

16. Valorización de residuos industriales como materiales de construcción para vivienda autoproducida



ROSALÍA RUIZ RUIZ*

ELIA MERCEDES ALONSO GUZMÁN**

MARCO ANTONIO NAVARRETE SERAS***

ADRIÁN IXCOATL CERVANTES SERVÍN****

NOEL DÍAZ GONZÁLEZ*****

MAURICIO ARREOLA SÁNCHEZ*****

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.300.16>

Resumen

La vivienda en México se ha convertido en una de las principales demandas que propone atender el Plan Nacional de Desarrollo, ya que existe 25 % de rezago habitacional según cifras de la Comisión Nacional para la Vivienda aunado a que el 58.5 % de las viviendas habitadas requiere de arreglos o remodelaciones que, en la mayoría de los casos, son hechos por los propietarios de las casas, es decir, se autoconstruye. La selección de materiales es una de las etapas que tiene mayor impacto en la construcción de una vivienda adecuada, debido a que influye directamente en su habitabilidad,

* Maestra en Ciencias en Ingeniería Ambiental. Profesora en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8828-3380>; correo electrónico: rosalia.ruiz@umich.mx

** Ingeniera Civil. Profesora de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8502-4313>

*** Doctor en Ciencias de la Ingeniería Física. Profesor-investigador en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4582-9387>

**** Doctor en Ingeniería Ambiental. Profesor de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5649-4199>

***** Maestro en Infraestructura del Transporte. Técnico Académico en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

***** Doctor en Ciencias en Ingeniería Química. Profesor-investigador de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4105-5281>

vida útil, impacto ambiental y costo. En este trabajo se presenta un estudio de propiedades físico-mecánicas e indicadores de durabilidad en morteros elaborados con residuos industriales con la finalidad de identificar si estos últimos pueden ser valorizados como materiales de construcción para vivienda autoproducida, dado que al ser residuos generados localmente se podrían abatir costos y minimizar el impacto ambiental.

Palabras clave: *residuos, morteros, propiedades físico-mecánicas, durabilidad, vivienda.*

Introducción

El rápido crecimiento demográfico y la industrialización han generado que la demanda de bienes y servicios se incremente, la construcción de vivienda es una de las principales demandas en México. Según estimaciones reportadas por la Comisión Nacional de Vivienda, más de 549 mil hogares necesitarán una vivienda en 2030 (CONAVI, 2023). Por esta razón la vivienda social es prioritaria para el Plan de Desarrollo Nacional 2019-2024 y deberá ser atendida mediante un conjunto de acciones encaminadas a la adquisición, mejoramiento, ampliación y sustitución de esta (Gobierno de México, 2019), acciones que en su mayoría pueden ser satisfechas bajo el esquema de autoproducción que se busca que pase de ser espontánea a asistida, de modo que se pueda tener acceso a la vivienda adecuada (Cervera, A. H., Patricio, 2023; SEDATU, 2024), la selección de materiales es uno de los elementos clave para conseguirlo, ya que influye directamente en su habitabilidad, vida útil, impacto ambiental y costo (Muciño, 2020; SEDATU, 2021). La valorización de residuos como materiales de construcción podría ser una buena alternativa para conseguirlo, ya que no solo se evitaría la extracción de material virgen y la disposición inadecuada de residuos, sino que su uso podría propiciar la economía circular.

Uso de residuos como material de construcción

En la actualidad existe un gran interés por parte de los investigadores, a nivel mundial, en valorizar o al menos reutilizar los diferentes residuos existentes como modificadores de materiales de construcción. Enfocándose principalmente en modificar tres tipos de materiales compósitos: ladrillos, morteros y concretos (Jannat et al., 2021): que se usan ampliamente en el desarrollo de todo tipo de infraestructura. Con la utilización de residuos se logran mejoras en la durabilidad de los compósitos de construcción y al mismo tiempo se mejora la huella ecológica de la industria constructora, ya que se podría reducir el consumo de materiales de banco, de cemento, los costos de producción e incrementar la vida de servicio de la infraestructura civil. Algunos de los residuos que han sido estudiados son: polvo de mármol (Bentlemsan et al., 2023), lodos residuales metalúrgicos (Song et al., 2024), residuos triturados de cerámica y ladrillos (El-Seidy et al., 2024; Younis et al., 2022), residuos reciclados de vidrio, cerámica y neumático (Sabbrojjaman et al., 2024), escorias metalúrgicas (Gencel et al., 2021; Santamaría-Vicario et al., 2015) todos como sustituto de los áridos naturales. Aunque algunos residuos se pueden usar también como sustitutos del materiales cementante como los polvos de roca, producto de la trituración (Dobiszewska et al., 2023), residuos de demolición de concreto, residuos de procesos de pirolisis, “soaring demand for natural resource devouring and CO₂-producing material, cement in the construction industry, poses enormous ecological risk, accelerating the requirement of an alternative or supplementary cementitious material (SCM)” (Sabrin et al., 2024, 108765), también conocidos como materiales puzolánicos (Bentlemsan et al., 2023), escoria de alto horno (Cabrera-Madrid et al., 2016), arenas residuales de la técnica *sandblasting* (Sutrisno et al., 2024), entre otros.

Estudio de la incorporación de residuos industriales como material cementante en morteros elaborados en Michoacán

En esta sección se presentan trabajos de investigación desarrollados en el laboratorio de materiales Ing. Luis Silva Ruelas de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH),

respecto al comportamiento de morteros de cemento elaborados con residuos industriales, de manera particular los provenientes de la siderúrgica, ya que es una industria con gran presencia en el estado. Los trabajos fueron recolectados del repositorio institucional de la UMSNH y enseguida se detallan los que son de interés para este trabajo.

Materiales

Los materiales sujetos de estudio son morteros elaborados con cemento Portland CPC-30R-RS, que es un cemento Portland compuesto con clase resistente de 30 MPa y resistente a los sulfatos; arena sílica proveniente del río Lerma, con características de la arena Ottawa; residuos de la siderúrgica de Lázaro Cárdenas, Michoacán, como sustituto parcial del cemento en porcentajes de 5 %, 10 %, 15 %, 20 % y 30%; y agua conforme a las especificaciones de la norma mexicana para su uso en concreto. Las relaciones agua/cemento (A/C) y arena: cementante de todos los morteros son de 1:1.01 y de 1:2.75, respectivamente.

Ceniza de horno convertidor básico de oxígeno (CBOF)

Arguello (2012), Arreola (2013), Núñez (2013) y Ruiz (2015) reportan el uso de la ceniza que es generada durante el proceso de conversión del arrabio a acero mediante horno básico de oxígeno y por eso la identifican como CBOF. Arreola Sánchez (2013) menciona que este residuo es un tipo de escoria que tiene forma granular y fue tamizado en laboratorio hasta conseguir tamaño de partícula inferior a 80 micras para ser incorporado en la elaboración de los morteros.

Carbón mineral (CM)

El uso de residuo de carbón mineral generado por el coque utilizado en los altos hornos para producir hierro es reportado por Arguello (2012), Arreo-

la (2013), Cruz (2012), y Ruiz (2015), quienes lo nombran como CM. Según Arguello Hernández (2012), dado que el CM es granular y de gran tamaño, su implementación como sustituto del cemento en la elaboración de morteros requirió de procesos de molienda y tamizado hasta conseguir material que pasa la malla N° 200.

Escoria de alto horno (EAH)

“La escoria es un subproducto que se forma a partir de la ganga de minerales y cenizas provenientes del coque y el carbón” (Ternium, 2024). Se trata de un residuo con textura vítrea y forma granular que según Cruz (2012) fue molido y tamizado en laboratorio para su uso en morteros.

Tomando en cuenta lo mencionado arriba, los morteros sujetos de evaluación son 16, cuya nomenclatura queda definida por la abreviatura del residuo incorporado y su porcentaje de sustitución, a excepción del mortero sin sustitución, que es nombrado control.

Composición química de los materiales de sustitución

La composición química del CBOF, EAH y cemento reportado en esta sección fue determinada mediante la técnica de Fluorescencia de rayos X con la finalidad de identificar si tienen suficiente contenido de óxidos de aluminio, hierro y sílice, que son los responsables de conferir propiedades similares a las del cemento. Sin embargo, la composición de CM no se pudo determinar debido a pérdidas por calcinación (PXC) excesivas.

En la tabla 1 se muestra la composición química de los materiales mencionados. Aunque ninguno de los materiales cumple con el porcentaje mínimo de óxidos ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) para ser considerado como alguna clase de puzolana, la EAH y CBOF están cerca del mínimo requerido para puzolana de clase C y además cumplen con los porcentajes de SO_3 y PXC, según lo especificado en la norma ASTM C 618-03 (2017).

Tabla 1. Composición química de los residuos industriales

Compuesto	TiO ₂	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	PXC	SO ₃
CPC 30R RS	0.2	0.08	1.3	49.8	0.67	1.23	0.12	36.59	5.12	3.37
EAH	0.56	0.42	10.1	37.6	0.3	0.42	0.05	47.35	-0.7	1.93
CF	0.83	2.42	6	37.5	0.03	0.02	0.81	45.61	4.79	0.8
CM	86									

Fuente: elaboración propia.

Propiedades físico-mecánicas e indicadores de durabilidad

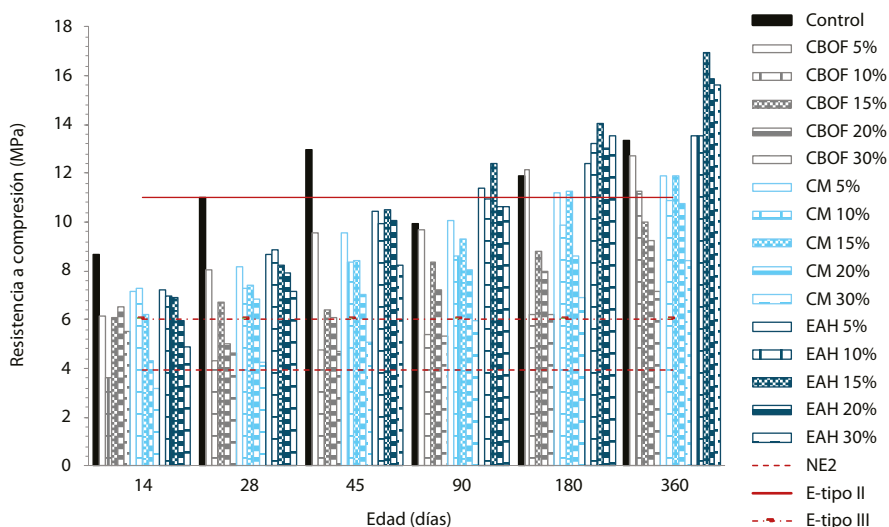
Cuando se pretende hacer la valorización material de un residuo, debe garantizarse que este cumpla con las características de funcionalidad para el uso pretendido. En el caso de los morteros, su función podría ser estructural o no estructural; usarse para pegar piezas de mampostería, recubrimiento o como material de relleno, entre otras. De manera general, se busca que los morteros puedan mezclarse y colocarse fácilmente, tengan adecuado desarrollo de resistencia mecánica y conserven sus propiedades a lo largo de su vida útil, es decir, que sean durables. Enseguida se describen brevemente los ensayos aplicados a los morteros sujetos de estudio y se muestran los resultados correspondientes.

Resistencia a compresión uniaxial

La resistencia a compresión se entiende como la carga axial máxima por una unidad de área que soporta un material, en este caso el mortero, cuya resistencia está en función con la relación A/C, el grado de hidratación, curado, edad y condiciones medioambientales (Kosmatka et al., 2004). Según la norma NMX-C-529-ONNCCE-2017 (2018), la resistencia a compresión es el parámetro más común para evaluar la calidad de un mortero en laboratorio y su ensayo consiste en aplicar carga sobre la sección transversal del espécimen hasta su falla, a diferentes edades, siendo la de 28 días la que suele usarse como referencia. La resistencia es determinada en muestras cúbicas de 5 cm de lado previamente curadas conforme a lo dispuesto en la NMX-C-061-ONNCCE-2015 (2015) y su valor es expresado en Megapascuales (MPa) o kg/cm².

En la figura 1 se presenta la compilación de resultados de compresión de morteros con residuos industriales a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días, con la finalidad de identificar el desarrollo de resistencia a lo largo del tiempo. En la misma figura se incluyen líneas que representan las especificaciones de resistencia promedio a compresión a 28 días, tanto para morteros estructurales (E-tipo II, E-tipo III), como no estructurales (NE-2), según las normas NMX-C-486-ONNCCE-2014 (2014) y NMX-C-529-ONNCCE-2017 (2018), respectivamente. Se puede notar que, aunque los morteros con sustituciones de residuos presentan valores inferiores al control a 28 días, tienen resistencia suficiente para uso estructural, excepto los reemplazados con 10 %, 20 % y 30 % de CBOF. Además, el desarrollo de resistencia de 28 a 360 días es notable en todas las mezclas, con incrementos que van desde 46 % a 161 %. Incluso el índice de resistencia a 28 días de los morteros de 5 %, 10 % y 15 % de EAH con respecto al control, superan el 75 % requerido para ser considerada como puzolanas, según la norma ASTM C618-03 (2017). Aunado a lo anterior, todos los morteros con EAH presentan mayor resistencia a compresión que el control, a partir de los 90 días.

Figura 1. Desarrollo de resistencia a la compresión de morteros con residuos industriales

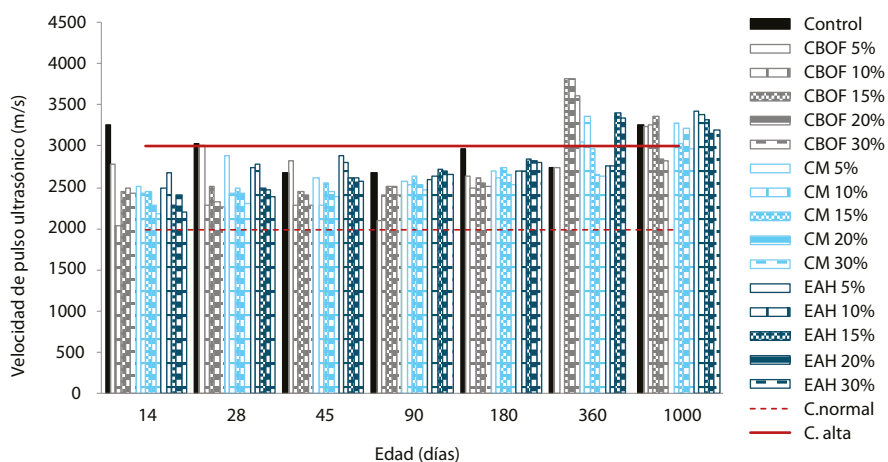


Fuente: elaboración propia con datos de Arguello (2012), Arreola (2013), Cruz (2012) y Núñez (2013).

Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

La velocidad de pulso ultrasónico es una técnica no destructiva que relaciona la distancia recorrida por el pulso a través de un material con el tiempo que tarda en hacerlo, el cual depende de las propiedades elásticas y de la densidad del medio (Vidaud y Vidaud, 2016). Por lo que esta técnica está relacionada con la homogeneidad del concreto, es decir, con la uniformidad de sus características, tanto en composición como en desarrollo de propiedades (Red Iberoamericana Durabilidad de la Armadura, 1998), de modo que puede ser un indicador de la calidad del concreto y la presencia de grietas y vacíos, su ensayo consiste en hacer transitar un pulso ultrasónico a través de la muestra, el cual es generado y recibido por transductores que mandan la señal al equipo, ya sea del tiempo de recorrido o propiamente la velocidad, que es medida en m/s (NMX-C-275-ONNCCE-2020, 2022).

La norma NMX-C-275-ONNCCE-2020 (2022), además de describir el procedimiento de prueba, establece criterios de calidad del concreto en función de su VPU, mismos que son representados en la figura 2 con líneas de color rojo. De acuerdo con esto, se puede notar que, todos los morteros evaluados son de calidad normal a edades tempranas y medias, con valores alrededor de 2,500 m/s. Pero a partir de los 360 días son considerados de calidad alta en su mayoría, siendo los morteros de CBOF 15 % y EAH 15 % superiores al testigo, con valores que oscilan entre 3 300 y 3 800m/s.

Figura 2. Desarrollo de velocidad de pulso ultrasónico de morteros con residuos industriales

Fuente: elaboración propia con datos de Arguello (2012), Arreola (2013), Cruz (2012), Núñez (2013) y Ruiz (2015).

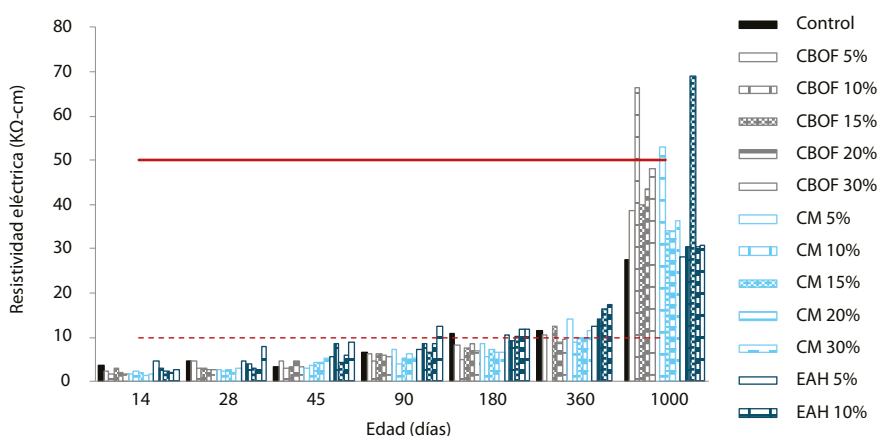
Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica es una propiedad de cada material, mide la posibilidad que tiene una corriente eléctrica de atravesar un medio y es considerada una de las variables que influye en la velocidad con que se corroe el acero de refuerzo, lo que repercute en la durabilidad del concreto armado (Guzmán, 2023). Según Andrade y D'Andrea (2011), la resistividad es el parámetro que permite relacionar a la microestructura con el comportamiento durable del concreto, ya que es un indicador de su fraguado, resistencia mecánica y grado de saturación que están relacionados con el curado y la impermeabilidad o resistencia al ingreso de sustancias agresivas en el concreto. La determinación de la resistividad eléctrica consiste en someter el espécimen a una corriente y voltaje dados por el resistómetro a través de las placas metálicas adosadas a las caras de la muestra conforme a lo establecido en la norma NMX-C-514 ONNCCE-2019 (2019).

Los resultados de resistividad eléctrica húmeda son mostrados en la figura 3, en la que se puede observar que, la resistividad eléctrica sigue de-

sarrollándose con el tiempo, siendo más notorio para los morteros con 15 % EAH, 20 % y 30 % de CBOF, y 10 % de CM a 1 000 días, cuyos valores fueron de 4 a 6 veces lo reportado a 360 días. A pesar de eso, la mayoría de los morteros evaluados presentan alto riesgo de corrosión, a excepción de CBOF 10%, CM 10% y EAH 15%, según lo reportado por la NMX-C-514 ONNC-CE-2019 (2019).

Figura 3. Desarrollo de resistividad eléctrica de morteros con residuos industriales



Fuente: elaboración propia con datos de Arguello (2012), Arreola (2013), Cruz (2012), Núñez (2013) y Ruíz (2015).

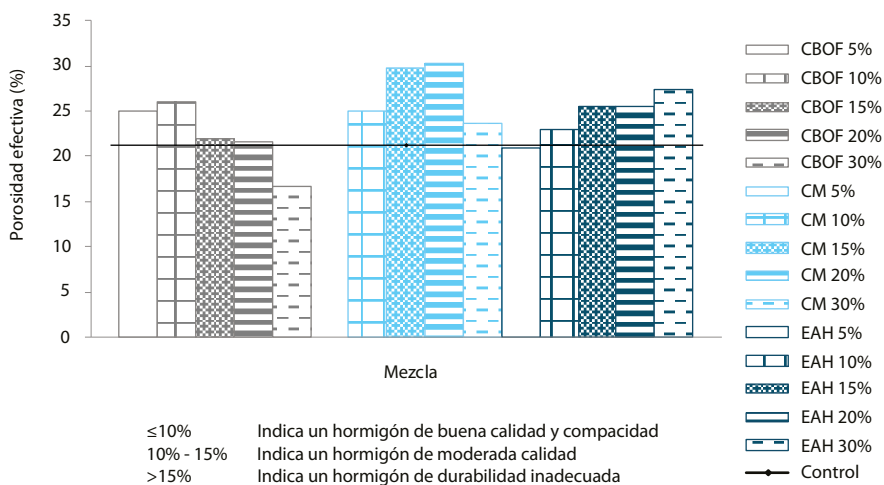
Porosidad efectiva

Se entiende por porosidad a todos los espacios vacíos que quedan en los concretos y morteros debido a la evaporación del agua de mezclado excedente y del aire atrapado en su fabricación. Los poros pueden ser de tres tipos básicamente: gel, aire y capilares. Cuando los últimos se encuentran interconectados entre sí, hay porosidad efectiva lo que ocasiona mayor permeabilidad del material, facilitando el ingreso de agentes externos que podrían disminuir su durabilidad (Red Iberoamericana Durabilidad de la Armadura, 1998). De hecho, la mayoría de los problemas de durabilidad en las estructuras de concreto están asociados con su porosidad y permeabili-

dad, incluso se dice que el factor determinante para lograr la durabilidad es fabricar un buen concreto con baja porosidad (Scrivener, y Solís-Carcaño y Alcocer-Fraga, 2019). La porosidad efectiva es uno de los coeficientes que puede ser determinado mediante el ensayo de absorción capilar propuesto por Goran Fagerlund, siendo esta una de las principales técnicas para evaluar el desempeño por durabilidad en morteros y concretos (Baptista Junior et al., 2024).

La porosidad efectiva a 1 000 días es reportada por Ruiz (2015) y es mostrada en la figura 4, en la que puede apreciarse que únicamente los morteros con 30 % de CBOF y 5 % de EAH presentan valores inferiores al control. Sin embargo, todos los morteros evaluados presentan porosidad superior al 15 % lo que sugiere que el concreto tiene durabilidad inadecuada, según los criterios del manual de inspección de la Red DURAR (Red Iberoamericana Durabilidad de la Armadura, 1998). Pero es importante mencionar que la porosidad efectiva que presentan es menor a la presentada en el diagrama de Neville y Brooks (2010), para morteros con relaciones A/C tan altas.

Figura 4. Porosidad efectiva de morteros con residuos industriales a 1000 días



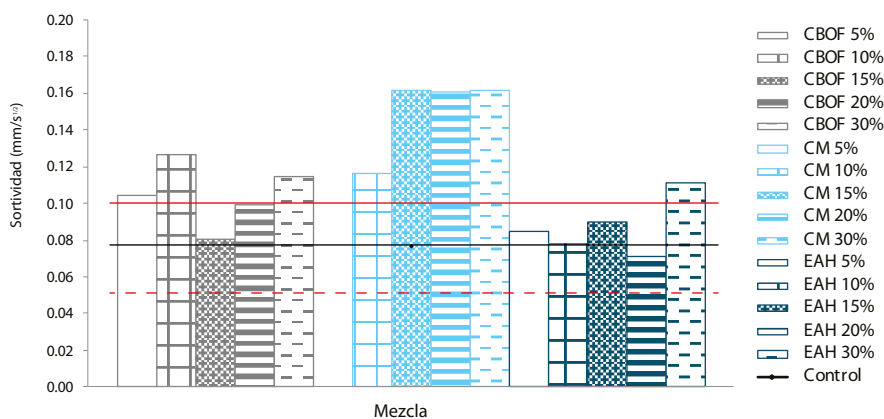
Fuente: elaboración propia con datos de Ruiz (2015).

Sortividad

Según la norma NMX-C-504-ONNCCE-2015 (2015), la sortividad indica la capacidad de absorción de agua a nivel capilar que tiene el concreto, lo que está relacionado con su porosidad efectiva y el ingreso de agentes agresivos que degradan la matriz cementicia. Se define como el incremento de masa en un espécimen en función del tiempo, cuando es expuesto a una fuente de agua en forma unidireccional y su valor es expresado en $\text{mm/s}^{1/2}$.

En la figura 5 son presentados los valores de sortividad a 1 000 días de los morteros sujetos de evaluación. Si bien todos los morteros exceden el límite de sorción capilar recomendado para ambientes severos; los morteros con sustituciones de EAH, excepto la sustitución de 30 %, son los que tienen menor sortividad, incluso están dentro de los valores de sorción capilar recomendada para estructuras en ambientes menos severos.

Figura 5. Sortividad de morteros con residuos industriales a 1000 días



Para espesor de recubrimiento de 30 mm en ambientes severos se recomiendan hormigones con sorción capilar $S \leq 3 \text{ mm/h}^{1/2}$ ($5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^{1/2}$); en medios menos severos puede ser hasta de $6 \text{ mm/h}^{1/2}$ ($10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$). Si el espesor de la cubierta se incrementa, la sorción capilar puede modificarse proporcionalmente.

Fuente: elaboración propia con datos de Ruiz (2015).

Conclusiones

Aunque la resistencia a compresión de los morteros con sustituciones de residuos industriales a edades tempranas (28 días) no logró superar al control; lo hizo a edades tardías, a partir de los 90 días en el caso de las EAH, lo que podría ser atribuido al potencial efecto puzolánico. Dados los valores de resistencia presentados, todos los morteros evaluados, excepto los CBOF 10 %, 20 % y 30 %, son considerados estructurales de tipo III, por lo que su uso se recomienda como recubrimiento en muros interiores y exteriores, parapetos, banquetas, plantillas de cimentación, entre otros.

La calidad de todos los morteros sujetos de evaluación de acuerdo con los criterios de la Red DURAR en función de la VPU es normal y se mantiene durante los primeros meses del periodo de análisis. Pero a partir del primer año tienen un incremento notable que, incluso en los casos de morteros con 10 %, 15 % y 20 % de CBOF, CM 10 % y las EAH son considerados de alta calidad. Lo anterior podría estar relacionado con la densificación de la matriz por el desarrollo de productos de hidratación.

Los parámetros de resistividad eléctrica, porosidad efectiva y sortividad podrían ser usados como indicadores de durabilidad, ya que están relacionados con la posibilidad de ingreso de agentes agresivos que degradan a la matriz cementicia. En este sentido, se busca que la resistividad eléctrica sea alta, mientras que la porosidad efectiva y sortividad sean bajas. Tomando en cuenta esto, los morteros con EAH son los que presentan las mejores condiciones. Aunque en el caso particular de la resistividad eléctrica, el 10 % de CM y CBOF también destacan.

De acuerdo con esto, algunos de los porcentajes de incorporación de residuos generados en la industria siderúrgica, principalmente las EAH, son susceptibles de ser valorizados como reemplazo parcial del cemento Portland en la elaboración de morteros que formen parte de elementos estructurales sujetos a atmósferas de exposición no tan agresivas. Sin embargo, el estudio deberá completarse con un análisis de costos y de ciclo vida para garantizar que se cumplen los criterios económicos, sociales y ambientales para ser utilizados en diferentes elementos constructivos de la vivienda.

Referencias

- Andrade, C. y D'andrea, R. (2011). La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. *Revista ALCONPAT*, 1(2), 93-101. <https://www.re-dalyc.org/articulo.oa?id=427639585001>
- Arguello, S. del C. (2012). *Análisis comparativo entre técnicas no destructivas y destructivas aplicadas a morteros con sustituciones minerales de alta temperatura, cenizas orgánicas e inorgánicas, residuos industriales y fibras de cactus* [Tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo]. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/3075
- Arreola, M. (2013). *Actividad puzolánica de materiales (sustitutos parciales del cemento), para mejorar la durabilidad de morteros para reparación y/o construcción de estructuras de concreto* [Tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolas Hidalgo]. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/3084
- ASTM C618-03. (2017). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete* (ASTM).
- Baptista Junior, G., Nascimento, L. C., Xavier, G. de C., Monteiro, S. N., Vieira, C. M. F., Marvila, M. T. y Alledi, C. T. D. B. (2024). Durability for coating mortars: Review of methodologies. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 657-671. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.03.020>
- Bentlemsan, N., Yahiaoui, W. y Kenai, S. (2023). Strength and durability of self-compacting mortar with waste marble as sand substitution. *Case Studies in Construction Materials*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02331>
- Cabrera-Madrid, J. A., Escalante-García, J. I. y Castro-Borges, P. (2016). Resistencia a la compresión de concretos con escoria de alto horno. Estado del arte re-visitado. *Revista ALCONPAT*, 6(1), 64-83. <https://doi.org/10.21041/ra.v6i1.116>
- Cervera, A. H. y Patricio, M. (2023). Estrategia Nacional de Autoproducción: visión de transformación para garantizar el acceso a la vivienda adecuada. *Revista Vivienda INFONAVIT*, (2), 78-85. <https://revistavivienda.infonavit.org.mx/2024/01/09/estrategia-nacional-de-autoproduccion-vision-de-transformacion-para-garantizar-el-acceso-a-la-vivienda-adecuada/>
- Comisión Nacional de Vivienda [CONAVI]. (2023). *Necesidad de viviendas en México: Una proyección del parque habitacional de 2020 a 2050*. https://siesco.conavi.gob.mx/doc/analisis/2023/Proyeccion_hogares.pdf
- Cruz, L. (2012). *Comportamiento mecánico del carbón mineral y de la escoria de alto horno en morteros como sustituto parcial del cemento* [Tesis de pregrado, Universidad Michoacana de San Nicolas Hidalgo]. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/7329
- Dobiszewska, M., Bagcal, O., Beycioğlu, A., Goulias, D., Köksal, F., Płomiński, B. y Ürünveren, H. (2023). Utilization of rock dust as cement replacement in cement composites: An alternative approach to sustainable mortar and concrete productions. In *Journal of Building Engineering*, 69. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106180>

- El-Seidy, E., Chougan, M., Al-Noaimat, Y. A., Al-Kheetan, M. J. y Ghaffar, S. H. (2024). The impact of waste brick and geo-cement aggregates as sand replacement on the mechanical and durability properties of alkali-activated mortar composites. *Results in Engineering*, 21, 101797. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101797>
- Gencil, O., Karadag, O., Oren, O. H. y Bilir, T. (2021). Steel slag and its applications in cement and concrete technology: A review. *Construction and Building Materials*, 283, 122783. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122783>
- Gobierno de México. (2019). *Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024*.
- Guzmán, A. (2023). Umbrales de resistividad para evaluar durabilidad del hormigón con hidrofugantes y diferentes relaciones agua/cemento. *Revista ALCONPAT*, 13 (3), 286-298. <https://doi.org/10.21041/ra.v13i3.699>
- Jannat, N., Latif Al-Mufti, R., Hussien, A., Abdullah, B. y Cotgrave, A. (2021). Utilisation of nut shell wastes in brick, mortar and concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 293, 123546. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123546>
- Kosmatka, S.H., Kerkhoff, B., Panarese, W.C. y Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Portland Cement Association.
- Muciño, A. (2020). Sustainability of Construction Materials. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, 7, 93–95. <https://doi.org/https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i7.141>
- Neville, A.M. y Brooks, J.J. (2010). *Concrete technology*. Pearson Education Limited.
- NMX-C-061-ONNCCE-2015. (2015). *Industria de la Construcción-Cementantes Hidráulicos- Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cementantes Hidráulicos*. Diario Oficial de la Federación.
- NMX-C-275-ONNCCE-2020. (2022). *Industria de la Construcción-Concreto Hidráulico-Determinación de la Velocidad de Pulso Ultrasónico a Través del Concreto-Método de Ensayo*. Diario Oficial de la Federación.
- NMX-C-486-ONNCCE-2014. (2014). *Industria de la Construcción-Mampostería-Mortero para Uso Estructural-Especificaciones y Métodos de Ensayo*. Diario Oficial de la Federación.
- NMX-C-504-ONNCCE-2015. (2015). *Industria de la construcción – Determinación de la absorción capilar en concreto hidráulico - Método de ensayo*. Diario Oficial de la Federación.
- NMX-C-514-ONNCCE-2019. (2019). *Industria de la Construcción-Resistividad Eléctrica del Concreto Hidráulico-Especificaciones y Métodos de Ensayo*. Diario Oficial de la Federación.
- NMX-C-529-ONNCCE-2017. (2018). *Industria de la Construcción-Mampostería-Mortero para Uso No Estructural-Especificaciones y Métodos de Ensayo*. Diario Oficial de la Federación.
- Núñez, J. A. (2013). *Comportamiento físico - mecánico de morteros de cemento con sustitución de ceniza y material orgánico en diferentes porcentajes* [Tesis de pregrado, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo]. Repositorio de la universidad http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/7347
- Red Iberoamericana de la Durabilidad de la Armadura. (1998). *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*.
- Ruiz, R. (2015). *Comportamiento físico-mecánico de morteros de CP con substituciones parciales minerales, orgánicas, de fibras y residuos industriales a edades de 1000 días*

- [Tesis de pregrado, Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo]. Repositorio de la universidad http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/7516
- Sabbrojjaman, M., Liu, Y. y Tafsirojjaman, T. (2024). A comparative review on the utilisation of recycled waste glass, ceramic and rubber as fine aggregate on high performance concrete: Mechanical and durability properties. *Developments in the Built Environment*, 17, 100371. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100371>
- Sabrin, R., Shahjalal, M., Eema Bachu, H. A., Lutful Habib, M. M., Jerin, T. y Billah, A. M. (2024). Recycling of different industrial wastes as supplement of cement for sustainable production of mortar. *Journal of Building Engineering*, 86, 108765. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108765>
- Santamaría-Vicario, I., Rodríguez, A., Gutiérrez-González, S. y Calderón, V. (2015). Design of masonry mortars fabricated concurrently with different steel slag aggregates. *Construction and Building Materials*, 95, 197-206. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.164>
- Scrivener, K. (2003). Calcium aluminate cements. En Newman, J. y Choo, B.S. (Ed), *Advanced concrete technology* (pp. 81-82.). ELSEVIER.
- Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial Urbano [SEDATU]. (2021). *Autoproducción de vivienda adecuada en México*. Gobierno de México.
- Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial Urbano [SEDATU]. (2024). *Autoproducción*. Gobierno de México. <https://sniiv.sedatu.gob.mx/Autoproduccion/Introduccion>
- Solís-Carcaño, R.G. y Alcocer-Fraga, M.A., (2019). Durabilidad del concreto con agregados de alta absorción. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 20(4), 1-13. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n4.039>
- Song, Q., Zou, Y., Bao, J. y Zhang, P. (2024). Disposal of solid waste as building materials: A study on the mechanical and durability performance of concrete composed of gold tailings. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 2111–2124. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.03.191>
- Sutrisno, W., Wulandari, K. D., Abidin, M. Z. y Rizal, M. N. (2024). Properties of concrete mortar incorporating recycle pulverized sandblasting waste as additives. *Heliyon*, 10(4), e25623. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25623>
- Ternium. (2024). Escoria de alto horno. <https://ar.ternium.com/es/productos/coproductos/escoria-de-alto-horno>
- Vidaud, E. J. y Vidaud, I. N. (2016). Ultrasonido: aplicación para la determinación del módulo de elasticidad dinámico. *Construcción y Tecnología del Concreto*, 6(10), 32-35. <https://es.scribd.com/document/411730079/Ultrasonido>
- Younis, M. O., Amin, M. y Tahwia, A. M. (2022). Durability and mechanical characteristics of sustainable self-curing concrete utilizing crushed ceramic and brick wastes. *Case Studies in Construction Materials*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01251>