



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA



Estudio para la predicción de la permeabilidad del hormigón a través de ensayos no destructivos, utilizando técnicas de ultrasonido

CURSO DE POSGRADO: “TÉCNICAS EXPERIMENTALES DE
ULTRASONIDO”

Montevideo
martes 13 agosto, 2024

Estudio para la predicción de la permeabilidad del hormigón a través de ensayos no destructivos, utilizando técnicas de ultrasonido,

Esta tesis fue preparada en L^AT_EX usando la clase iietesis (v1.1).

Contiene un total de 31 páginas.

Compilada el martes 13 agosto, 2024.

<http://iie.fing.edu.uy/>

Resumen

En el siguiente texto se presentan los resultados obtenidos de la realización de una serie de medidas en hormigón permeable. La experiencia consistió en aplicar ondas de ultrasonido a través del material por medio de dos técnicas: transmisión-recepción y Pulso-Eco, en dos medios diferentes: agua y aire. Las señales relevadas fueron analizadas y se concluyó que “el tiempo de vuelo” de la onda a través de la probeta de hormigón, en el modo transmisión-recepción presenta una correlación inversa alta con la permeabilidad y con la porosidad del hormigón. Es decir: a mayor permeabilidad o porosidad mayor es el “tiempo de vuelo” de la onda. Cabe observar que para las medidas realizadas en el medio “aire” las señales obtenidas presentan menos oscilaciones, resultando más sencillo reconocer el instante de tiempo en el que la onda completa su recorrido a lo largo de la probeta. Este es un detalle importante si se pretende medir de forma precisa el “tiempo de vuelo” de la onda para poder distinguir diferencias pequeñas en la permeabilidad o la porosidad de una y otra probeta. Se espera que con la toma de más medidas se pueda desarrollar un modelo que prediga la permeabilidad de una losa de hormigón en función del “tiempo de vuelo” de las ondas ultrasónicas aplicadas a la misma.

Introducción

“El hormigón permeable es un hormigón especial que se caracteriza por permitir el pasaje del agua a través de él. Constituye un material de alta cohesión y porosidad, conformado por cemento portland, agregado grueso, poco o nulo agregado fino, aditivos y agua. La combinación de estos ingredientes produce un material rígido con un alto porcentaje de poros interconectados lo cual permite el pasaje de agua. En la figura 1 se puede ver el aspecto del hormigón permeable en un plano cercano y a su lado una loseta demostrativa de hormigón permeable filtrando agua” (A. Spalvier, *et al.*, 2021, pag. 5).



(a) probeta de hormigón

(b) loseta escurriendo agua

Figura 1: Hormigón permeable (figura extraída de [1])

“La capacidad de infiltración de agua del hormigón permeable es particularmente beneficiosa en varias tipologías constructivas, como por ejemplo en estacionamientos, caminos de bajo volumen de tránsito, sendas peatonales, bicisendas, explanadas, peatonales y plazas, particularmente en zonas susceptibles a inundaciones (ACI Committee 522, 2010). También puede ser empleado como superficie de drenaje rígido en diferentes tipos de superficies, como pueden ser en cordones cunetas y badenes o zonas donde sea conveniente no tener pendientes. Las figuras 2 y 3 muestran algunos ejemplos de aplicación del hormigón permeable” (A. Spalvier, *et al.*, 2021, pag. 5).



(a) senda peatonal

(b) borde de calle con hormigón permeable

Figura 2: aplicaciones del hormigón permeable (figura extraída de [1])



Figura 3: Plaza de hormigón permeable en Beijing, China (figura extraída de [1])

“La principal virtud del hormigón permeable se encuentra en su capacidad para drenar aguas pluviales en zonas donde escasea la tierra, por ejemplo: centros de ciudades, estacionamientos, sendas peatonales. De esta manera se evita la sobrecarga de desagües y se recargan las corrientes de agua subterráneas. La elevada porosidad del material también ofrece otras características interesantes como la capacidad de aislación acústica y térmica. Su uso puede extenderse a lugares como centros de grandes ciudades, donde la contaminación sonora en el tránsito es actualmente un tema central para la gestión ambiental (Chu, L., Fwa, T. F., & Tan, K. H., 2017) [2]” (A. Spalvier, *et al.*, 2021, pag. 7)

Tabla de contenidos

Resumen	I
Introducción	III
1. Materiales y Métodos	1
1.1. Medida de permeabilidad del hormigón	1
1.2. Medida de Porosidad del hormigón	3
1.3. Medida de Tiempo de Vuelo por ultrasonido	3
1.3.1. Propagación de ondas elásticas	3
1.3.2. Procedimiento	4
2. Resultados y Análisis	7
2.1. Resultados	7
2.1.1. Medida de permeabilidad	7
2.1.2. Medida de Porosidad	8
2.1.3. Medida de Tiempo de Vuelo por ultrasonido	9
2.2. Análisis de resultados	10
3. Conclusiones	15
Referencias	17
Índice de tablas	18
Índice de figuras	20

Tabla de contenidos

Capítulo 1

Materiales y Métodos

El trabajo realizado consiste básicamente en inyectar ondas de ultrasonido a través de probetas cilíndricas de hormigón permeable y analizar las señales recogidas con un PC. Para esto se cuenta con 6 probetas, 2 para cada nivel de porosidad. La nomenclatura utilizada para caracterizar las muestras es: 2-C-P-R donde P indica las diferentes porosidades ($P = 1,2,3$) y R el número de réplica para cada porosidad ($R = 1,2$).

Dicho esto, la experiencia se compone de dos etapas: por un lado medir la permeabilidad y la porosidad de las probetas de hormigón y por otro lado aplicar ondas de ultrasonido a las probetas en dos medios distintos (aire y agua). Las señales resultantes son relevadas con ayuda de un osciloscopio y un computador para su posterior análisis.

1.1. Medida de permeabilidad del hormigón

Según Spalvier, et al. [1], la permeabilidad está directamente relacionada con la porosidad del material, y con el tamaño y conectividad de los poros que posee. Para una porosidad de entre 20 y 25 % se obtienen coeficientes de permeabilidad de aproximadamente 1.0 cm/s (Brite/Euram Report, 1994) [4].

El ensayo de permeabilidad consiste en generar una circulación uniforme de un fluido de densidad conocida (agua en este caso) a través de una probeta cilíndrica de hormigón durante un tiempo predefinido y medir el volumen de agua infiltrada. Para realizar esta práctica se utilizó un permeámetro de “carga constante”, el procedimiento consiste en colocar la probeta sobre un recipiente con cierto nivel de agua de tal manera que una de las caras de la probeta se encuentre apoyada sobre la superficie del agua. Luego, sobre la cara opuesta se coloca el permeámetro y se introduce agua en el mismo hasta que la columna de agua sobre la probeta alcance una altura predefinida. Finalmente, con ayuda de un cronómetro se recoge el volumen de líquido infiltrado a través de la probeta en un recipiente, durante un intervalo de tiempo determinado. A continuación se detallan los pasos a seguir

Capítulo 1. Materiales y Métodos

para la extracción de los datos:

1. recoger en un recipiente el volumen de agua infiltrado a través de la probeta durante un tiempo prestablecido (1 min).
2. pesar la masa de agua almacenada en el recipiente restando la masa del propio recipiente
3. conociendo la densidad del fluido utilizado (agua) se calcula el volumen de fluido infiltrado
4. conociendo el volumen de la probeta y el tiempo durante el cual se recavó el fluido se aplica la fórmula mostrada en la ecuación 1.1 para calcular la permeabilidad del hormigón

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{k \times V_{prob}}{t} = \frac{k \times S_{prob} L_{prob}}{t} \implies permeabilidad = \frac{Q}{S_{prob}} = \frac{k \times L_{prob}}{t} \text{ (cm/s)} \quad (1.1)$$

Donde Q representa el caudal de agua infiltrado, V es el volumen de agua infiltrado, $k \in \mathbb{R}$ es la constante de proporcionalidad entre V y V_{prob} (volumen de la probeta), L_{prob} es la longitud de la probeta, S_{prob} es la sección de la probeta y t es el tiempo durante el cual se recoge el agua

El ensayo de carga constante se realiza de acuerdo a la guía práctica presentada por A. Spalvier, et. al. en [1]. En la figura 1.1 se presenta un esquema del dispositivo, y una foto de una variante de éste, usada en investigación, en la cual se pueden evaluar distintos niveles de carga, y en el que se utiliza una bomba para recircular el agua que desborda del rebalse superior.

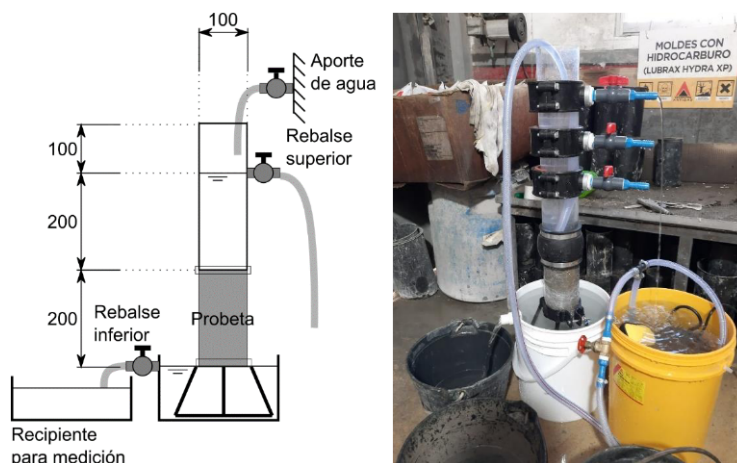


Figura 1.1: Permeámetro de carga constante (figura extraída de [1])

1.2. Medida de Porosidad del hormigón

La porosidad no es otra cosa que la proporción de aire que contiene el material, en este caso la probeta de hormigón. Esta propiedad se mide como el porcentaje de volumen de aire sobre el volumen total de la probeta (aire + agregado grueso). El ensayo de porosidad consiste en medir la masa de la probeta seca, en aire. Una vez hecho esto se repite la medida pero con la probeta sumergida en un fluido de densidad conocida (agua en este caso). El empuje del fluido ejerce una fuerza igual y opuesta al peso del agregado (volumen sólido) que compone la probeta de hormigón. Por lo tanto la masa medida en este último caso se verá disminuída en una magnitud correspondiente. Aplicando la 3^{ra} ley de Newton (ec. 1.2) se obtiene:

$$M_{agua} \times g = M_{aire} \times g - \rho_{H_2O} V_{sólido} \times g \implies V_{sólido} = \frac{M_{aire} - M_{agua}}{\rho_{H_2O}} \quad (1.2)$$

En la ecuación 1.3 se adjunta el cálculo de la porosidad del hormigón

$$\begin{aligned} P &= 100 \times \frac{V_{vacios}}{V_{total}} = 100 \times \left(\frac{V_{total} - V_{sólido}}{V_{total}} \right) = 100 \times \left(1 - \frac{V_{sólido}}{V_{total}} \right) = \\ &= 100 \times \left(1 - \frac{\frac{M_{aire} - M_{agua}}{\rho_{H_2O}}}{V_{total}} \right) = 100 \times \left(1 - \frac{M_{aire} - M_{agua}}{\rho_{H_2O} V_{total}} \right) \end{aligned} \quad (1.3)$$

donde

- M_{aire} representa la masa de la probeta seca, en aire
- M_{agua} representa la masa de la probeta sumergida en agua
- V_{vacios} representa el volumen de aire o huecos que contiene la probeta
- $V_{sólido}$ representa el volumen efectivo ocupado por la probeta, específicamente por el agregado¹ que conforma la probeta
- ρ_{H_2O} representa la densidad del agua (1 kg/litro)

1.3. Medida de Tiempo de Vuelo por ultrasonido

1.3.1. Propagación de ondas elásticas

El análisis de propagación más simple se realiza considerando una onda plana que se propaga de izquierda a derecha

$$u(x, t) = A \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} (x - v \times t) \right) \quad \text{onda plana, viajera} \quad (1.4)$$

¹cemento + piedras

Capítulo 1. Materiales y Métodos

Donde λ es la longitud de onda y v la velocidad de propagación de la onda, o velocidad de fase.

Es importante que la longitud de onda (λ), de las ondas de ultrasonido sea suficientemente grande como para poder considerar que el hormigón representa un material homogéneo. Es decir λ debe ser mucho mayor (idoneamente) al tamaño máximo de las partículas que conforman la mezcla u hormigón (piedras, cemento, aditivos y agua). De otra manera las ondas no se propagarán a través del material en la forma deseada (mayormente en dirección longitudinal), imposibilitando el análisis de las señales captadas con el “pulser” y el osciloscopio ya que la información contenida en las ondas recibidas no corresponderá puramente al desplazamiento lineal de las mismas. Dado que el tamaño promedio de las piedras utilizadas en el hormigón es de unos 5mm, en general se utilizan transductores centrados en frecuencias de entre 50 kHz y 100 kHz pues la velocidad estimada de propagación del sonido en el hormigón es de 4000m/s de manera que acudiendo a la ecuación de velocidad de fase de una onda plana (ecuación 1.5) se obtienen valores de λ de entre 8 y 4 cms respectivamente.

$$v = f \times \lambda \quad (1.5)$$

1.3.2. Procedimiento

El equipamiento utilizado para llevar a cabo la experiencia es:

- generador de pulsos eléctricos (“pulser”) Olympus 5072PR
- Transductores de ultrasonido, marca Proceq, frecuencia central 54kHz
- Osciloscopio Digital Siglent 1104X-E
- Computador (Notebook)

La experiencia consiste en elegir un juego de probetas, de los 8 posibles, con los 3 niveles de porosidad (2C-1, 2C-2 y 2C-3). Los juegos elegidos fueron:

- serie 1: 2C-1-1, 2C-2-1 y 2C-3-1
- serie 2: 2C-1-2, 2C-2-2 y 2C-3-2

Dado que las 2 probetas correspondientes a cada nivel de porosidad fueron construidas de la misma manera, la series 1 y 2 pueden considerarse como dos repeticiones aisladas del mismo experimento.

El procedimiento es el siguiente: colocar un emisor de ondas de ultrasonido (transductor) [5] en cada extremo de las probetas de hormigón. Para homogeneizar la superficie sobre la cual se colocan los transductores y así evitar pérdidas excesivas de energía, se utiliza un material acoplante, en este caso cera de abeja (esto afecta las medidas, teniendo en cuenta que la velocidad de propagación del

1.3. Medida de Tiempo de Vuelo por ultrasonido

sonido en el hormigón es distinta a la velocidad de propagación en la cera)1.2. Luego, con ayuda de un generador de pulsos eléctricos (“pulser”) se excita a uno de los transductores, este convierte el pulso eléctrico en un pulso mecánico cuya frecuencia de vibración central es 54kHz y por último se recibe el frente de onda con el otro transductor que realiza el proceso inverso, convirtiendo la energía mecánica recibida en una señal eléctrica. Dicha señal pasa por un circuito de acondicionamiento (dentro del “pulser”) en el cual es filtrada y amplificada y finalmente transmitida a un instrumento de inspección visual, en este caso se utilizó un osciloscopio digital. El setup de las medidas se ilustra en la figura 1.3



Figura 1.2: probeta de hormigón permeable con material acoplante (cera de abeja) en una de sus caras

Una vez relevadas las señales se debe extraer el “tiempo de vuelo” de la onda. Esta magnitud hace referencia a “cuanto demora” la misma en atravesar el hormigón. Se visualiza en las señales de la figura 2.1 como la primer oscilación observada en cada onda, la cual corresponde a la primer oscilación captada por el transductor de recepción. Se debe observar que este intervalo dependerá de la cantidad de poros que posea la probeta y de cuantos de ellos se encuentran interconectados. La extracción del “tiempo de vuelo” de las señales obtenidas se realizó vía inspección visual, con ayuda de la función “ginput”, del software MATLAB. El error cometido es tenido en cuenta en el cálculo de la velocidad de propagación. Por último solo resta calcular la velocidad de propagación, expresada en la ecuación 1.6

$$v_c = \frac{d_c}{t_c} \quad \text{velocidad de propagación} \quad (1.6)$$

Con esta magnitud obtenemos una propiedad del material que puede ser correlacionada con la permeabilidad y nos independiza de la longitud de las probetas.

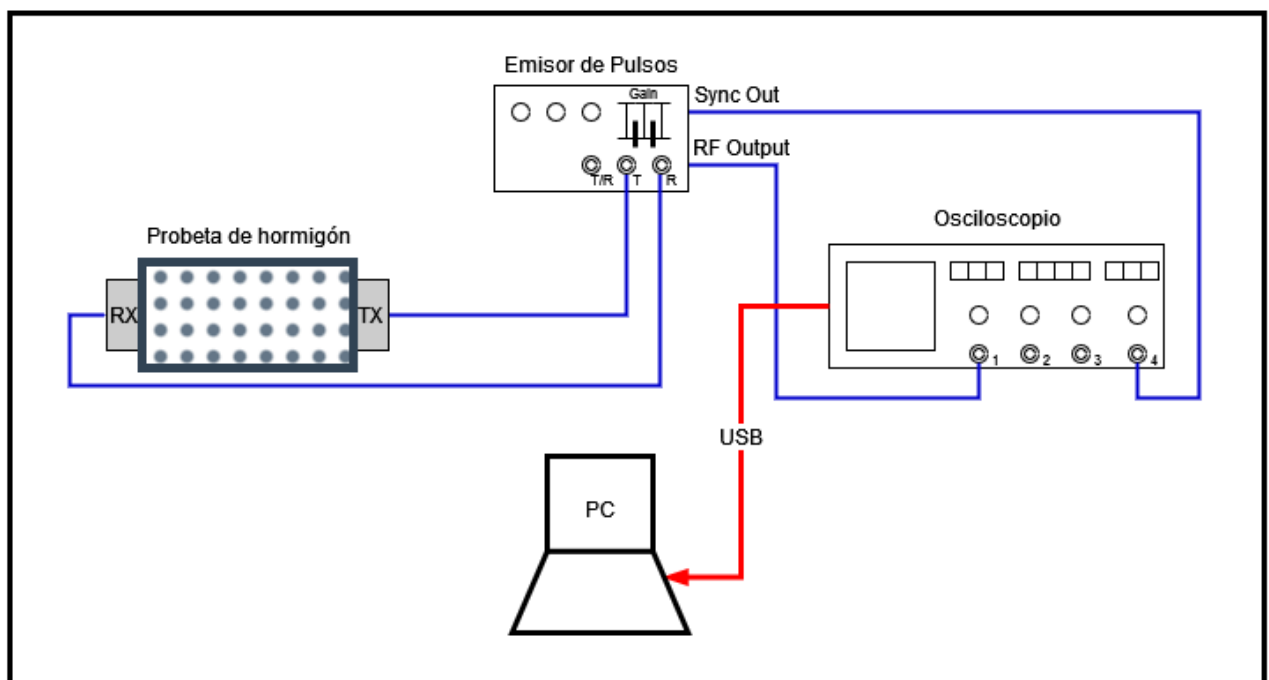


Figura 1.3: set_up de medidas

Capítulo 2

Resultados y Análisis

2.1. Resultados

2.1.1. Medida de permeabilidad

Los volúmenes de las tablas 2.1 y 2.2 son calculados a partir del promedio de la cantidad de ensayos realizados con cada probeta (3 ensayos para cada probeta) y la densidad de masa del agua.

Cabe señalar que esta medida de permeabilidad no contempla las diferencias geométricas entre probetas, es decir que solo se puede utilizar para comparar probetas con las mismas dimensiones.

Serie 1						
Probeta	Volumen (cm^3)	V_{prob} (cm^3)	$L_{prob}(cm)$	tiempo (s)	k	permeabilidad (cm/s)
2C-1-1	9440	1609	20.5	30	5.867	4.01
2C-2-1	5790	1601	20.4	60	3.616	1.23
2C-3-1	910	1554	19.8	60	0.586	0.19

Tabla 2.1: Ensayo de permeabilidad

Serie 2						
Probeta	Volumen (cm^3)	V_{prob} (cm^3)	$L_{prob}(cm)$	tiempo (s)	k	permeabilidad (cm/s)
2C-1-2	10430	1586	20.2	30	6.576	4.43
2C-2-2	4600	1570	20.0	60	2.930	0.98
2C-3-2	820	1554	19.8	60	0.528	0.17

Tabla 2.2: Ensayo de permeabilidad

Capítulo 2. Resultados y Análisis

2.1.2. Medida de Porosidad

Serie 1					
Probeta	Masa en aire (kg)	Masa sumergida (kg)	Volumen total (lts)	Volumen sólido (lts)	Porosidad (%)
2C-1-1	2.6385	1.6170	1.610	1.022	36.6
2C-2-1	3.0190	1.8035	1.602	1.216	24.1
2C-3-1	3.2270	1.8930	1.555	1.334	14.2

Tabla 2.3: Medida de Porosidad

Serie 2					
Probeta	Masa en aire (kg)	Masa sumergida (kg)	Volumen total (lts)	Volumen sólido (lts)	Porosidad (%)
2C-1-2	2.6630	1.6335	1.587	1.030	35.1
2C-2-2	2.9960	1.7920	1.571	1.204	23.4
2C-3-2	3.2830	1.91	1.555	1.373	11.7

Tabla 2.4: Medida de Porosidad

2.1.3. Medida de Tiempo de Vuelo por ultrasonido

En las tablas 2.5 y 2.6 se muestran los resultados obtenidos. Para el cálculo de la velocidad de propagación se consideran las incertidumbres introducidas por los instrumentos utilizados y la correspondiente propagación de errores a la magnitud de la velocidad (ec. 2.1).

Por otro lado la incertidumbre en el valor de la longitud de la misma considera dos factores: la apreciación del instrumento (cinta métrica) y la utilización de un material de acoplamiento (cera de abeja) que uniformiza la superficie sobre la cual son colocados los transductores, evitando la pérdida excesiva de energía.

$$\Delta v = |v| \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2} \quad \text{propagación de errores} \quad (2.1)$$

Serie 1							
Probeta	Longitud (cm)	Diámetro (cm)	Masa (kg)	Tiempo de vuelo (μs)		Velocidad (m/s)	
				aire	agua	aire	agua
2C-1-1	20.5±0.5	10±0.1	2.639	67.6±2.5	69.1±2.5	3032±74	2967±72
2C-2-1	20.4±0.5	10±0.1	2.996	54.1±2.5	54.4±2.5	3771±92	3750±92
2C-3-1	19.8±0.5	10±0.1	3.227	46.6±2.5	46.2±2.5	4249±107	4286±108

Tabla 2.5: Medida de ultrasonido

Serie 2							
Probeta	Longitud (cm)	Diámetro (cm)	Masa (kg)	Tiempo de vuelo (μs)		Velocidad (m/s)	
				aire	agua	aire	agua
2C-1-2	20.2±0.5	10±0.1	2.663	68.1±2.5	65.6±2.5	2966±73	3079±76
2C-2-2	20±0.5	10±0.1	3.019	56.5±2.5	56.7±2.5	3540±88	3527±88
2C-3-2	19.8±0.5	10±0.1	3.283	47.7±2.5	47.9±2.5	4151±105	4134±104

Tabla 2.6: Medida de ultrasonido

2.2. Análisis de resultados

Observando la figura 2.1 se puede notar claramente que existe una dependencia entre la permeabilidad de las distintas probetas y “el tiempo de vuelo” a través del hormigón, de las ondas de ultrasonido. A mayor permeabilidad mayor “tiempo de vuelo” o lo que es equivalente: a mayor permeabilidad menor velocidad de propagación puesto que el medio aumenta su proporción de aire a la vez que baja la proporción de “agregado grueso”¹.

La relación se hace extensiva a la propiedad de porosidad del hormigón puesto que la permeabilidad no es más que la capacidad de infiltración de agua que presenta el material, la cual se encuentra directamente relacionada con la cantidad de poros interconectados que posee el mismo. De manera que si aumenta la proporción de poros en una losa de hormigón también así lo hará su permeabilidad [3]. Se observa que las medidas realizadas se ajustan bien a una relación lineal inversa en ambas “tiradas” o serie de medidas. También puede verse una diferencia significativa entre las velocidades en cada serie, para el mismo valor de porosidad o permeabilidad (ver figuras 2.2 y 2.4).

Teniendo en cuenta que ambas replicas se construyen de igual manera existen dos factores que pudiesen estar alterando los resultados, la temperatura ambiente, dado que los experimentos con cada serie se realizaron en días diferentes y el material acoplante (cera de abeja) que se colocó en cada probeta, el cual no fué colocado de manera uniforme para cada medición.

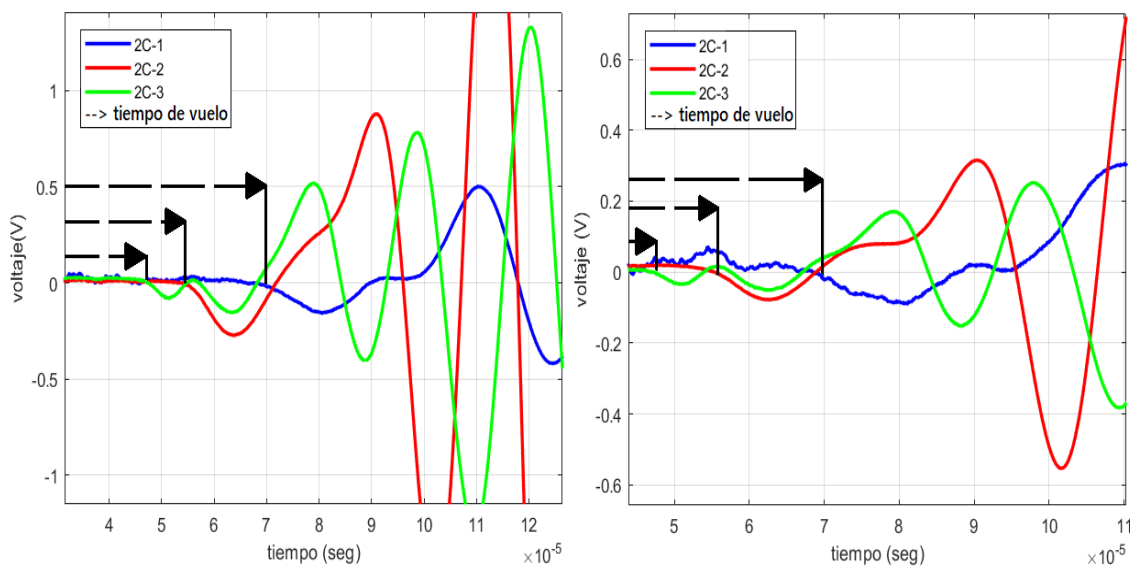


Figura 2.1: Transmisión en aire (izq) y transmisión en agua (der), serie 1

¹mezcla de cemento, aditivos y piedras

2.2. Análisis de resultados

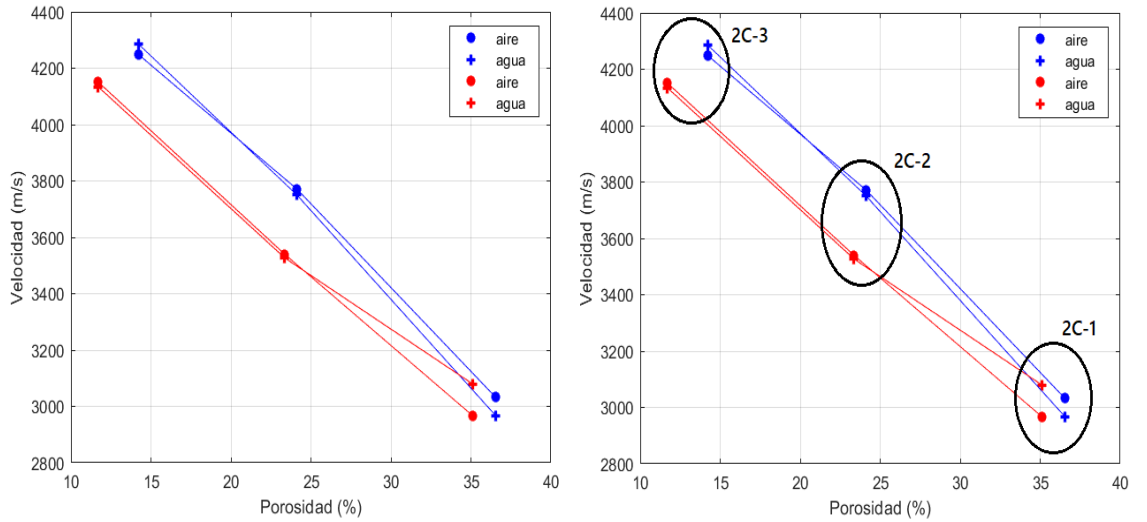


Figura 2.2: Velocidad de propagación vs Porosidad del hormigón

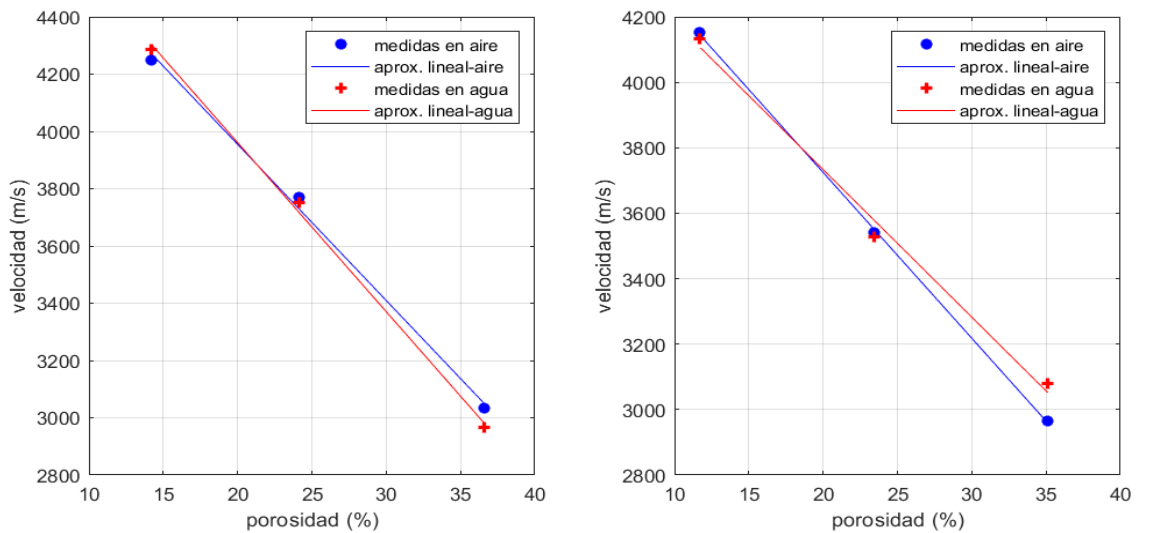


Figura 2.3: Datos crudos superpuestos a rectas de aproximación, Serie 1(izquierda), Serie 2 (derecha)

Capítulo 2. Resultados y Análisis

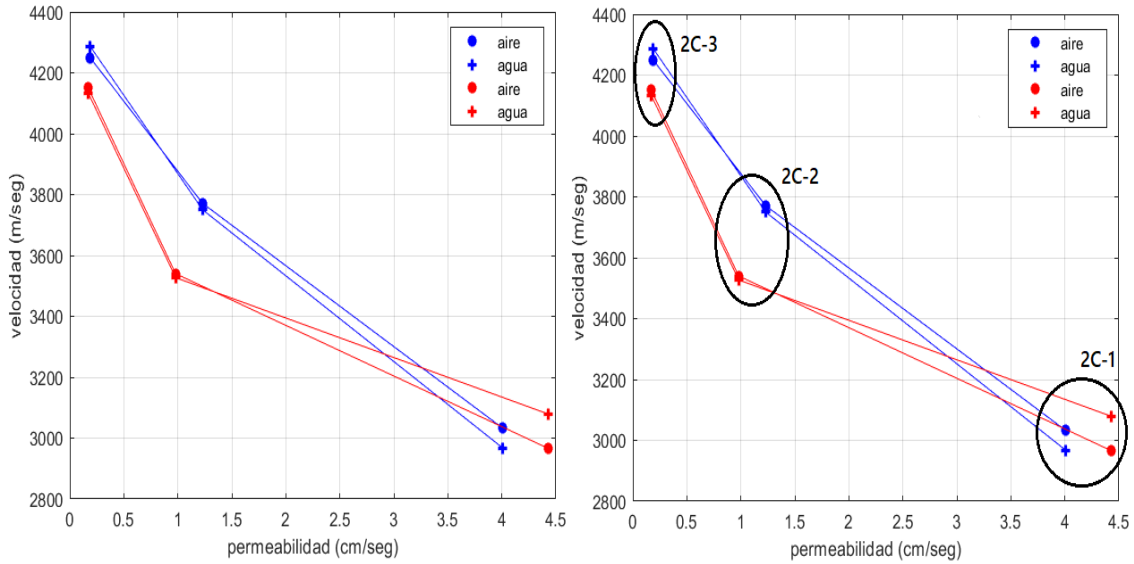


Figura 2.4: Velocidad de propagación vs permeabilidad

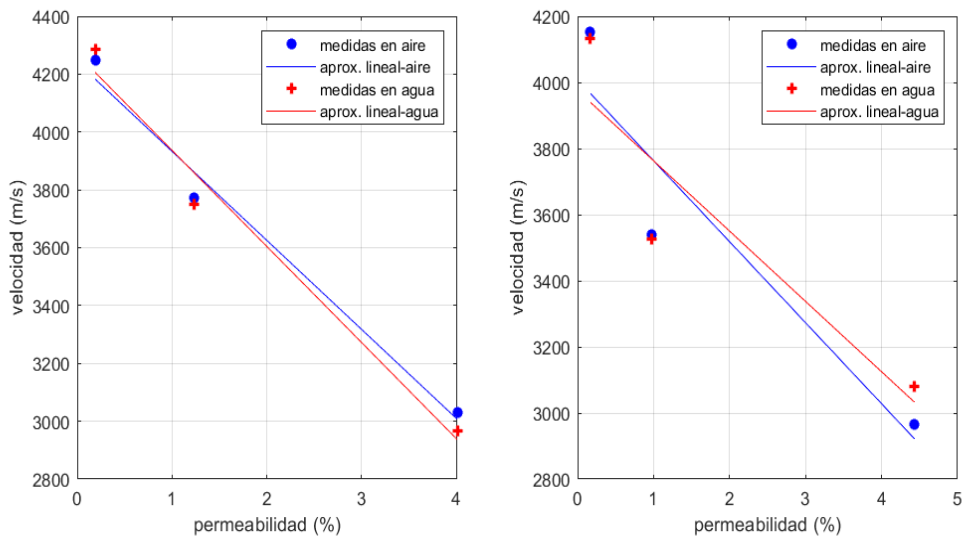


Figura 2.5: Datos crudos superpuestos a rectas de aproximación, Serie 1(izquierda), Serie 2(derecha)

2.2. Análisis de resultados

Las tablas 2.7 y 2.8 muestran el grado de ajuste de los datos obtenidos de los ensayos a una función lineal. El coeficiente de correlación es obtenido a través de la fórmula de Pearson para dos variables aleatorias A y B, de media μ_A , μ_B y desviación estandar σ_A y σ_B respectivamente [6].

$$\rho(A, B) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{A - \mu_A}{\sigma_A} \right) \left(\frac{B - \mu_B}{\sigma_B} \right) \quad (2.2)$$

medio	serie	correlación lineal
aire	1	0.9984
aire	2	0.9998
agua	1	0.9992
agua	2	0.9962

Tabla 2.7: coeficientes de correlación lineal, porosidad

medio	serie	correlación lineal
aire	1	0.9910
aire	2	0.9353
agua	1	0.9889
agua	2	0.9088

Tabla 2.8: coeficientes de correlación lineal, permeabilidad

Capítulo 2. Resultados y Análisis

Capítulo 3

Conclusiones

Se extraen las siguientes conclusiones del trabajo realizado:

- El “tiempo de vuelo” del pulso de ultrasonido está correlacionado en forma directa con la porosidad y permeabilidad del hormigón permeable, mientras que la velocidad de propagación de las ondas se correlaciona en forma inversa.
- Si se utiliza un material acoplante para mejorar la transmisión de las ondas de ultrasonido a través de las probetas debe colocarse en igual cantidad en cada una, evitando también cargarlas demasiado pues como se observó en las figuras 2.2 y 2.4 esto podría ocasionar diferencias en las velocidades de propagación para una probeta con el mismo nivel de porosidad o permeabilidad.
- En las figuras 2.2 y 2.4 se distingue una agrupación muy pronunciada de los datos de velocidad de propagación, para una serie y otra. Dado que los experimentos fueron realizados en días distintos una de las posibles causantes podría ser una diferencia de temperatura ambiente, esto debería verificarse realizando todas las mediciones en el mismo momento.

Capítulo 3. Conclusiones

Referencias

- [1] et. al. A. Spalvier, A. Díaz. *Recomendaciones sobre Pavimentos de Hormigón Permeable*. 2021.
- [2] Fwa T. F. & Tan K. H. Chu L. *Laboratory Evaluation of Sound Absorption Characteristics of Pervious Concrete Pavement Materials*. 2017.
- [3] R.C. Meininger. *No-Fines Pervious Concrete for Paving*, *Concrete International*, American Concrete Institute. 1988.
- [4] Brite/Euram Report. *Surface Properties of Concrete Roads in Accordance with Traffic*. 1994.
- [5] C. Rimoldi and L. M. Mundo. *Ensayo no Destructivo por Método de Ultrasonido*. 2012.
- [6] W.T. Vetterling W.H. Press, S.A. Teukolsky and Flannery B.P. *Numerical Recipes in C, The Art of Scientific Computing*. Press syndicate of the University of Cambridge, 1992.

Referencias

Índice de tablas

2.1. Ensayo de permeabilidad	7
2.2. Ensayo de permeabilidad	7
2.3. Medida de Porosidad	8
2.4. Medida de Porosidad	8
2.5. Medida de ultrasonido	9
2.6. Medida de ultrasonido	9
2.7. coeficientes de correlación lineal, porosidad	13
2.8. coeficientes de correlación lineal, permeabilidad	13

Índice de tablas

Índice de figuras

1.	Hormigón permeable (figura extraída de [1])	III
2.	aplicaciones del hormigón permeable (figura extraída de [1])	IV
3.	Plaza de hormigón permeable en Beijing, China (figura extraída de [1])	IV
1.1.	Permeámetro de carga constante (figura extraída de [1])	2
1.2.	probeta de hormigón permeable con material acoplante (cera de abeja) en una de sus caras	5
1.3.	set_up de medidas	6
2.1.	Transmisión en aire (izq) y transmisión en agua (der), serie 1	10
2.2.	Velocidad de propagación vs Porosidad del hormigón	11
2.3.	Datos crudos superpuestos a rectas de aproximación, Serie 1(izquierda), Serie 2 (derecha)	11
2.4.	Velocidad de propagación vs permeabilidad	12
2.5.	Datos crudos superpuestos a rectas de aproximación, Serie 1(izquierda), Serie 2(derecha)	12

Índice de figuras

Esta es la última página.
Compilado el martes 13 agosto, 2024.
<http://iie.fing.edu.uy/>