

Efecto del tamaño de los especímenes en la determinación de los índices de durabilidad para materiales base cemento

R. Visairo-Méndez^{1*} . A. A. Torres-Acosta² . R. Alvarado-Cárdenas¹ 

*Autor de Contacto: rvisairom@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i3.381>

Recepción: 18/01/2019 | Aceptación: 02/08/2019 | Publicación: 30/08/2019

RESUMEN

En este proyecto se requiere determinar si índices de durabilidad son afectados por tres tamaños de especímenes evaluados de mortero de reparación. Se elaboraron cubos de 5 x 5 cm, cilindros de 5 x 10 cm y de 10 x 20 cm para cada tipo de mortero. Se encontró que ciertos índices (WER, TVC y CS) no dependen de la geometría del espécimen. Sin embargo, los resultados de UPV presentaron una diferencia entre cubos y cilindros de 10 x 20 cm mayor a 17.5 %. Los resultados de ϵ_{eff} presentaron una diferencia muy interesante entre los cubos y los cilindros de 5 x 10 cm. Se recomienda restringir la altura de los especímenes a un valor estándar.

Palabras clave: mortero; durabilidad; tamaño; comportamiento.

Citar como: Visairo-Méndez, R., Torres-Acosta, A. A., Alvarado-Cárdenas, R. (2019), “Efecto del tamaño de los especímenes en la determinación de los índices de durabilidad para materiales base cemento”, Revista ALCONPAT, 9 (3), pp. 288 – 302, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i3.381>

¹ Dirección de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Santiago de Querétaro, México.

² Escuela de Ingeniería y Ciencias, Campus Querétaro, Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, Santiago de Querétaro, México.

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 segundo número del año 2020 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2020.

Specimen size effect on the durability indexes determination for cement-based materials

ABSTRACT

In this project is required to determine if there is any result variation in durability indexes due to size effect in sizes of mortar specimens. Cubes 5 x 5 cm, 5 x 10 cm and 10 x 20 cm cylinders for each mortar type were considered. It was found that in certain indexes (WER, TVC, and CS) results did not depend on specimen's geometry. Nonetheless, UPV index result presented differences up to 17.5 % between the cubes and the 10 x 20 cm cylinders. ϵ_{eff} index result showed an interesting difference between the cubes and the 5 x 10 cm cylinders used in full length. Therefore, it is recommended to restrict the height of the specimen to a standard value.

Keywords: mortar; durability; size; performance.

Efeito do tamanho da amostra na determinação dos índices de durabilidade de argamassas base cimento

RESUMO

Em este projecto é necessário determinar se os índices de durabilidade são afetados por três tamanhos de amostras avaliadas para argamassa de reparo. Cilindros de 5 x 5 cm, 5 x 10 cm e 10 x 20 cm para cada tipo de argamassa foram considerados. Verificou-se que em determinados índices (WER, TVC e CS) os resultados não dependiam da geometria da amostra. No entanto, o resultado do índice de UPV apresentou diferenças de até 17,5% entre os cubos e os cilindros de 10 x 20 cm. O resultado do índice ϵ_{eff} mostrou uma diferença interessante entre os cubos e os cilindros de 5 x 10 cm. Nestes casos, recomenda-se restringir a altura da amostra a um valor padrão.

Palavras-chave: argamassa; durabilidade; tamanho; comportamento.

1. INTRODUCCIÓN

Las estructuras de concreto que se encuentran expuestas a ambientes agresivos (urbanos, marinos, industriales, o cualquier combinación de los mismos) desarrollan un daño prematuro durante su vida de servicio (< 10 años después de haberse construido y haberse puesto en servicio). Los deterioros típicos son grietas y manchas de óxido en la superficie de concreto y hasta pueden llegar a presentar mayores deterioros debido a la delaminación del recubrimiento del concreto si la corrosión del acero de refuerzo o presfuerzo no se detiene. Esta patología es muy común actualmente en las estructuras de concreto y usualmente se debe a falta de diseño por durabilidad ya que solamente se realiza el diseño por resistencia mecánica. (Torres et. al., 2002; Torres y Castro, 2013; Calado et. al., 2015; Mendoza-Rangel et. al., 2016).

1.1. Diseño por durabilidad

La durabilidad del concreto es la capacidad de mantener los efectos físicos, químicos, biológicos y climáticos como se establezcan en las reglamentaciones nacional e internacional. La vida de servicio es definida como el periodo de tiempo en el cual una estructura es puesta en servicio hasta que requiere alguna reparación, rehabilitación o refuerzo, debido a algún tipo de daño el cual puede causar una disminución estética o comprometer la seguridad de sus ocupantes (usuarios). En este sentido, el hecho de que una estructura supere su vida de servicio implica que sus condiciones de estética o seguridad deben ser restauradas a través de mantenimiento correctivo y no necesariamente cuando la estructura se encuentra a punto del colapso como es definido

erróneamente en algunas instancias. (Troconis et. al., 1997; Shi et. al., 2012; Mendoza-Rangel et. al., 2016).

Una estructura durable es aquella cuya vida de servicio llega a ser mayor a 50 años; y en países en donde la tecnología del concreto ha evolucionado rápidamente, la vida de servicio puede llegar de 80 a 100 años. El proceso de diseño por durabilidad de estructuras de concreto comienza cuando se usa el criterio de selección del material del concreto basado en ambientes agresivos. Una vez que los materiales se han seleccionado para la elaboración del concreto, el siguiente paso es el diseño de la estructura por diseño de resistencia mecánica. Conociendo el tipo de cemento, las adiciones minerales que pueden ser usadas en la mezcla de diseño, la cantidad de cemento y la relación agua/cemento (a/c), los ingenieros estructuralistas predicen la resistencia mecánica de la mezcla de concreto. Esto permite a las estructuras estar protegidas durante su vida de servicio por más de 80 años evitando de esta manera reparaciones costosas durante su vida útil de servicio. Otra alternativa de diseño por durabilidad puede ser a través de índices de durabilidad como se ha realizado en investigaciones recientes. (Torres et. al., 2002; Helene et. al., 2003; Solís et. al., 2012; Mendes et. al., 2018).

1.2. Construcción de estructuras de concreto durables

En la supervisión y control de calidad del concreto duradero, la fabricación, el transporte, la colocación, consolidación y el curado, la dosificación y el cumplimiento del recubrimiento de concreto de los elementos a construir, deben ser monitoreados de cerca. En el caso de la fabricación y dosificación del concreto para mezclas durables, es obligación del contratista y/o supervisor externo extraer núcleos de concreto en elementos estratégicos para determinar que el concreto ya colocado y endurecido cumpla con los requerimientos del proyecto de durabilidad. Mediante esta metodología, el propietario asegura que los materiales utilizados en la construcción son sin duda, durables. Esta necesidad de verificar que el concreto colocado en los elementos estructurales cumpla con los requerimientos solicitados en el diseño, se debe al hecho de que: realizar estas pruebas en cilindros estandarizados, elaborados por laboratorios o especialistas acreditados para su fabricación, no podría reflejar lo que realmente es colocado en los diferentes elementos de concreto de la obra. (Helene et. al., 2003; Torres y Castro, 2018).

1.3. Pruebas de índices de durabilidad

El comportamiento de la durabilidad del concreto se ha evaluado a partir de pruebas físicas y mecánicas de laboratorio. Las más utilizadas son: Resistividad Eléctrica Húmeda (REH), Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU), porcentaje Total de Vacíos (TV), Porosidad Efectiva (ϵ_{eff}) y Resistencia Mecánica a la Compresión (RMC). Todos los valores experimentales obtenidos de estas pruebas se conocen comúnmente como índices de durabilidad (Tabla 1). Dichas pruebas se realizan regularmente en un laboratorio de campo o en un laboratorio de control de calidad/aseguramiento de calidad de la supervisión. Además, se han realizado correlaciones entre los índices considerando RMC, REH y la prueba de Absorción Capilar de Agua (ACA) (Medeiros-Junior et. al., 2019). La metodología seguida para caracterizar la durabilidad (u obtener los índices de durabilidad) de las mezclas de concreto antes y durante los trabajos de construcción utiliza especímenes de diferentes dimensiones y formas. (Troconis et. al., 1997; Mejía et. al., 2018).

El muy bien conocido proyecto DURAR (Troconis et. al., 1997) indica que la altura de las muestras debe ser < 50 mm en algunas pruebas, pero el área de contacto podría ser variable. Típicamente los especímenes son cubos o cilindros con dimensiones laterales de cinco a 30 cm. Por ejemplo, las dimensiones típicas del cubo son de 5 x 5 cm, 10 x 10 cm o 15 x 15 cm; Las dimensiones típicas del cilindro son 5 x 10 cm, 10 x 20 cm y 15 x 30 cm. Estas formas y dimensiones variables pueden generar diferencias en los resultados de índices de durabilidad obtenidos si las pruebas tienen restricciones en las dimensiones de especímenes, como se observa en la literatura con algunas

pruebas mecánicas que son afectadas por las dimensiones de los especímenes. (Bazant y Planas, 1997; Bazant, 2000). Este efecto de dimensiones en el comportamiento mecánico de los materiales se define como la Ley de Efecto de Tamaño (SEL por sus siglas en inglés), en la que los materiales como el concreto con tamaños de agregado bastante grandes en dimensión, pueden producir un comportamiento mecánico diferente dependiendo del tamaño de la muestra utilizada para la prueba. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es presentar un programa experimental para determinar si las pruebas de los índices de durabilidad (REH, VPU, TV, ϵ_{eff} y RMC) son afectadas por la forma y dimensión del espécimen.

Tabla 1. Niveles de índices de durabilidad (Troconis et. al., 1997)

| Prueba de índice de durabilidad | Desempeño bajo | Desempeño medio | Desempeño alto |
|---------------------------------|----------------|-----------------|----------------|
| REH, $k\Omega\text{-cm}$ | < 10 | 10 – 50 | > 51 |
| VPU, km/s | < 2.9 | 3 – 4 | > 4.1 |
| TV, % | > 15 | 10 - 15 | < 10 |
| ϵ_{eff} , % | > 10 | 5 - 10 | < 5 |
| RMC; MPa | < 30 | 30 - 50 | > 51 |

2. PROCDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. Materiales

Para determinar si la forma y las dimensiones de los especímenes afectan los índices de durabilidad, la presente investigación descarta el posible efecto sobre el tamaño del agregado, por lo tanto, mortero (cemento, agua, arena) en lugar de concreto (cemento, agua, arena, grava) se utilizó como material de prueba.

Los morteros se definieron de acuerdo con los índices de durabilidad: bajo, intermedio y alto desempeño (llamados N2, N1 y MR, y SR en esta investigación). Estas variaciones de mezclas de mortero se consideraron para verificar si también eran afectados por las variables evaluadas.

Para los morteros N1 y N2, el cemento utilizado fue el cemento CPC (nombre mexicano para el cemento Portland Tipo I con algunas adiciones desconocidas para disminuir el contenido de clínker; el fabricante no proporcionó especificaciones del cemento) según NMX-C-414-ONNCCE-1999. La arena utilizada fue sílice de un banco de material, tamaño de malla número 89, según ASTM C33 - 2003. Las proporciones de cemento:arena en peso utilizadas para fabricar los especímenes de mortero fueron 1:2.75. Las proporciones de las mezclas de mortero utilizadas se especifican en la Tabla 2.

Tabla 2. Proporciones de mezcla de mortero de desempeño bajo (N2) y desempeño medio (N1)

| Material | N2 [l / m^3] | N1 [l / m^3] |
|----------|------------------|------------------|
| Cemento | 128.04 | 186.24 |
| Agua | 322.67 | 322.67 |
| Arena | 549.29 | 491.09 |

Para los morteros MR y SR se utilizaron dos marcas comerciales, y se les proporcionó cierta dosis protegida, por lo que no se obtuvo información detallada de los fabricantes.

La información del mortero MR fue que contenía fibras de propileno, pero el fabricante no proporcionó información sobre el tamaño de la fibra ni el contenido. La fabricación del mortero MR se realizó siguiendo las especificaciones del fabricante escritas en el empaque del producto:

190 ml de agua por kilogramo de producto, proporcionando 9.5 l de agua por bolsa de 50 kg. Se mezclaron el producto comercial y agua en una mezcladora de mortero, hasta que la mezcla se homogeneizara completamente antes de colocarla en moldes para cubos de 5 x 5 cm, cilindros de 5 x 10 o 10 x 20 cm. Las características físicas del producto comercial obtenidas por el fabricante se presentan en la Tabla 3.

La información proporcionada para el mortero SR fue: cemento CPC (sin concentración definida), arena de cantera de mármol, relación baja de agua/cemento (w/c) (< 0.35), reductor de agua de tercera generación basado en policarboxilatos (presentación en polvo integrado en la mezcla seca). El producto llegó almacenado en cubetas de plástico cerradas (20 l) y solo se requirió agregar agua potable en la mezcladora de mortero (no se permite mezclar a mano, según las recomendaciones del fabricante).

Tabla 3 Características físicas del mortero MR otorgadas por el fabricante

| Característica física | Descripción | Descripción |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Peso volumétrico Seco | 1,413 kg / m ³ | - |
| Peso volumétrico endurecido | 1,690 kg / m ³ | - |
| Resistencia mecánica | 16.0-18.0 MPa a 1 día | 35.0-45.0 MPa at 28 días |
| Resistencia a la flexión | 9.5-9.7 MPa a 1 día | 11.0-12.0 MPa a 28 días |
| Resistencia a la tensión | 3.2-4.0 MPa a 1 día | 40.0-46.0 MPa a 28 días |

2.2. Dimensiones de especímenes

Para esta investigación, se seleccionaron tres dimensiones para los especímenes de morteros: cubos de 5 x 5 cm (cubo), cilindros de 5 x 10 cm (Cil-5), y cilindros de 10 x 20 cm (Cil-10). Para los morteros N1 y N2, las mezclas fueron preparadas para obtener 15 cubos, cuatro cilindros de 5 x 10 cm (chico), y nueve cilindros de 10 x 20 cm (grande). Los especímenes obtenidos de los morteros comerciales MR y SR fueron los mismos para cubos (15) y cilindros chicos (4), el material sobrante se utilizó para colocar en moldes de cilindros de 10 x 20 cm. La cantidad total de especímenes elaborados se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4 Cantidad de especímenes elaborados en esta investigación

| Tipo de mortero | Cubo 5 x 5 cm | Cil. 5 x 10 cm | Cil. 10 x 20 cm |
|-----------------|---------------|----------------|-----------------|
| Desempeño bajo | 15 | 4 | 9 |
| Desempeño medio | 15 | 4 | 9 |
| Desempeño medio | 15 | 4 | 15 |
| Desempeño alto | 15 | 4 | 22 |

Para algunas pruebas, los cilindros grandes fueron cortados ya que el método define una altura específica (≤ 5 cm). Se obtuvieron cuatro especímenes de este tipo para cada cilindro grande (nombrado R-10).

2.3. Índice de Resistividad Eléctrica Húmeda (REH)

Determinar la REH implica una técnica simple que define rápidamente el valor de un concreto, y también es una prueba rentable, dado el bajo costo del equipo requerido. El espécimen se retiró del curado (de ahí el nombre REH), se colocaron esponjas húmedas en cada extremo y se colocaron placas metálicas (normalmente un metal resistente a la corrosión como el acero inoxidable o

bronce) en cada extremo tocando las esponjas. Posteriormente, el voltaje se transmitió a través de las dos placas y se midió la corriente iónica resultante. El equipo fue utilizado para medir los valores de corriente para obtener la resistencia eléctrica húmeda entre placas (RH), esto es, la resistencia del espécimen de mortero. El mortero se midió utilizando un Resistómetro comercial siguiendo el procedimiento estándar NMX-C-514-ONNCE-2016 (en kilo ohms, $k\Omega$). El valor resultante se multiplicó por una constante de celda que divide el área de la muestra (A) por su longitud (L): 5 cm para cubos, 1.96 cm para cilindros chicos y 3.93 cm para cilindros grandes. La Figura 1 representa esta prueba.

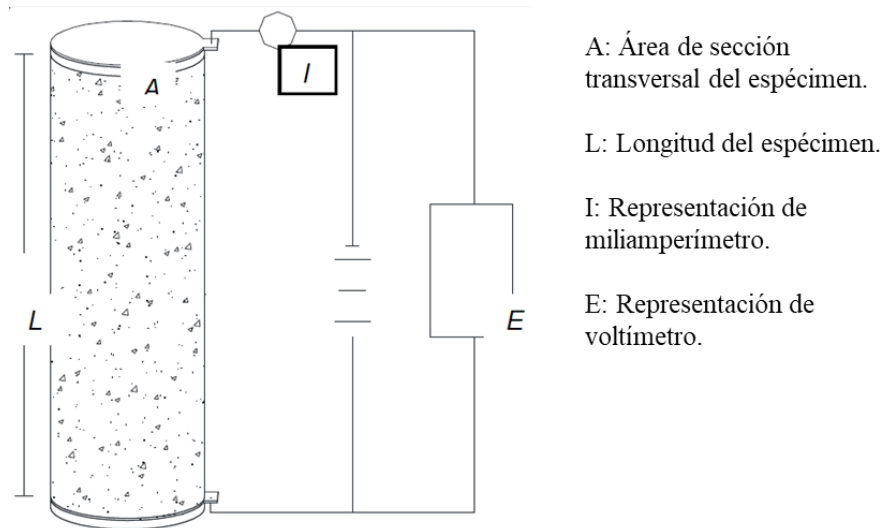


Figura 1. Representación de la prueba REH

2.4. Índice de Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU)

La técnica de VPU, método indirecto para determinar la homogeneidad de los materiales base cemento, se utilizó para estimar otra propiedad física de los especímenes de mortero (Troconis et. al., 1997). En este método, un emisor envía un pulso ultrasónico que viaja a través del material hasta llegar a un receptor. La distancia entre el emisor y el receptor se divide por el tiempo transcurrido en el cual la onda del pulso llega al transductor en el otro extremo del espécimen, a esto se le conoce como VPU. Después de realizar la prueba de REH, se utilizaron los mismos especímenes para llevar a cabo la técnica VPU la cual se obtuvo usando un medidor velocidad de pulso ultrasónico comercial. El procedimiento seguido fue de acuerdo con la norma ASTM C597 - 2002 y el proyecto DURAR (Troconis et. al., 1997). En la Figura 2 se presenta el equipo utilizado para esta prueba.



Figura 2. Equipo utilizado para la prueba de VPU

2.5. Índice de Porcentaje Total de Vacíos (TV)

El TV fue obtenido siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C642 - 1997. Después de secar a 50 °C (122 °F) hasta peso constante (de 20 a 35 días), se tomó una medición inicial y se definió como peso seco (m_D , por sus siglas en inglés). Después los especímenes fueron colocados en contenedores de plástico con alta humedad y se obtuvieron mediciones de peso hasta peso constante (m_S , por sus siglas en inglés). También se obtuvo el peso de especímenes saturados dentro del agua para obtener el peso saturado sumergido (m_{SS} , por sus siglas en inglés). Finalmente se obtuvo el TV (%) con la siguiente ecuación (1):

$$TV (\%) = \frac{100*(m_S - m_D)}{m_S - m_{SS}} \quad (1)$$

Dado que el método especifica altura de especímenes ≤ 5 cm, los cilindros grandes usados en esta prueba tuvieron que ser cortados en rodajas con alturas de 5 cm aproximadamente. A este tipo de espécimen se denominó R-10 en esta investigación.

2.6. Índice de Porosidad Efectiva (ϵ_{eff})

Este índice se obtiene como resultado de la prueba de absorción capilar del agua (AC). Para determinar la absorción capilar del mortero, para ello se realizó el procedimiento con la técnica de Fagerlund (Troconis et. al., 1997; ASTM C1585, 2004). Esta técnica es la base de lineamientos suecos considerando cuatro coeficientes que describen la cinética de la absorción capilar de morteros y concretos: resistencia a la penetración del agua (m), coeficiente de absorción capilar (k), porosidad efectiva (ϵ_{eff}), y absorción capilar (S). La misma preparación de los especímenes fue requerida para los cilindros grandes con el fin de obtener especímenes de 5 cm de altura (R-10).

Los especímenes fueron secados a una temperatura de 50 °C (108 °F) y < 30 % H.R. hasta lograr peso constante. Posteriormente se cubrieron los cubos con un material de sellado (cera) en cuatro de sus seis caras, y los cilindros y rodajas en su perímetro curvo, dejando al descubierto las caras superior e inferior. Después de registrar el peso seco inicial con cubierta de cera (W_0 , por sus siglas en inglés) Los especímenes fueron colocados en contenedores con fondo plano (22 ± 4 °C [97 ± 18 °F] y ~ 100 % H.R.), asegurándose que el nivel del agua alcanzara de 3 a 5 mm (0.1 y 0.2 in.). El agua utilizada para los cilindros chicos fue contaminada con 3.5 % de iones cloruro (por peso de agua). Todos los especímenes fueron colocados en sus respectivos recipientes y se revisó

el nivel de agua diariamente para mantener el mismo (evitando la pérdida de agua debido a evaporación o absorción de los especímenes).

El cambio de peso de los especímenes por unidad de área expuesta $((W_t - W_0) / A)$ se registró una vez al día, cinco días a la semana durante los primeros dos meses. Después fueron tres mediciones por semana durante los próximos tres meses. Finalmente, las mediciones fueron tomadas una vez a la semana hasta que el periodo de la prueba fue terminado.

Los coeficientes de absorción fueron calculados con base en las siguientes ecuaciones (Troconis et. al., 1997):

$$m [sec \cdot m^{-2}] = t_n \cdot z^{-2} \quad (2)$$

$$k [kg \cdot m^{-2} \cdot sec^{-1/2}] = (W_t - W_0) \cdot A^{-1} \cdot t^{-1/2} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{eff} [\%] = 0.001 \cdot k \cdot m^{-1/2} \quad (4)$$

$$S [m \cdot sec^{-1/2}] = m^{-1/2} \quad (5)$$

donde el coeficiente k puede ser evaluado como la pendiente de la zona lineal de la gráfica $(W_t - W_0) / A$ como función de $t^{1/2}$; el coeficiente m puede ser determinado calculando el tiempo t_n requerido para que el agua llegue a la superficie superior del espécimen (p.ej., cuando $z = 10$ cm [4 in.] en cilindros chicos).

2.7. Índice de Resistencia Mecánica a la Compresión (RMC)

Los cubos y cilindros fueron ensayados a compresión axial hasta la falla siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C109/C109M - 2002. Los ensayos fueron realizados utilizando una máquina universal servo hidráulica (capacidad máxima nominal de 500 kN [112.4 kips]). La carga promedio fue de ~0.25 MPa/sec [36.26 psi/sec]. Una computadora conectada a la máquina de ensayos almacenaba la salida de los datos automáticamente (carga máxima).

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Para una mejor interpretación, los resultados se presentan como un promedio de tres muestras por factor de variación: tipo de mortero, forma (cubo o cilindro) y dimensión.

3.1. Índice de Resistividad Eléctrica Húmeda (REH)

El concepto de resistividad eléctrica es un parámetro que indica la interconexión entre poros en materiales granulares (p.ej., suelos) y porosos. En materiales porosos, como mortero o concreto, la resistividad eléctrica depende del grado de saturación de poros y, en menor medida, de la hidratación de la pasta de cemento o la presencia de sales disueltas en una fase acuosa (Troconis et. al., 1997). En la Figura 3 se presenta el promedio de REH vs. tiempo de tres tipos de mortero (valor promedio de al menos tres muestras por mezcla, forma y dimensión). El comportamiento del mortero MR fue variable entre los desempeños de N1 y N2 por lo cual se decidió comparar los morteros convencionales N1 y N2 con los morteros comerciales SR.

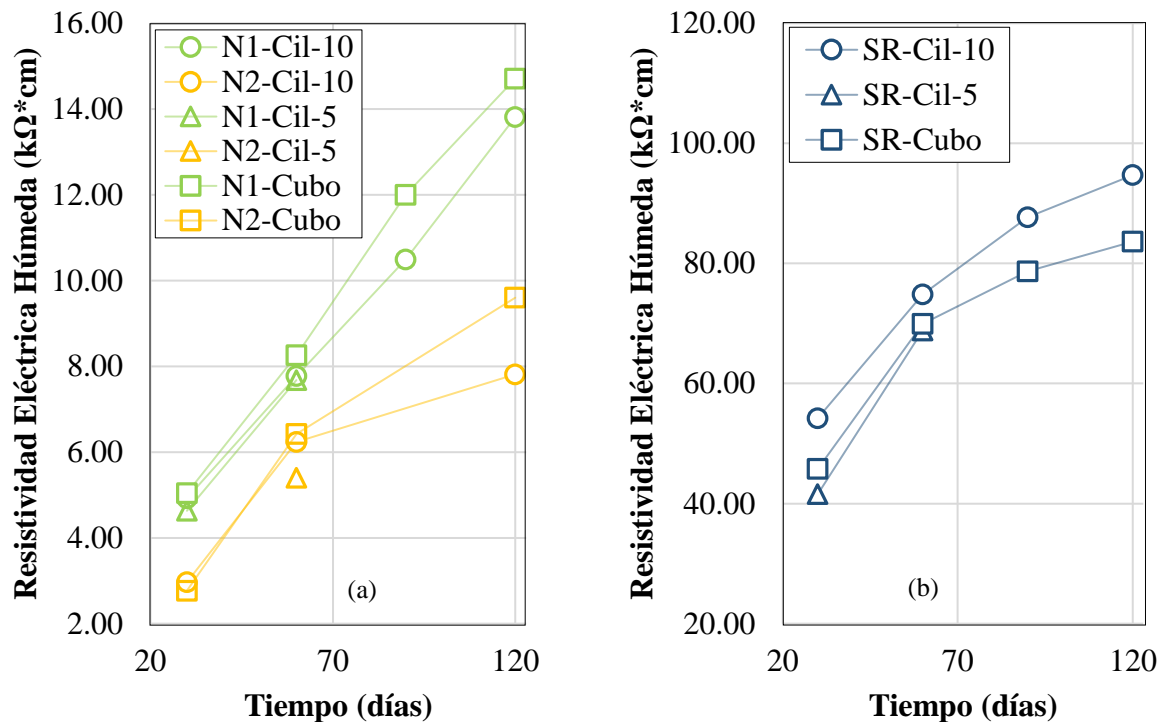


Figura 3. Valores experimentales de REH promedio vs. tiempo: (a) morteros de desempeño bajo (N2) y medio (N1); (b) mortero de desempeño alto (SR)

Como se observa en la Figura 3, se presenta un comportamiento similar del índice de REH en todos los morteros el cual aumenta con el tiempo. También se observa en la misma figura que la diferente geometría de los especímenes (cubos vs. cilindros) y dimensiones, no afectaron los resultados promedio de REH obtenidos utilizando el método directo (NMX-C-514-ONNCCE, 2016), por lo tanto, se apoya la obtención de medición REH sin importar la geometría del espécimen siempre y cuando se cumpla la longitud $L \geq 5$ cm.

Comparando el comportamiento de los tres tipos de especímenes, el mortero de desempeño bajo N2, incrementa con el tiempo y presenta una curva asintótica alcanzando valores promedio de REH de 9 $k\Omega \cdot cm$ muy cercano al valor especificado en la Tabla 1. En el caso del mortero de desempeño medio N1, la REH promedio continúa incrementando con el tiempo, lo que significa que el cemento se continuaba hidratando y que la porosidad continuaba disminuyendo. Los valores obtenidos del índice de REH obtenidos a 120 días alcanzaron alrededor de 14 $k\Omega \cdot cm$, lo cual es muy cercano al límite bajo establecido en la Tabla 1.

Finalmente, el índice promedio de REH obtenido del mortero de desempeño alto SR presentó un comportamiento no lineal después de 60 días y, a los 120 días de monitoreo, los valores alcanzaron alrededor de 90 $k\Omega \cdot cm$, pero continuaba incrementando a un ritmo más bajo que en el inicio del monitoreo. El valor obtenido a 120 días superó el valor de 51 $k\Omega \cdot cm$, valor definido como el más bajo del límite de desempeño alto para morteros.

En una investigación reciente (Mejía et. al., 2018), se observa que los morteros comerciales se encuentran en el mismo rango sin importar el tamaño del espécimen correspondiendo a un rango de desempeño medio. El mortero más con menor desempeño presentó un promedio de ± 6 $k\Omega \cdot cm$ a 120 días.

3.2. Índice de Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU)

El comportamiento de VPU vs. tiempo se observa en la Figura 4. Para este índice el material evaluado fue solamente para el mortero comercial SR. Esto se debe a que los otros morteros no fueron considerados para esta prueba por falta de especímenes.

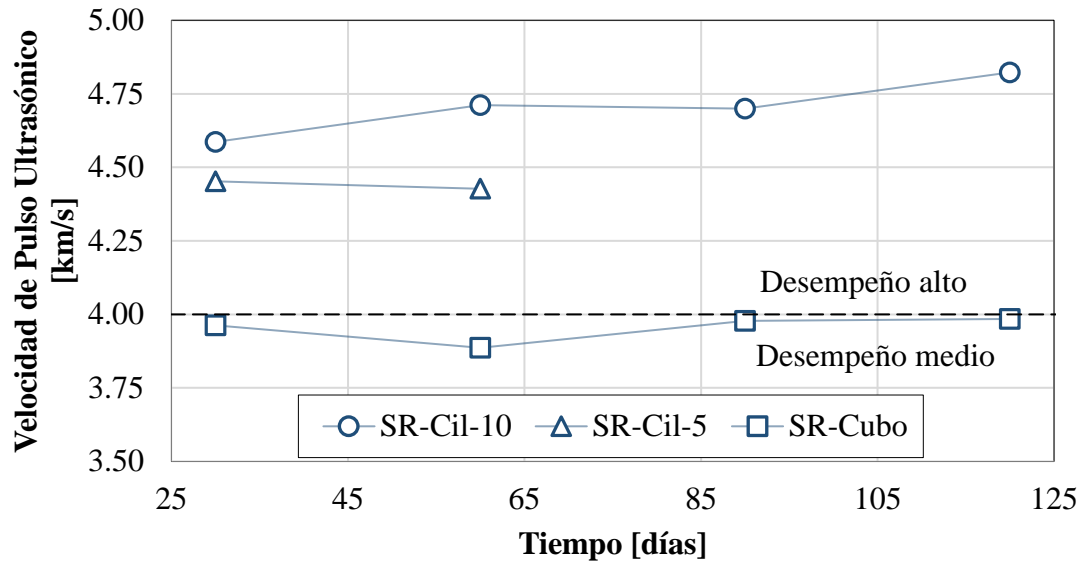


Figura 4. Valores experimentales promedio de VPU vs. tiempo para mortero de desempeño alto (SR)

Como se observa, el índice de VPU se mantiene constante durante el tiempo de experimentación (de 25 a 120 días). Sin embargo, los valores de VPU para las tres diferentes dimensiones son diferentes entre ellos, presentando valores bajos cuando se evaluaron los cubos de 5 x 5 cm (~3.95 km/s), continuando con los valores obtenidos de los cilindros de 5 x 10 cm (~4.44 km/s), y finalmente por los cilindros de 10 x 20 cm (~4.70 km/s) presentando un desempeño alto.

Con base en el criterio para índice de VPU de la Tabla 1, el mortero SR permaneció con desempeño alto si el espécimen cumple con la longitud $L \geq 10$ cm. Si la longitud del espécimen es menor a 10 cm, el mismo tipo de mortero SR cambia a mortero de desempeño medio.

La diferencia entre el espécimen cubo de 5 x 5 cm y el cilindro de 5 x 10 cm fue alrededor del 12.4 %, y respecto al cilindro de 10 x 20 cm fue alrededor de 19.0 %. Con base en los resultados presentados y de acuerdo con la Tabla 1, se recomienda que el índice VPU requiere mediciones considerando especímenes con longitud suficiente ($L \geq 10$ cm) ya que los especímenes chicos podrían producir errores en las mediciones. Esto se atribuye a la consecuencia del uso de componentes de la marca comercial del mortero ya que los cilindros, que son más grandes que los cubos, presentaron un mejor desempeño lo cual significa una mejor hidratación del cemento.

En una reciente investigación (Mejía et. al., 2018), los resultados entre los diferentes tipos de tamaño también fueron diferentes. En su trabajo de investigación, los cubos (5 x 5 cm) presentaron desempeño alto. Dos de los morteros presentaron un promedio de ± 4.2 km/s a los 120 días, pero el mismo tipo de mortero en cilindros de 10 x 20 cm presentó un promedio de ± 3.85 km/s a la misma edad. Esto puede ser una consecuencia de que el cemento haya sido bien hidratado, si el espécimen es pequeño, los poros desaparecerán y el pulso electromagnético en esta lectura será rápido.

3.3. Índice de Porcentaje Total de Vacíos (TV)

En la Figura 5 se presentan los resultados obtenidos del TV vs. tiempo de tres diferentes geometrías de especímenes utilizados. Para este índice, los especímenes utilizados fueron los cubos y cilindros

chicos en su totalidad; para la tercera geometría de espécimen se utilizaron las rodajas de 5 cm de altura obtenidas de los cilindros de 10 x 20 cm (R-10).

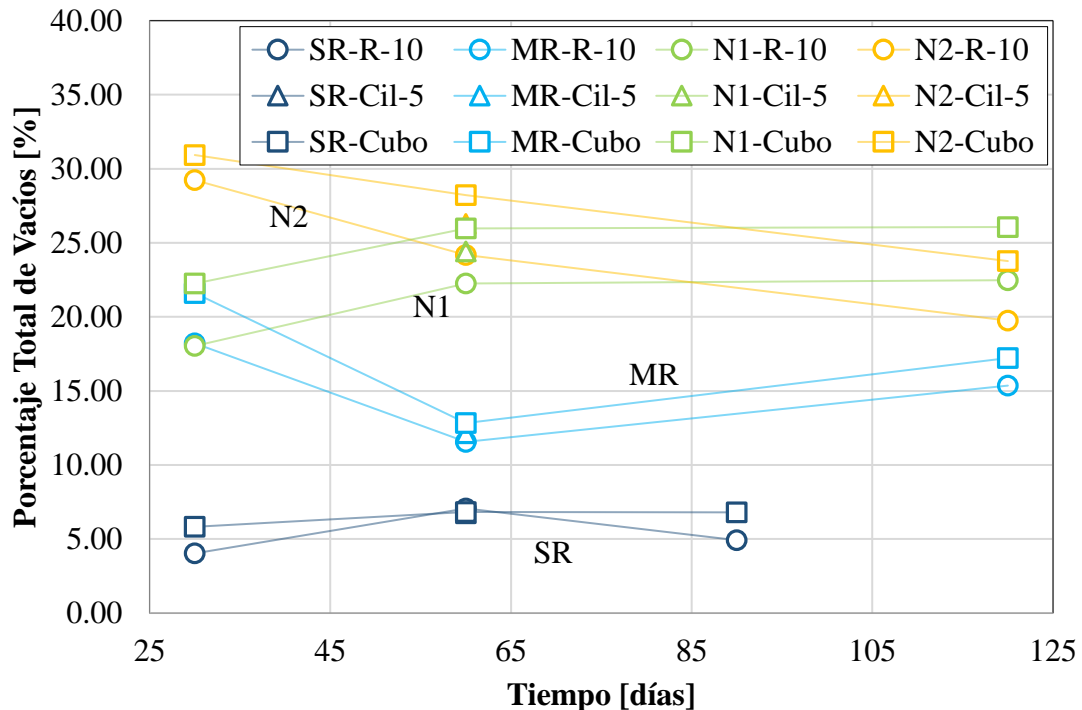


Figura 5. Valores experimentales promedio de TV vs. tiempo para morteros de desempeño bajo (N2), medio (N1, MR) y alto (SR)

Se tomó la decisión de proceder con estas geometrías la prueba de TV aunque los lineamientos para determinar contenido de vacíos en materiales endurecidos base cemento especificaran utilizar especímenes pequeños como cubos de 5 x 5 cm o rodajas de 5 cm obtenidas de cilindros de 10 x 20 cm. Por lo tanto, se procuró determinar si los cilindros chicos completos (5 x 10 cm) presentarían diferencias en los resultados obtenidos.

Como se observa en la Figura 5, el índice promedio del mortero de desempeño bajo N2 fue similar sin importar la geometría ni forma del espécimen (cubo, cilindro o rodaja), obteniendo después de 60 e incluso 120 días de experimentación, valores de 24.4 % en R-10, 26.3 % en cilindros de 5 x 10 cm y 27.6 % en cubos; (de acuerdo con la Tabla 1 de criterios de desempeño), con diferencias entre geometría de especímenes alrededor de ± 10.5 %.

Para los morteros de desempeño medio N1 y MR, los resultados del índice TV fueron similares independientemente de la geometría del espécimen (cubo, cilindro o rodaja) y la dimensión, pero obteniendo algunas diferencias interesantes entre ellos. Dado que el mortero N1 se preparó como un mortero típico base cemento (cemento, agua y arena), su desempeño promedio del índice TV fue bastante similar al mortero de desempeño bajo (N2), presentando valores de aproximadamente 24 % a 120 días, lo cual corresponde a valores de desempeño bajo de acuerdo con la Tabla 1.

Por otro lado, el mortero MR presentó un promedio de TV de solo 16 %, lo cual corresponde a valores en el límite entre los rangos de desempeño medio y alto, como se define en la Tabla 1. Finalmente, el mortero SR presentó un promedio TV bajo del 6 % correspondiendo al desempeño alto en límites presentados en la Tabla 1. Este mortero también presentó valores índices promedio TV similares independientemente de la forma y dimensión de los especímenes.

3.4. Índice de Porosidad Efectiva (ϵ_{eff})

El comportamiento de la porosidad efectiva en el tiempo se presenta en la Figura 6 como valores promedio ϵ_{eff} . El índice promedio ϵ_{eff} en el tiempo para todos los morteros evaluados resultaron acorde al comportamiento típico de los morteros: a mayor incremento del tiempo, el índice ϵ_{eff} disminuye debido al mayor grado de hidratación de la pasta de cemento en el mortero.

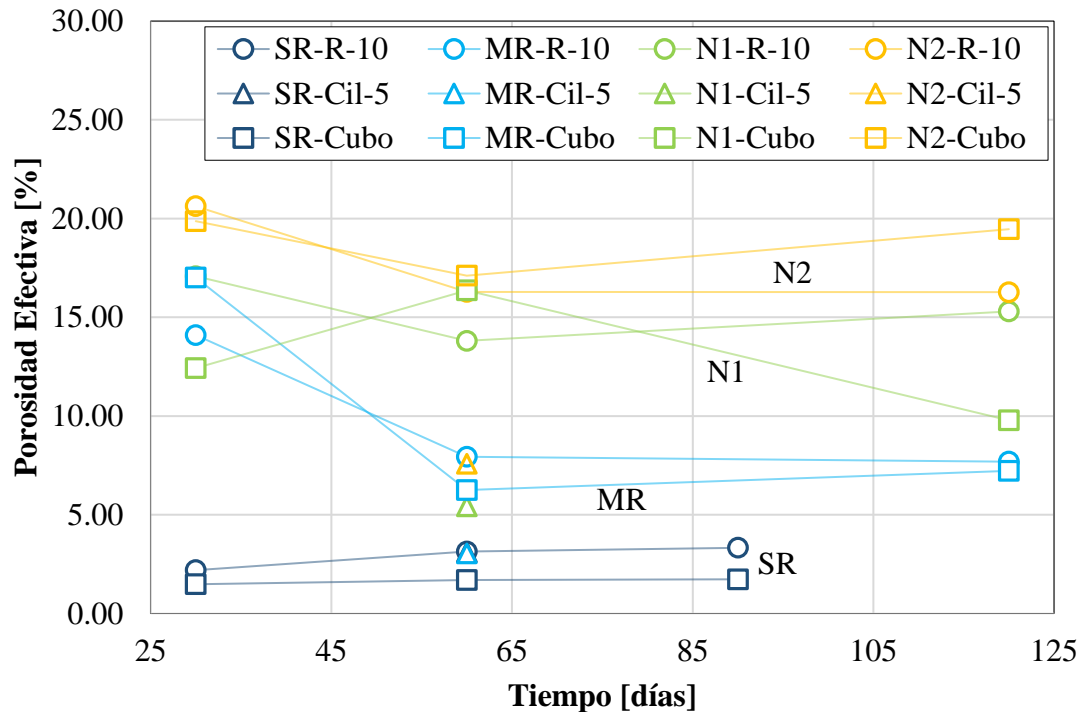


Figura 6. Valores experimentales promedio de ϵ_{eff} vs. tiempo de morteros de desempeño bajo (N2), medio (N1, MR) y alto (SR)

En la Figura 6 también presenta las diferencias de los valores ϵ_{eff} entre el tipo de mortero a los 120 días de edad: la ϵ_{eff} de N2 se encuentra entre 16 % - 20 %, ϵ_{eff} de N1 entre 10 % - 16 %, ϵ_{eff} de MR alrededor del 7.5 %, y la ϵ_{eff} de SR se encuentra alrededor del 2.5 %. Por lo tanto, se observe que no existe diferencia en los valores de ϵ_{eff} entre N1 y N2, lo cual concuerda con los valores del índice TV obtenidos (Figura 5). Comparando los valores de rangos de la Tabla 1 para este índice ϵ_{eff} , los valores de N1 y N2 corresponden a un mortero de desempeño bajo, los valores para el mortero MR a un desempeño medio y los valores para el mortero SR a un desempeño alto.

Respecto al efecto de la geometría y dimensión de los especímenes en el valor promedio del índice ϵ_{eff} , los morteros MR (desempeño medio) y SR (desempeño alto) no presentaron ninguna diferencia entre los tres diferentes especímenes utilizados. Además, los morteros de desempeño bajo, N1 y N2 para este índice en particular, presentaron diferencias en los valores obtenidos dependiendo de la geometría y dimensión del espécimen, y en algunos casos (N1-Cubo) un comportamiento errático (los resultados presentaron valores altos y bajos en el tiempo).

En los morteros N1 y N2 la diferencia entre cilindros chicos y los valores promedio de cubos y rodajas de cilindros de 10 x 20 cm a 60 días fue de 278 % y 220 %, respectivamente. Esto podría atribuirse al hecho de que la altura de cilindros chicos es mayor que la altura de los cubos y rodajas. Adicionalmente, se observa que después de 60 días de curado, las rodajas de 10 cm presentaron una alta ϵ_{eff} promedio mayor que los cubos, esto se puede atribuir al hecho de que el cemento reaccionó más rápido en especímenes más chicos que en los largos tales como los cilindros de 10 x 20 cm, de donde se obtuvieron las rodajas. Otra posibilidad es que se deba al efecto de la

geometría: el efecto del volumen total del espécimen vs. su área de contacto (cubos y cilindros de 5 x 10 cm tienen un valor menor que el de las rodajas obtenidas de cilindros de 10 x 20 cm). Por lo tanto, el índice de ϵ_{eff} podría ser afectado debido a la geometría y sus dimensiones de especímenes evaluados.

3.5. Índice de Resistencia Mecánica a la Compresión (RMC)

La resistencia mecánica de los especímenes fue obtenida considerando solo dos dimensiones de especímenes: cubos y cilindros de 10 x 20 cm. Los resultados del promedio de RMC vs. tiempo se presentan en la Figura 7.

En la misma figura, los valores del índice RMC obtenidos de los tres diferentes tipos de mortero, se encuentran claramente definidos. El mortero de desempeño bajo N2 presentó valor índice promedio de 25 MPa; los morteros N1 y MR presentaron promedios de 40 MPa y 50 MPa, respectivamente; y el mortero de desempeño alto SR presentó valores promedio que alcanzaron entre 60 MPa y 80 MPa. Los valores promedio de RMC comparados con la geometría y dimensiones (cubo vs. cilindro de 10 x 20 cm) para los morteros N1, N2, y MR son similares: las diferencias entre los valores promedio fueron menores a $\pm 10\%$.

El mortero SR presentó un comportamiento errático en los valores de RMC como se observa en la Figura 7. Este comportamiento será evaluado en una próxima investigación; se considera que se debe a una aparente deficiencia de la preparación del espécimen cuando la geometría es mayor como cilindros de 10 x 20 cm.

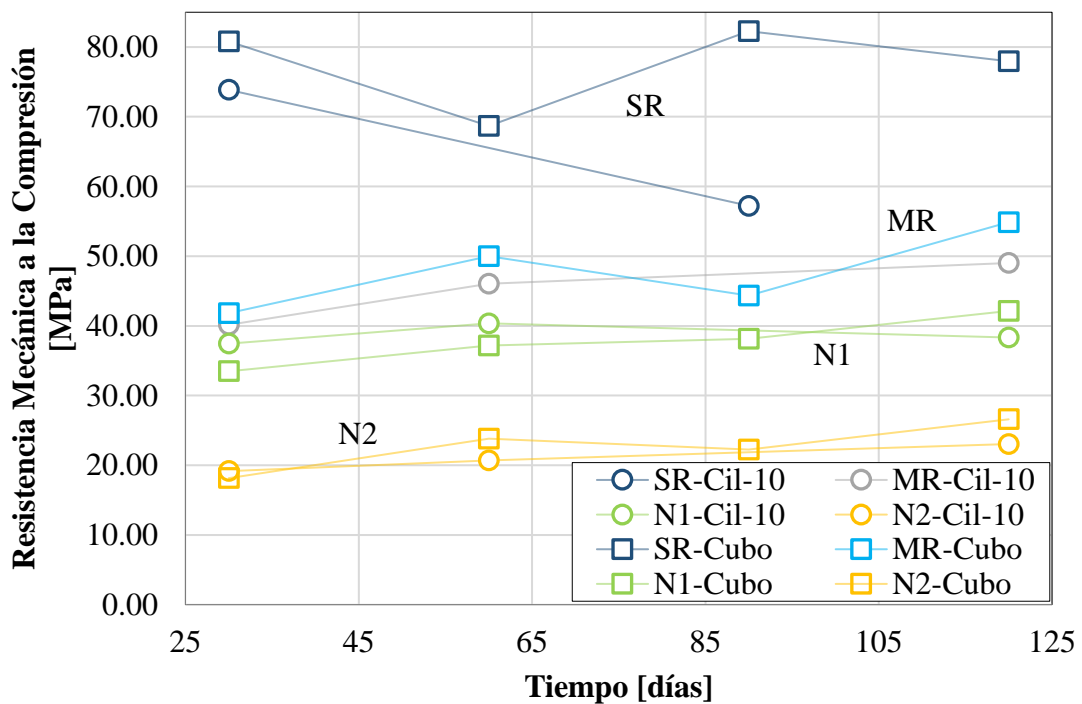


Figura 7. Valores experimentales promedio de índice de RMC vs. tiempo para morteros de desempeño bajo (N2), medio (N1, MR) y alto (SR)

La trabajabilidad de este mortero comercial SR durante la elaboración de la mezcla es bastante baja al principio, pero después de 15 minutos de estar en la mezcladora funcionando, el mortero se transformó en un estado casi líquido. Posteriormente, el vaciado del mortero en los moldes no siguió el procedimiento estandarizado (NMX-C-514-ONNCCE, 2016) debido a su forma altamente fluida y al hecho de que el mortero con los moldes debe consolidarse mediante una mesa vibratoria.

Por lo tanto, se deben realizar pruebas adicionales en tal preparación de especímenes con este mortero especializado en una próxima investigación para obtener los mejores resultados de este material.

4. CONCLUSIONES

Esta investigación presenta un programa experimental para determinar si los índices de durabilidad (REH, VPU, TV, ϵ_{eff} , y RMC) son afectados debido a la geometría del espécimen y su dimensión. Con base en los resultados obtenidos, se establecen las siguientes conclusiones:

1. Los índices de durabilidad Resistividad Eléctrica Húmeda (REH), porcentaje Total de Vacíos (TV), y Resistencia Mecánica a la Compresión (RMC) no fueron afectados por la geometría ni tamaño de los especímenes evaluados.
2. Los índices de durabilidad Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) y Porosidad Efectiva (ϵ_{eff}) fueron afectados debido a la geometría y tamaño de los especímenes evaluados. Se recomienda que para el índice VPU se utilicen especímenes con longitud $L \geq 10$ cm. Por otro lado, para determinar el índice de ϵ_{eff} , la altura de los especímenes debe ser restringida a una altura $H \leq 5$ cm, independientemente de la geometría del espécimen. (cubo o rodaja).

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), Instituto Mexicano del Transporte (IMT), y la Universidad Marista de Querétaro (UMQ) por permitirnos el uso de los equipos de laboratorio e instalaciones. También agradecemos por la beca de posgrado y el apoyo financiero del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) otorgada a la M.E. Visairo-Méndez. Agradecemos de manera especial a: Servicios Integrales (SICGA S.A. de C.V.), Movinco (Movinco S.A. de C.V.), y MasaRoca (MasaRoca S.A. de C.V.) por la provisión de los morteros comerciales.

Las opiniones y los resultados de esta investigación son de los autores y no necesariamente de agencias de financiación.

6. REFERENCIAS

- ASTM International. (1997), *ASTM C642 Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. <https://doi.org/10.1520/C0642-97>
- ASTM International. (2002), *C109/C109M Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in, or [50-mm] Cube Specimens)*. https://doi.org/10.1520/C0109_C0109M-02
- ASTM International. (2002), *ASTM C597 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. <https://doi.org/10.1520/C0597-02>
- ASTM International. (2003), *ASTM C 33 Standard Specification for Concrete Aggregates*. https://doi.org/10.1520/C0033_C0033M-18
- ASTM International. (2004), *ASTM C1585 Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*. <https://doi.org/10.1520/C1585-04>
- Bazant, Z. P. (2000). Size effect. *International Journal of Solids and Structures*, 37(1-2), 69-80. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(99\)00077-3](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(99)00077-3)
- Bazant, Z. P., Planas, J. (1997), “*Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials*” CRC press. Florida, United States of America. <https://doi.org/10.1201/9780203756799>

- Calado, C., Camoes, A., Monteiro, E., Helene, P., Barkokébas Jr., B. (2015). Durability Indicators Comparison for SCC and CC in Tropical Coastal Environments. *Materials*. 8:1459-1481. <https://doi.org/10.3390/ma8041459>
- Helene, P., Pereira, F. (Ed.). (2003), “*Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón. Reparación, Refuerzo y Protección*”. CYTED XV: F Corrosión/impacto ambiental sobre materiales: Reparación, refuerzo y protección de estructuras de hormigón, Construction Chemicals, Degussa, Sao Paulo, Brazil.
- Medeiros-Junior, R. A., Munhoz, G. S., Medeiros, M. H. (2019), Correlations between water absorption, electrical resistivity and compressive strength of concrete with different contents of pozzolan. *Latin-American Journal of Quality Control, Pathology and Construction Recovery*. 9(2):152-166. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.335>
- Mejía, M., Torres, A. A., del Valle, A., Vázquez, V. E., Trueba, C., Martínez, M., Lomelí, M. G. (2018), Publicación Técnica 513 - Caracterización física y mecánica por desempeño de morteros de reparación, para su uso en la infraestructura del transporte de la SCT. *Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integración Estructural*.
- Mendes, S. E., Oliveira, R. L., Cremonese, C., Pereira, E., Pereira, E., Medeiros-Junior, R. A. (2018), Electrical resistivity as a durability parameter for concrete design: Experimental data versus estimation by mathematical model. *Construction and Building Materials*. 192:610-620. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.145>
- Mendoza-Rangel, J. M., Flores-Jarquín, J. M., De Los Santos, E. U., Garcés Terradillos, P. (2016), Durability of sustainable repair mortars exposed to industrial environments. *Latin-American Journal of Quality Control, Pathology and Construction Recovery*. 6(1):41-51. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v6i1.114>
- ONNCCE (1999), *NMX-C-414-ONNCCE-1999 Industria de la Construcción - Cementos Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Prueba*.
- ONNCCE (2016), *NMX-C-514-ONNCCE-2016 Industria de la Construcción - Resistividad Eléctrica del Concreto Hidráulico - Especificaciones y métodos de ensayo*.
- Shi, X., Xie, N., Fortune, K., Gong, J. (2012), Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. *Construction and Building Materials*. 30:125-138. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.038>
- Solís, R. G., Moreno, E. I., Arjona, E. (2012), Resistencia de concreto con agregado de alta absorción y baja relación a/c. *Latin-American Journal of Quality Control, Pathology and Construction Recovery*. 2(1):21-28. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v2i1.23>
- Torres, A. A., Castro, P. (2013), Corrosion-Induced Cracking of Concrete Elements Exposed to a Natural Marine Environment for Five Years. *Corrosion Engineering Section*. 69(11):1122-1131. <http://dx.doi.org/10.5006/0844>
- Torres, A. A., Castro-Borges, P. (2018), La filosofía para obtener obras de concreto durables. *IC Ingeniería Civil – Estructuras*. I(586):12-15.
- Torres, A., Fabela, M., Vázquez, D., Hernández, J., Martínez, M., Muñoz, A. (2002), Publicación Técnica 204 - Cambios en la rigidez y resistencia a la flexión de vigas de concreto dañadas por corrosión del refuerzo. *Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural*.
- Troconis de Rincón, O., Romero De Carruyo, A., Andrade, C., Helene, P., Díaz, I. (Ed.). (1997), “*Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*”. CYTED, XV: B Corrosión/impacto ambiental sobre materiales: Durabilidad de la armadura, Río de Janeiro, Brazil.