdo con Silva (2020), una de las pruebas utilizadas que no causan daño al sistema de contención de concreto son las no destructivas, como la prueba de ultrasonido. Estudios realizados por Savaliya et al. (2014), mediante ensayos de ultrasonido en estructuras de hormigón, demuestran que el método es preciso para la detección de patologías, con sensibilidad para detectar defectos y permitir una mejor localización de los mismos una vez detectados.

En vista de lo expuesto, en este proyecto se utilizaron ensayos no destructivos de propagación de ondas ultrasónicas, directa e indirectamente, simulando la inspección in situ, con el fin de verificar su sensibilidad en la predicción de las propiedades mecánicas (resistencia y rigidez) y físicas. (absorción de agua) del hormigón elaborado con diferentes concentraciones de polímero sintético. En vista de los aspectos mencionados, el objetivo de la presente investigación fue simular manifestaciones patológicas en muro pantalla con diferentes adiciones de polímero sintético junto al hormigón, proponiendo modelos de predicción de resistencia y rigidez obtenidos en ensayos de propagación de ondas de ultrasonido, para la evaluación de este sistema de contención in situ.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para la investigación se elaboró hormigón con proporciones de cemento tipo CPII-F con especificaciones según ABNT-NBR 11578 (1997), arena y grava media 01 (1:1.8:2.5), con el cemento medido en masa, los agregados en volumen y relación agua-cemento de 0,6, conforme especificado en el trazado para estructuras de hormigón tipo muro pantalla (ABNT-NBR 6122, 2019). Considerando la mezcla patrón, se adicionaron con relación al cemento diferentes porcentajes de polímero sintético 0%, 20%, 40% y 60%, del tipo granulado aniónico, de alto peso molecular > 21 millones y cadenas largas, utilizado para la floculación. masa (Figura 1a). La caracterización de los agregados se realizó de acuerdo a las recomendaciones de las normas para agregado fino NBR (NM 248, 2003; NM 52, 2009; NM 45, 2006) y agregado grueso NBR (NM 248, 2003, NM 53, 2003, NM 45, 2006). Las muestras fueron sometidas a los 28 días a la prueba de absorción por inmersión, de acuerdo con las especificaciones de la ABNT-NBR 9778 (2015). De acuerdo con la Tabla 1, la caracterización de los agregados está dentro de los límites de aceptabilidad, según ABNT - NBR 7211 (2009).

Tabla 1. Resultados de la caracterización física de pequeños y grandes áridos.

Agregado	Masa específica (kg/m ³)	Masa unitaria (kg/m ³)	Diámetro máximo (mm)	Módulo de finura
Granito	2650	1500	25	6,75
Arena	2590	1310	4,8	1,89

La adición de polímero sintético presentó un comportamiento similar al generado por la adición de agua al concreto, cuando evaluamos la trabajabilidad (valores de Slump Test) y la densidad, es decir, el aumento de las adiciones de polímero provocó un aumento de la trabajabilidad y reducción de la densidad (Tabla 2).

Tabla 2. Ensayo de asentamiento y valores medios de densidad de hormigones producidos con diferentes adiciones de polímero sintético.

Adiciones	Slump Test (mm)	Densidad media (kg.m ⁻³)
0%	180	2223
20%	210	2097
40%	250	1934
60%	260	1900

Después del ensayo de asentamiento, se moldearon 12 probetas cilíndricas (100 mm de diámetro y 200 mm de longitud) y 1 probeta prismática (400 x 400 x 300 mm³) por cada traza, simulando parte de un muro pantalla después de la ejecución, totalizando 48 probetas cilíndricas. y 4 especímenes prismáticos. Las muestras cilíndricas fueron ensayadas por ultrasonido, a los 28 días, por el método directo de propagación de ondas (Figura 1b) y las muestras prismáticas por el método indirecto (Figura 1c), representando la evaluación de la inspección in loco.

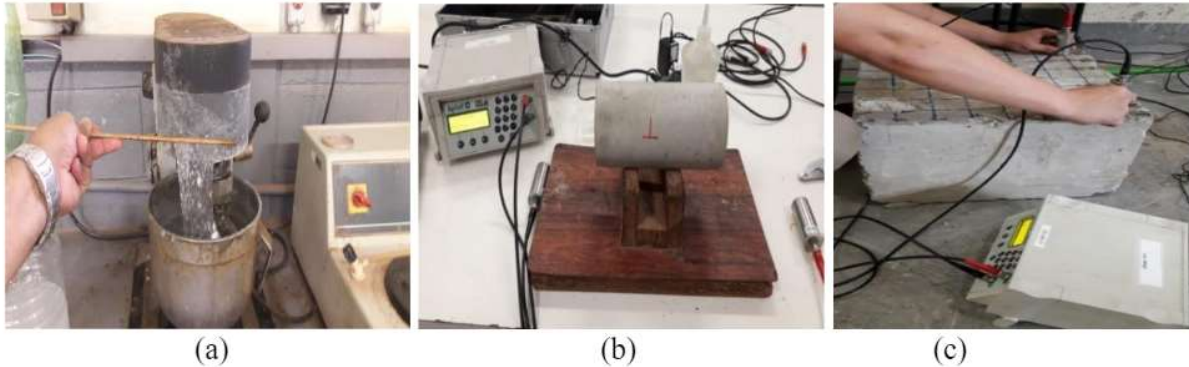


Figura 1. (a) Polímero sintético, (b) muestras cilíndricas sujetas a prueba de ultrasonido directo (c) muestras prismáticas sujetas a prueba de ultrasonido indirecto. Fuente: autores (2021).

Para las pruebas se utilizaron equipos de ultrasonido (USLAB, Agricef, Brasil) y transductores longitudinales de cara plana de 45 KHz de frecuencia. Con los tiempos de propagación de las ondas ultrasónicas (t) fue posible calcular, para cada distancia entre transductores (L), la velocidad directa de propagación de las ondas ultrasónicas (V_D), a través de la ecuación propuesta por la ABNT NBR 8802 (2019), según la ecuación (1).

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

A los 28 días también se determinó la masa de cada espécimen mediante una balanza de precisión, y con la ayuda de un pie de rey digital se obtuvieron sus dimensiones para calcular el volumen y posteriormente la densidad. A partir de la posesión de la velocidad directa y la densidad del hormigón (ρ) se determinó el coeficiente de rigidez (2).

$$C_{LL} = \rho \cdot V_D^2 \quad (2)$$

Las muestras prismáticas, que representan la evaluación de la factibilidad de inspección de un muro pantalla después de la instalación por el método de propagación de onda indirecta, fueron ensayadas siguiendo la metodología de cálculo propuesta por la norma ABNT-NBR 8802 (2019). La norma brasileña propone una forma de cálculo de la velocidad de propagación ultrasónica por el modo de transmisión indirecta (VI), cuyo procedimiento consiste en calcular la velocidad a través de una gráfica de tiempo de propagación versus distancia entre transductores Figura (2).

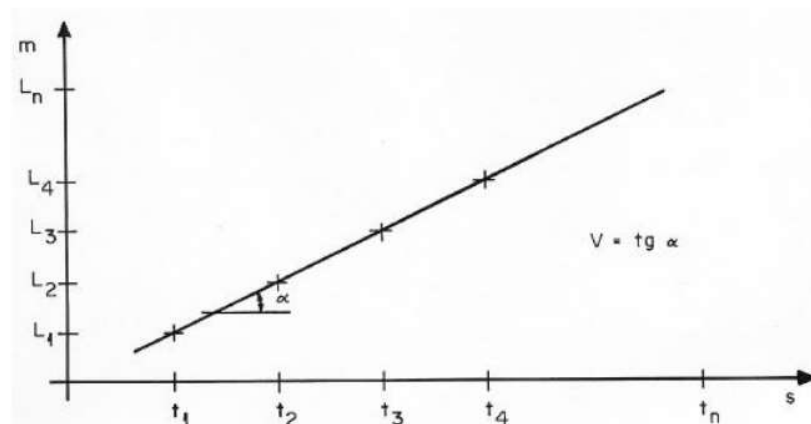


Figura 2. Determinación de la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas por el método indirecto. Fuente: ABNT-NBR 8802 (2019).

Luego, los especímenes fueron sometidos a la prueba de compresión instrumentada en una máquina de prueba (EMIC) para determinar la resistencia (f_c - ABNT-NBR 5739, 2018) y el módulo de elasticidad (E_{ci} - ABNT-NBR 8522, 2017). Los resultados de las pruebas se utilizaron en la generación de modelos de predicción de propiedades mecánicas a partir de las velocidades de propagación de las ondas de ultrasonido.

Con los resultados de f_c y E_{ci} y los parámetros de velocidad de propagación de ondas ultrasónicas (V_D), (V_I) y (C_{LL}), se analizaron regresiones para verificar la existencia de modelos estadísticamente significativos entre las propiedades mecánicas y las propiedades acústicas, obtenidos por medios de pruebas de propagación de ondas ultrasónicas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Las propiedades mecánicas (f_c y E_{ci}) y acústicas (C_{LL} , V_D y V_I) del hormigón también se redujeron a medida que aumentaban las adiciones de polímeros, hecho provocado por el aumento de la porosidad (cantidad de vacíos) del hormigón, tabla (3), informa los ensayos realizados a las 12 muestras de concreto por cada mezcla realizada.

Tabla 3. Valores mínimo, máximo y promedio de resistencia (f_c), elasticidad (E_{ci}), coeficiente de rigidez (C_{LL}) velocidad directa (V_D) e indirecta (V_I) para las trazas producidas con diferentes adiciones de polímeros.

Adiciones	f_c (MPa)	E_{ci} (GPa)	C_{LL} (GPa)	V_D (m.s ⁻¹)	V_I (m.s ⁻¹)
	Min. Max.	Min. Max. Media	Min. Max. Media	Min. Max. Media	Min. Max. Media
0%	16,9 20,5 17,41	19,58 27,80 23,28	27,23 34,38 30,16	3485 3885 3680	2437 2855 2639
20%	8,32 9,6 8,80	11,44 16,13 13,10	19,87 22,42 21,26	3095 3230 3185	2421 2628 2520
40%	5,53 6,78 6,17	5,80 9,85 7,48	9,81 17,29 13,14	2386 2788 2615	1886 2518 2127
60%	4,13 4,96 4,60	2,03 3,13 2,95	7,88 15,69 12,83	2040 2858 2528	804 1085 935

Para evitar la dispersión, para los análisis estadísticos se utilizaron los promedios de los resultados de los parámetros de resistencia, rigidez y acústica. Los modelos de regresión lineal evaluados mediante análisis de varianza (ANOVA) fueron estadísticamente significativos al 95% de nivel de confianza con (P-value < 0,05), siendo los mejores modelos predictivos para las propiedades de resistencia (f_c) y de rigidez (E_{ci}) del hormigón se obtuvieron a partir del coeficiente de rigidez (C_{LL}) (Cuadro 4).

Los modelos encontrados siguen dentro de los rangos de coeficientes de determinación encontrados en la literatura entre ensayos mecánicos y propagación de ondas. Para la predicción Media de f_c , los coeficientes de determinación (R^2) en los estudios realizados por Mohamad et al., (2016), Silva et al. (2020), varió entre 60 y 98% y, para E_{ci} entre 50 y 96%, (Giacon et al., 2010; Mohamed et al., 2016 y Silva et al., 2020). Correlaciones entre los parámetros de rigidez (C_{LL}) y las propiedades mecánicas de resistencia (f_c) y módulo de elasticidad (E_{ci}) obtenidas en ensayos de ultrasonido y compresión, respectivamente, fueron encontradas por Giaccon et al., 2010 y Silva (2020), con modelos lineales y valores de R^2 en el rango de 85% a 97% para E_{ci} y de 79% a 95% para f_c .

Los valores de error absoluto de resistencia y módulo de elasticidad del hormigón oscilan entre el

25 % y el 50 % cuando se basan en modelos con parámetros de propagación de ondas (Bungey y Millard, 2006). En esta investigación, los errores absolutos encontrados (9,70% a 20% - Tabla 4) están por debajo de los encontrados en la literatura, indicando que los modelos de predicción de resistencia y rigidez son válidos en la evaluación de la calidad del hormigón utilizado en muros diagrama, usando parámetros acústicos de propagación de onda.

Tabla 4. Modelos de correlación entre parámetros de velocidad directa (V_D), velocidad indirecta (V_I) y coeficiente de rigidez (C_{LL}) con la resistencia a compresión (f_c) y el Módulo de Elasticidad inicial (E_{ci}).

Parámetro	Modelo	P-Valor	R ² (%)	Error de estimación	Error absoluto* (%)
$f_c \times V_D$	$f_c = -20,34 + 0,0098 * V_D$	0,03	92,81	1,70	18,40
$f_c \times V_I$	$f_c = -5,25 + 0,0068 * V_I$	0,04	81,65	1,87	20,30
$f_c \times C_{LL}$	$f_c = -3,96 + 0,68 * C_{LL}$	0,025	97,46	1,57	9,70
$E_{ci} \times V_D$	$E_{ci} = -35,13 + 0,015 * V_D$	0,01	96,91	1,83	18,90
$E_{ci} \times V_I$	$E_{ci} = -11,68 + 0,012 * V_I$	0,04	89,00	1,90	20,60
$E_{ci} \times C_{LL}$	$E_{ci} = -8,56 + 1,05 * C_{LL}$	0,020	97,97	2,14	12,37

* relación entre el error estimado y el valor medio.

La Tabla 5 presenta los resultados obtenidos de la absorción por inmersión y la velocidad longitudinal de las muestras ensayadas después de la saturación. A través de los resultados obtenidos, se observa que la adición de polímero sintético incrementó la absorción de agua (Cuadro 5), dejando mayor cantidad de vacíos (poros) después del proceso de secado. Esto ocurre debido a la liberación de agua de curado interna, lo que conduce al deshinchamiento de las partículas de polímero, provocando cambios en la estructura porosa de los materiales cementosos (Araújo y May, 2019).

Tabla 5. Valores de absorción de buzamiento y velocidad de avance promedio (DV), para las trazas producidas con diferentes adiciones de polímero sintético.

Muestra	Absorción (%)	V_D (m.s ⁻¹)
0%	12,0	3087
20%	12,4	2777
40%	17,3	2291
60%	18,4	1846

Debido al cambio en la cantidad de agua absorbida, se producen cambios en las propiedades acústicas (Cuadros 3 y 5), se observa que las velocidades de propagación del sonido disminuyen a medida que aumenta la cantidad de polímero utilizado, los poros vacíos existentes en el concreto seco representan un factor significativo en la transmisión de ondas sonoras, ya que la velocidad del pulso ultrasónico es menor en el aire que en el sólido (Godinho, et al., 2020), con esto se explica el hecho de que el polímero aumente la cantidad de poros, reduciendo la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas en las muestras.

La regresión entre la velocidad del ultrasonido y la absorción mostró un modelo con R² de 92% (Figura 3) y P-Valor de 0,04, inferior a 0,05, demostrando una relación estadísticamente significativa entre los parámetros, con un nivel de confianza de 95,0%, obtenido por ANOVA

análisis estadístico. Los resultados obtenidos indican que la técnica de propagación de ondas es sensible al aumento del contenido de agua dentro de las muestras de hormigón, provocado por el aumento de la porosidad tras el secado del polímero sintético dentro de la matriz de cemento, reduciendo su velocidad de ultrasonido. De esta forma, el hormigón tendrá un aumento de vacíos (poros) y estará sujeto a una mayor absorción de agua y una menor densidad y propiedades mecánicas. El agua actúa como principal portador del medio erosivo en el hormigón, por lo que su desempeño, como barrera para reducir el transporte de agentes potencialmente causantes de corrosión de la armadura, está relacionado con su porosidad (Dudhal, 2016; Liu et al., 2020) ; Matiko, 2000).

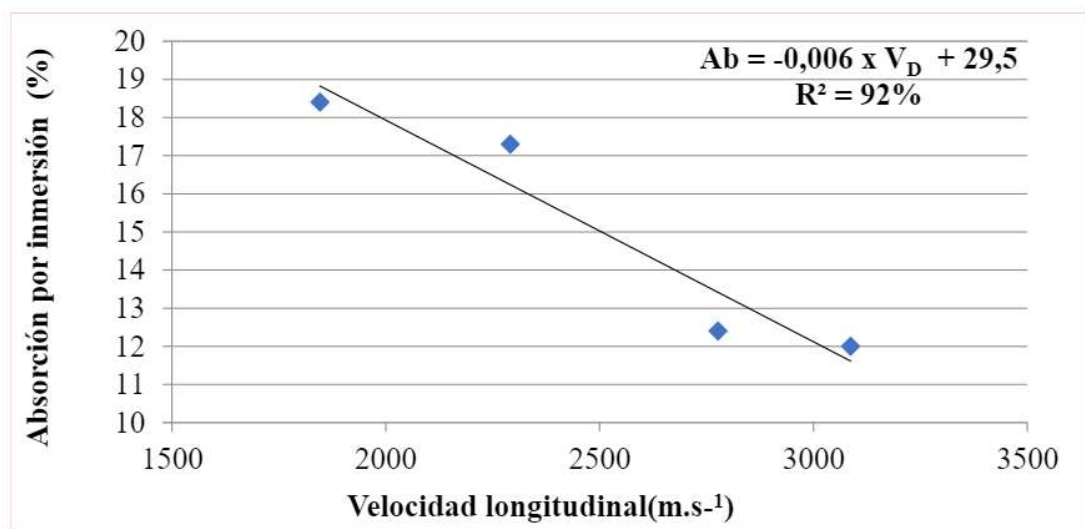


Figura 3. Modelo de regresión entre absorción de inmersión y velocidad longitudinal.

Fuente: Autores (2021).

El polímero se agrega y forma una película sobre la superficie de las partículas de cemento durante el proceso de hidratación, evitando el contacto adicional entre el cemento y el agua, aumentando la porosidad de la matriz de cemento, afectando así la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad de los hormigones con aditivo. (Liu et al., 2020).

La presente investigación corrobora los datos encontrados en la literatura, los valores presentados en la Tabla 3, demuestran que hubo una reducción del 26% para los valores medios de f_c y del 13% para los valores medios de E_{ci} , luego de un aumento de la absorción en 18 % para las muestras de concreto con adición de 60 % de polímero sintético, en relación a las muestras sin adición, como se especifica (Tabla 5).

Los modelos obtenidos pueden ser utilizados como solución de ensayos no destructivos para estimar propiedades mecánicas y físicas, como la absorción de agua, en muestras y estructuras de muro pantalla, verificando la infiltración de aguas subterráneas desde la masa de suelo después de la realización de los paneles, hecho que puede comprometer la capacidad del concreto para recibir esfuerzos.

4. CONCLUSIONES

El aumento de las concentraciones de polímero sintético utilizado en las diferentes mezclas de hormigón aumentó su trabajabilidad, reduciendo su densidad y sus propiedades mecánicas (f_c y E_{ci}) y acústicas del material (V_D , V_I y CLL).

Los modelos de predicción de propiedades mecánicas mediante velocidades de ultrasonido

resultaron estadísticamente significativos, presentando coeficientes de determinación superiores al 80% y errores inferiores a los encontrados en la literatura.

De esta forma, se demuestra la sensibilidad de la propagación directa o indirecta de ondas ultrasónicas, cuando se aplican a concretos con propiedades físicas y mecánicas similares a las utilizadas en esta investigación, y las correlaciones aquí establecidas en muestras de concreto pueden ser utilizadas para ayudar a la detección de manifestaciones patológicas in loco.

Además, se observa que el aumento del contenido de polímeros sintéticos en la fabricación del hormigón interfiere directamente en la cantidad de absorción de agua y, en consecuencia, en las propiedades acústicas del material.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) de São Paulo por financiar los diversos proyectos del grupo de investigación, lo que hizo posible las instalaciones y la infraestructura utilizadas en esta investigación.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997). *NBR 11578: Cimento Portland Composto*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003). *NBR NM 248: Agregados: Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006). *NBR NM 45: Agregados: Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. 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.
- Araújo, C. M. M, May, C. A. (2019). *Durabilidade de concretos de alta resistência com adição de polímero superabsorvente e nano partículas de sílica*. Monografía de projeto final em engenharia civil; Brasília; p. 124.
- Bungey J., Millard, S. (2006). *Testing of concrete in structures*. 3 ed. London: Blackie Academic e Professional.

- Djelal, C., Vanhove, Y., Azzi, A., Madec, O. (2020). *Recommendation for concrete mix design to prevent bleed channels on diaphragm walls*. European Journal of Environmental and Civil Engineering, p.1-13.
- Giacon Jr, M., Goncalves, R., Soriano, J., Amalfi, G. (2010). *Caracterização do concreto utilizando ultrassom*. In: XXVIII CONAENDI - Congresso de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção, Santos - SP. Anais CONAENDI 2010. v. 1. p. 1-9.
- Godinho, J. P., Junior, T. F. S; Medeiros, M. H. F; Silva, M. S. A. (2020). *Factors influencing ultrasonic pulse velocity in concrete*: 13. ed. Curitiba: Revista Ibracon de Estruturas e Materiais.
- Hachich, W. et al. (2019). *Fundações: Teoria e Prática*. 2ª ed. São Paulo, Pini.
- Liu, B., Shi, J., Sun, M., He, Z., Xu, H., Tan, J. (2020). Mechanical and permeability properties of polymer-modified concrete using hydrophobic agent. *Journal of Building Engineering*, v. 31, p. 101337. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101337>.
- Matiko, N. N. S. (2000). *Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos*. FAPESP.
- Mohammed, T. U., Rahman, M. N. (2016). *Effect of types of aggregate and sand-to-aggregate volume ratio on UPV in concrete*. *Construction and Building Materials*, v. 125, p. 832-841. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.102>.
- 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), p. 41–44.
- Silva, R. R. C. (2020). *Propagação de ondas de ultrassom em sistemas de contenção par obras de terra*. Tese de Doutorado. UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas. p.113.
- 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>.
- Hirde, S. K., Dudhal, Omprakash S. (2016). *Review on polymer modified concrete and its application to concrete structures*. *International Journal of Engineering Research*, ISSN, v. 3. P.766-769. <https://doi.org/10.17950/ijer/v5i3/053>.