



Influencia de la arena en la resistencia mecánica del mortero empleando diferentes marcas de cemento

Muciño-Vélez, Alberto; Guillén Guillén, César Armando; Tahuiton-Mora, Antonio; Orozco-Mendoza, Eligio
Influencia de la arena en la resistencia mecánica del mortero empleando diferentes marcas de cemento
CIENCIA *ergo-sum*, vol. 29, núm. 1, marzo-junio 2022 | e153
Espacio del Divulgador
Universidad Autónoma del Estado de México, México

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.



Muciño-Vélez, A., Guillén Guillén, C. A., Tahuiton-Mora, A. y Orozco-Mendoza, E. (2022). Influencia de la arena en la resistencia mecánica del mortero empleando diferentes marcas de cemento. *CIENCIA ergo-sum*, 29(1). <https://doi.org/10.30878/ces.v29n1a9>

Influencia de la arena en la resistencia mecánica del mortero empleando diferentes marcas de cemento

Influence of the sand on the mechanical properties of mortars made with different brands of cement

Alberto Mucino-Vélez

Universidad Nacional Autónoma de México, México

arq_mucino@hotmail.com

 <http://orcid.org/0000-0002-6386-0249>

Recepción: 7 de octubre de 2020

Aprobación: 6 de mayo de 2021

César Armando Guillén Guillén

Universidad Nacional Autónoma de México, México


guillendos@gmail.com

 <http://orcid.org/0000-0002-2596-6122>

Antonio Tahuiton-Mora

Universidad Nacional Autónoma de México, México

antoniotahtuiton@gmail.com

 <http://orcid.org/0000-0003-0475-7097>

Eligio Orozco-Mendoza

Universidad Nacional Autónoma de México, México

eligio@fisica.unam.mx

 <http://orcid.org/0000-0003-2165-6335>

RESUMEN

Se evalúa el comportamiento mecánico de pastas de cemento empleando Cemento Portland Tipo II 30R de cinco marcas con el objetivo de identificar la relación óptima de los cementos con diferentes tipos de arena para elaborar morteros. Se conformaron cinco series de pastas y morteros con cada marca de cemento variando el tipo de arena por serie. La resistencia de las pastas de cemento es diferente en cada marca. Una misma marca de cemento tendrá un comportamiento distinto en función de la arena que se utilice. La arena influye en la resistencia a compresión. Para mejorar el desempeño mecánico del mortero, se analizan los materiales componentes. Un diseño de mezcla específico optimiza el mortero en la construcción.

PALABRAS CLAVE: granulometría, pruebas mecánicas, compresión, resistencia máxima

ABSTRACT

The mechanical behavior of cement pastes was evaluated using Portland Cement Type II 30R from five brands, to identify the optimal relationship of the cements with different types of sand to make mortars. Five series of pastes and mortars were made with each brand of cement, varying the type of sand per series in the mortars. The resistance of cement pastes is different for each brand. The same brand of cement will have a different behavior depending on the sand used. Sand influences compressive strength. To improve the mechanical performance of the mortar, the component materials are analyzed. A specific mix design optimizes the mortar in construction.

KEYWORDS: granulometry, mechanical tests, compression, maximum resistance.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el mortero es el material más usado en el sector de la construcción, en parte, gracias a los agregados que aportan a este recurso una relación costo-eficiencia, entre otras propiedades que lo hacen accesible y de fácil

aplicación (Alexander y Mindess, 2005; Neville y Brooks, 2010). Los morteros transmiten esfuerzos y tienen diferentes usos en función de las características de la arena empleada (Haach *et al.*, 2011; Amenta *et al.*, 2017; Apostolopoulou *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2020). Por ello el consumo de cemento en México es significativo y existen diversas marcas disponibles en las diferentes regiones del país para su comercialización (Vásquez y Corrales, 2017). Sin embargo, ante los retos actuales, existe una búsqueda de mejorar el uso del cemento y morteros por el impacto ambiental que provocan, resultado de la producción de cemento y extracción de recursos para su aplicación (Gupta y Vyas, 2018; Kabeer y Vyas, 2018; Kockal, 2016)

En este sentido, se cuestiona si las diferentes marcas de cemento mediante la evaluación de las pastas ofrecen las mismas características mecánicas que sus competidoras, pues se considera que son diferentes los bancos de materiales de donde extraen recursos. Al respecto, estudios sobre el comportamiento de las pastas de cemento durante el proceso de hidratación (Giraldo y Tobón, 2006) han demostrado que la hidratación de los cementos ocurre de manera distinta en función de los minerales que lo componen (Monteiro, 1985; Zang y Gjorv, 1990; Zhang y Chen, 1998; Tasong *et al.*, 1998b; Tasong *et al.*, 1999; Ke *et al.*, 2010). Así también, investigaciones en arenas, que evalúan la interacción con cemento en mezclas de mortero (Gamboa, 2019), identificaron que la resistencia de las mezclas se modifica en función de la arena utilizada: el cemento como constante y la arena como variable dependiente (Guzmán *et al.*, 2017; Mahdinia *et al.*, 2019).

No obstante, la norma NMX-C-414-ONNCCE-2014, que clasifica a los cementos por su aplicación, no establece diferencias por marca; por tanto, no determina variaciones en las resistencias de las mezclas sin importar la marca del producto, siempre que se utilice la misma clasificación (ONNCCE, 2014).

La optimización del uso de los morteros que involucran diferentes arenas y marcas de cemento de uso común en la zona centro del país no ha sido ampliamente estudiada en los documentos consultados, aunque el correcto análisis de la arena y cemento para mejorar la aplicación del mortero se relaciona de forma directa con los ahorros en los costos de construcción, lo que también implica una reducción del daño al medioambiente y la optimización de recursos.

Por ende, el objetivo del artículo es determinar si las diferentes marcas de cemento con misma clasificación tienen igual comportamiento mecánico a los 28 días. Para conseguirlo, se contemplan diferentes arenas comercializadas en la Ciudad de México y el Estado de México para fabricar pastas de cemento y morteros que mejoren la práctica constructiva por su adecuada relación con un tipo específico de arena de la región.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

Se emplearon cinco diferentes marcas de Cemento Portland Tipo II 30R del centro del país por ser las de mayor consumo en la región. Se seleccionaron tres tipos de arena: arena caliza, procedente de la trituración de piedra caliza, arena de río y arena azul, comercializada en el Estado de México. Para las pastas de cemento y morteros en cumplimiento de la norma mexicana NMX-C-122-ONNCCE-2004 (ONNCCE, 2014), se empleó agua desionizada.

Los bultos de cementos usados se adquirieron directamente de las diversas comercializadoras al menudeo con la garantía de que no mostraran humedad o alteraciones, además de verificar que la fecha de manufactura no superara los 30 días a la fecha de la experimentación. Después de extraer el material en las pastas de cemento, se empleó el resto en plástico y se almacenaron sobre una tarima para evitar que absorbieran la humedad del ambiente.

Las arenas (arena de río y arena azul), sacadas de los agregados finos con los que cuenta el Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales (LMSE) de la Facultad de Arquitectura de la UNAM, estaban almacenadas en contenedores tapados de 200 l para evitar que el material se erosione o tenga ganancia o pérdida de humedad, además de garantizar que no estuvieran contaminadas con material orgánico o sustancias que influyeran en los resultados.

Para la elaboración de las probetas se utilizaron moldes metálicos cúbicos de 5 cm, como se establece en la norma ASTM-C-109. La dosificación de los materiales fue por peso, el cual se midió en una báscula electrónica con una sensibilidad de 0.01 g. Las probetas se midieron con un vernier marca Mitutoyo con una exactitud de 0.01 mm.

Para determinar la curva granulométrica de las arenas se manejó una tamizadora Retsch modelo AS 200 Basic y un juego de tamices de las mallas 3/8", #4, #8, #16, #30, #50 y #100 como se establecen en la norma ASTM-C-33.

Las pruebas mecánicas de las pastas de cemento y mezclas de mortero se llevaron a cabo en una máquina de pruebas universales marca INSTRON modelo 400RD-E1-H2 con capacidad de 200 t, la cual cuenta con un *software* que ejecuta los cálculos de la carga aplicada entre el área de contacto y da el valor del esfuerzo en MPa automáticamente.

Las pastas de cemento se realizaron pesando el cemento y el agua, con una relación agua-cemento de 0.485, como lo establece la norma ASTM C-019 (ASTM, 2011), y se mezclaron hasta lograr una consistencia uniforme. Después, se llenaron los moldes previamente recubiertos con desmoldante, que se fueron varillando para eliminar el aire atrapado y enraizar la superficie. Se construyeron cinco probetas por cada marca de cemento para obtener un total de 25 muestras. Las probetas se desmoldaron al tercer día y se dejaron secar a temperatura ambiente sin ningún proceso de curado. A los 28 días se ensayaron mecánicamente en la máquina de pruebas universales marca INSTRON para determinar su resistencia a la compresión. Por tratarse de probetas cúbicas no fue necesario un proceso de cabeceo para garantizar la horizontalidad de sus caras.

Los morteros se hicieron con la dosificación establecida en la norma ASTM C-109, con una relación agua-cemento de 0.485 y una relación cemento-arena de 2.75, que fue por peso al igual que en las pastas de cemento. (ASTM, 2011). Se mezclaron manualmente y se varillaron los moldes para que al llenar se eliminara el aire atrapado. Se elaboraron cinco probetas cúbicas de 5 cm por cada tipo de arena y por cada marca de cemento; por cada serie fueron 15 probetas por marca de cemento y un total de 75 muestras de mortero. Se desmoldaron al tercer día y se dejaron secar a temperatura ambiente sin ningún proceso de curado. Posteriormente, se ensayaron para determinar su resistencia a la compresión a los 28 días. Por la geometría de las probetas se garantizó una superficie uniforme en el área de contacto por lo que no fue necesario un cabeceo con azufre o morteros.

La norma NMX-C-464-ONNCCE-2010 (ONNCCE, 2010) establece que la resistencia mínima que deberán de cumplir los morteros a los 28 días se encuentra en el rango de los 4 MPa en morteros tipo III y a los 12.5 MPa en un mortero tipo I para que pueda ser considerado en aplicaciones estructurales.

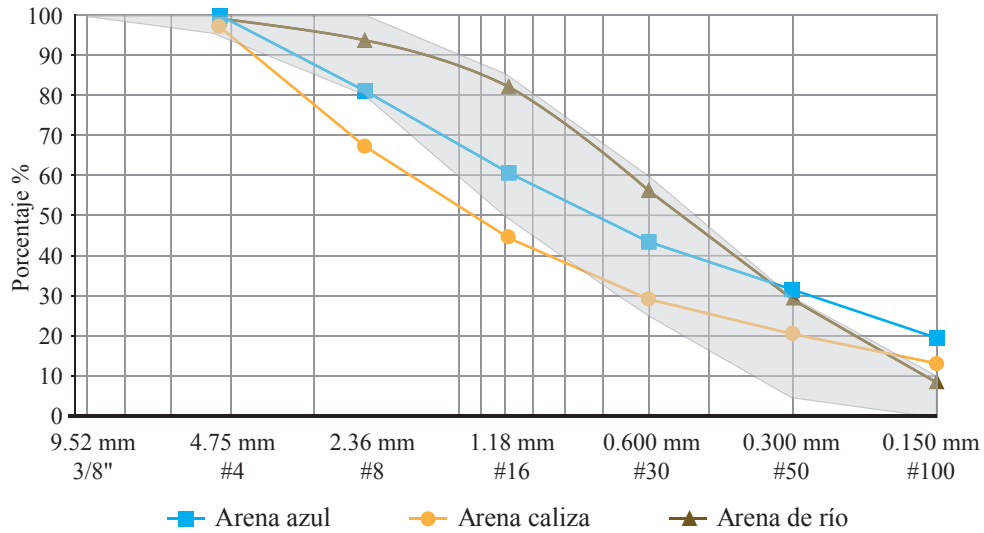
2. RESULTADOS Y DISCUSIONES

La granulometría de las arenas utilizadas en la experimentación se muestra en la gráfica 1, donde se puede apreciar que la arena caliza y la arena azul se encuentran fuera de los rangos establecidos en la norma ASTM-C-33 (ASTM, 2018) y únicamente la arena de río cumple con dichos parámetros.

Según la gráfica 2 las resistencias a la compresión a los 28 días de las pastas de cemento varían en función de la marca utilizada con una diferencia de 9.88 MPa entre la resistencia más alta y la más baja; lo anterior representa un 29.24% del valor más alto alcanzado. La marca 1 reportó una resistencia de 32.95 MPa, la marca 2 de 24.244 MPa, la marca 3 de 30.918 MPa, la marca 4 de 33.78 MPa y la marca 5 de 23.904 MPa.

Estos resultados denotan que existen variaciones en las resistencias entre las diversas marcas de cemento, donde algunas presentan valores por debajo de los 30 MPa, resistencia que oferta en la clasificación del producto al consumir un CPO Tipo II 30R RS.

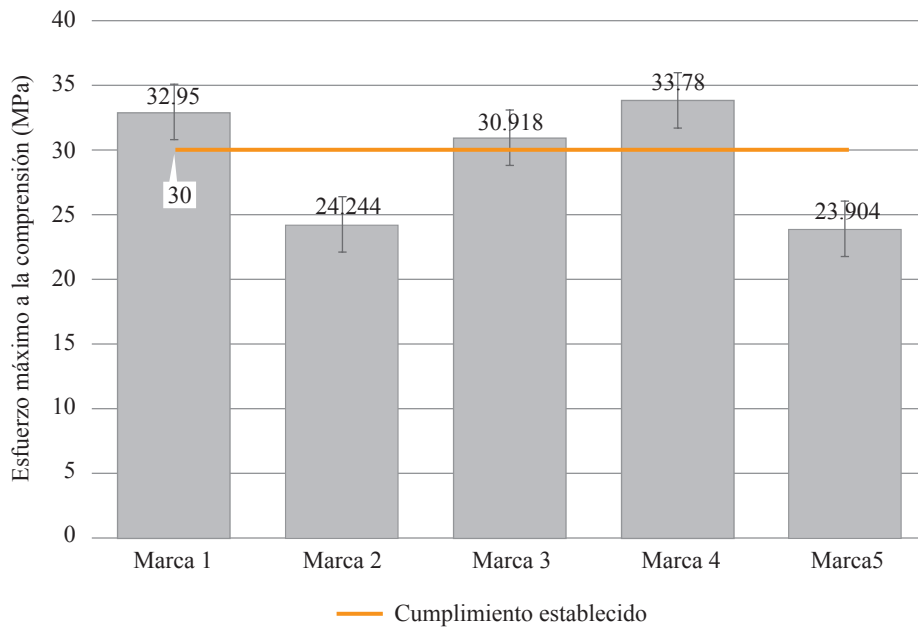
Las resistencias a la compresión obtenidas en los morteros tienen variación entre las diferentes marcas como se pudo apreciar en las pastas de cemento (gráfica 2). Sin embargo, entre una misma marca de cemento, donde cada una tiene mejores prestaciones mecánicas en relación con una arena en específico, se reportan diferentes resistencias (gráfica 3), lo cual refuerza la argumentación que propone dejar de pensar en los agregados pétreos, en este caso las arenas, como simple material de relleno.



GRÁFICA 1
Curva granulométrica de la arena caliza, arena de río y arena azul

Fuente: elaboración propia.

Nota: curva con los rangos máximos y mínimos establecidos en la norma ASTM-C-33. Límites de cumplimiento para el tamaño de partícula de las arenas utilizadas para elaboración de morteros.



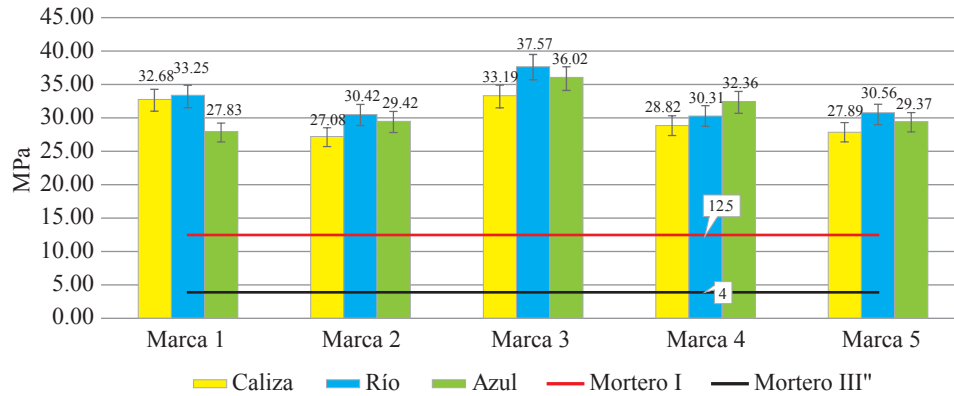
GRÁFICA 2

Resistencia a la compresión a los 28 días de pasta de cemento con cinco marcas

Fuente: elaboración propia

Nota: análisis comparativo de los resultados de esfuerzo máximo a la compresión de las probetas de pastas de cemento de cinco marcas.

La gráfica 3 indica que una misma marca de cemento tendrá una resistencia mecánica distinta de acuerdo con el tipo de arena que se utilice. Estas variaciones pueden significar un mayor o menor consumo de cemento para obtener una resistencia media. La marca 1 tiene una diferencia de 19.47% entre el valor más alto y bajo, la marca 2 del 12.33%, la marca 3 del 13.19%, la marca 4 del 12.28% y la marca 5 del 9.57%.



GRÁFICA 3

Resistencia de los morteros

Fuente: elaboración propia

Nota: de acuerdo con la norma NMX-C-464-ONNCCE-2010 (ONNCCE, 2010) y al comparar con el desempeño de mortero tipo I y tipo II.

De las cinco marcas de cemento (tabla 1), la marca 1 fue la que presentó una mayor variación entre la resistencia máxima y mínima en las mezclas de mortero con un 19.47%, mientras que la marca 5 fue la de menor diferencia con una variación del 9.57%. En cuatro de los cinco casos donde se utilizó la arena de río se alcanzaron los valores más altos; únicamente el cemento 4 fue el de mejor desempeño mecánico con la arena azul. La arena caliza fue la que exhibió los valores más bajos en cuatro de las cinco marcas; en este caso la marca 1 en conjunto con la arena azul presentó el valor más bajo.

El valor de resistencia de los morteros es afectado por la arena utilizada y por la marca de cemento seleccionado. Es de discutirse el hecho de que en una misma región puedan obtenerse diferentes datos por lo que para lograr un diseño de mezcla óptimo se debe considerar el análisis de los agregados en relación con la marca de cemento para sacar resultados conforme a lo que establece la norma.

TABLA 1

Desempeño de los morteros por tipo de cemento y arena

Cemento	Marca 1		Marca 2		Marca 3		Marca 4		Marca 5	
Desempeño	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor
Arena	Río	Azul	Río	Caliza	Río	Caliza	Azul	Caliza	Río	Caliza
F'c* en MPa	33.25	27.83	30.42	27.08	37.57	33.19	32.36	28.82	30.56	27.89

Fuente: elaboración propia.

Nota: *F'c es el esfuerzo máximo a la compresión. Esta tabla permite identificar la relación cemento-arena que logra mayor y menor desempeño.

El sílice interviene en la fabricación del cemento y se encuentra en las arenas en forma de cuarzo, calcedonia o silicatos. Aunado a esto, el contenido de sílice, calcio o cuarzo determina la composición de las arenas, que además están constituidas por diversos minerales con origen en las rocas ígneas, compuestas de sílice hasta en un 60 % y en menor porcentaje Al_2O_3 , CaO , Na_2O , K_2N , FeO y/o MgO . También se denominan líticas a las arenas provenientes de fragmentos rocosos con hasta un 40% de cuarzo complementando con silicatos o a las arenas constituidas principalmente por calcio.

La forma de las arenas naturales va desde irregular hasta redondeada dependiendo del arrastre: mientras más cerca de su origen se encuentre el banco de extracción la arena conservará composición y forma irregular y a mayor distancia sufrirá redondeo y modificará su composición petrográfico-mineralógica, pero conservará los minerales más resistentes.

Otro valor agregado de un diseño de mezcla específico es obtener mejor rendimiento de los materiales, lo cual se relaciona con la disminución de contaminación por CO₂ por emplear menor cantidad de cemento. Conocer la interacción de las arenas con las diferentes marcas de cemento permite lograr una adecuada selección de bancos de materiales. Además, reconocer el agregado fino del que se dispone y relacionarlo para saber con qué marca de cemento se adquiere mejor resistencia mecánica mejoraría el desempeño mecánico del mortero.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para determinar las características físicas de un mortero que garantice funciones estructurales es posible utilizar las cinco marcas evaluadas, así como usar cualquiera de las tres arenas. No obstante, la diferencia entre lo establecido por la ONNCCE (2010) como mínimo en su recomendación estructural para morteros y el resultado más bajo de los ensayos a compresión indica un sobredimensionamiento de la materia prima y también que es posible ajustar el diseño de mezcla para optimizar recursos.

Se discute que mediante el uso de pruebas normalizadas en morteros y pastas de cemento es posible incrementar resistencias a compresión, pero en la realidad el uso del cemento en mezclas de mortero usualmente no garantiza la adecuada relación agua-cemento. Por tal motivo, ajustando una adecuada relación de agua a la mezcla, es posible cambiar el rendimiento de las estructuras donde se emplee el mortero cuando se conocen las características de los agregados y se realizan los ensayos estipulados.

La elección de la marca de cemento para elaborar morteros estructurales establecidos por la normatividad cuando se lleva a cabo bajo un diseño de mezcla apropiado no incide en que se alcancen los valores de cumplimiento establecidos, pero sí es importante observar la diferencia de rendimiento que existe entre las cinco marcas evaluadas en igualdad de circunstancias, lo cual implica que los cementos no contienen los mismos componentes y que en la búsqueda de optimizar el material se ha diversificado su comportamiento.

Para entender y mejorar las características de los morteros hay que tomar en cuenta el tipo, cantidad, tamaño, forma y distribución de sus componentes (Elsharief *et al.*, 2003) y distinguir entre la microestructura de las pastas de cemento y de las mezclas de mortero (Tasong *et al.*, 1998; Scrivener, 2004; Diamond, 2004). Hay que reconocer que existen las reacciones químicas en las mezclas influenciadas por las arenas (Monteiro, 1985; Zang y Gjorv, 1990; Zhang y Chen, 1998; Tasong *et al.*, 1998a, Tasong *et al.*, 1999; Ke *et al.*, 2010), aunado a que las arenas condicionan la durabilidad y la resistencia de la mezcla (Mehta y Monteiro, 2006).

La resistencia de las cinco marcas de cemento se evaluó a los 28 días cuando se considera que es significativa, pero la interacción de la arena se da en estado fresco y endurecido (Scrivener y Nonat, 2011; Odler, 1998; Juilland *et al.*, 2010).

La relación de los áridos se valora por su granulometría que influye en la resistencia final (Mehta y Monteiro, 2006). Las arenas según su forma de extracción y transformación revelan propiedades físicas y químicas diferentes que afectan en la resistencia de la mezcla (Tasong, 1998b, 1999), por lo que al cambiar el agregado también se modificará la resistencia final como pudo comprobarse en los resultados obtenidos en la relación de las arenas empleadas con las diferentes marcas de cemento para la elaboración de los morteros.

Las tres arenas estudiadas tienen diferente porcentaje en los tamaños de partícula: la arena de río se mantuvo dentro de lo establecido por la ASTM-C-33 y fue la que demostró mejor relación con los cementos en los resultados a compresión. La arena azul presentó un porcentaje más elevado de finos que la arena de río y, de acuerdo con los resultados, se demostró un menor rendimiento. La arena caliza desplegó el comportamiento más bajo en las pruebas mecánicas y es la que terminó con mayor porcentaje de partículas fuera del rango de cumplimiento de la malla núm. 4 a la malla núm. 16. Lo anterior significa que un agregado fino que cumple con la curva granulométrica y que sea usado en mezclas de mortero con adecuada relación agua-cemento compondrá una estructura con propiedades mecánicas adecuadas. Se define que la arena no es inerte.

Para concluir, el aprovechamiento óptimo de los morteros parte del análisis de sus agregados y es crucial para mejorar su rendimiento, determinar contra qué esfuerzos se requiere que el sistema estructural trabaje o qué seguridad se pretende lograr para saber qué diseño de mezcla se emplearía, así como aplicar los factores de adecuación en la interacción y peso de los componentes. Si se manejan correctamente los pesos y tamaño de partícula del agregado fino es posible incrementar la resistencia e incluso modificar el tiempo de vida útil de los morteros y de este modo conseguir diseños apropiados y reducir la incertidumbre del desempeño mecánico de los sistemas constructivos.

ANÁLISIS PROSPECTIVO

Las características del tamaño de partícula de las arenas tienen una influencia en el rendimiento mecánico de los morteros. Por lo tanto, se requiere obtener las dimensiones de grano, según los rangos establecidos, para determinar el diseño de mezcla. En este sentido, es necesario analizar bancos de materiales por región, donde se extraen agregados finos, y también las dimensiones correspondientes, así como verificar el cumplimiento de la normatividad que garantice la seguridad de los sistemas constructivos. Se debe considerar por banco de materiales la relación con las diferentes marcas de cemento empleadas en cada región.

La diferencia de rendimiento mecánico por tipo de marca de cemento hace necesario conocer la interacción de las marcas de cemento con el tipo de agregado. Determinando el uso que se le dará al mortero, así como saber las características de los agregados, harían posible un diseño de mezcla específico y de esta manera optimizar los recursos para renovar el rendimiento del mortero en la construcción.

AGRADECIMIENTOS

Al equipo de colaboradores del Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales (LMSE) de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional Autónoma de México sede centro del Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sustentables (LNVCS)-Conacyt. Asimismo, se agradece a los árbitros de la revista por sus aportaciones.

REFERENCIAS

- Amenta, M., Karatasios, I., Maravelaki-Kalaitzaki, P., & Kilikoglou, V. (2017). The role of aggregate characteristics on the performance optimization of high hydraulicity restoration mortars. *Construction and Building Materials*, 153, 527-534, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.134>
- Alexander, M. G., & Mindess, S. (2005). *Aggregates in concrete*. New York: Taylor & Francis.
- Apostolopoulou, M., Armaghani, D. J., Bakolas, S., Douvika, M. G., Moropoulou, A., Asteris, P. G. (2019). Compressive strength of natural hydraulic lime mortars using soft computing techniques. *Procedia Structural Integrity*, 17, 914-923. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.122>
- ASTM (2011). *ASTM C-019 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar*. ASTM International, West Conshohocken. Retrieved from www.astm.org
- ASTM (2018). *ASTM C33 / C33M-18, Standard Specification for Concrete Aggregates*, ASTM International. West Conshohocken. Retrieved from www.astm.org
- Diamond, S. (2004). The microstructure of cement paste and concrete-a visual primer. *Cement and concrete composites*, 26, 919-933. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.028>

- Elsharief, A., Cohen, M., & Olek, M. (2003). Influence of aggregate size, water cement ratio and age on the microstructure of the interfacial transition zone. *Cement and Concrete Research*, 33, 1837-1845. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00205-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00205-9)
- Gamboa, L. M. (2019). ¿Cómo elegir un buen material pétreo para la elaboración de concretos hidráulicos hechos en obra? *RUA*, 11(21), 58-66. Disponible en <https://rua.uv.mx/index.php/rua/article/view/66/51>
- Giraldo, M. A. y Tobón, J. I. (2006). Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación. *Dyna*, 73(148), 69-81. Disponible en <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=496/49614807>
- Gupta, L. K., & Vyas, A. K., (2018). Impact on mechanical properties of cement sand mortar containing waste granite powder. *Construction and Building Materials*, 191, 155-164. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.203>
- Guzmán, B. B., Cuevas, S. A., Barragán, T. R. & Sánchez, C. M. (2017). Incidencia de los componentes en la resistencia del mortero utilizado en Chilpancingo Guerrero. *Innova Ingeniería. Publicaciones Técnicas de Investigación*, 1(2). Disponible en <https://innovaingenieria.uagro.mx/innova/index.php/innova/article/view/8/8>
- Haach, V. G., Vasconcelos, G., & Lourenço, P. B. (2011). Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars. *Construction and Building Materials*, 25, 2980-2987. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.011>
- Juilland, P., Gallucci, E., Flatt, R., & Scrivener, K. (2010). Dissolution theory applied to the induction period in alite hydration. *Cement and Concrete Research*, 40, 831-844. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.01.012>
- Kabeer, K. I. S. A., & Vyas, A. K. (2018). Utilization of marble powder as fine aggregate in mortar mixes. *Construction and Building Materials*, 165, 321-332. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.061>
- Ke, Y., Ortola, S., Beaucour, A. L., & Dumontet, H. (2010). Identification of microstructural characteristics in lightweight aggregate concretes by micromechanical modelling including the interfacial transition zone (ITZ). *Cement and Concrete Research*, 40, 1590-1600. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.07.001>
- Kockal, N. U. (2016). Investigation about the effect of different fine aggregates on physical, mechanical and thermal properties of mortars. *Construction and Building Materials*, 124, 816-825. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.008>.
- Mahdinia, S., Eskandari-Naddaf, H., & Shadnia, R. (2019). Effect of cement strength class on the prediction of compressive strength of cement mortar using GEP method. *Construction and Building Materials*, 198, 27-4. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.265>.
- Mehta, K., & Monteiro, P. (2006). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (3rd ed.) New York: McGraw-Hill.
- Monteiro, P. (1985). *Microstructure of concrete and its influence on the mechanical properties*. University of California Berkeley: California.
- Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2010). *Concrete technology* (2nd ed.). Essex, Prentice Hall.
- Odler, I., (1998). Setting and hardening of portland cement. In P. C. Hewlett, *Lea's Chemistry of Cement and Concrete* (4th ed.) Oxford: Butterworth-Heinemann.
- ONNCCE (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C.). (2010). *NMX-C-464-ONNCCE-2010 Industria de la Construcción-Mampostería-Determinación de la resistencia a compresión diagonal y módulo de cortante de muretes, así como determinación de la resistencia a compresión y módulo de elasticidad de pilas de mampostería de arcilla o concreto-Método de ensayo*. México: ONNCCE.

- ONNCCE (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C.). (2014). *NMX-C-414-ONNCCE-2014 Industria de la Construcción-Cementantes Hidráulicos- Especificaciones y Método de ensayo*. México: ONNCCE.
- ONNCCE (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C.). (2004). *NMX-C-122-ONNCCE-2004 Industria de la Construcción-Agua para concreto- Especificaciones*. México: ONNCCE.
- Santos, A. R., Veiga, M. R., Santos-Silva, A., & De Brito, J. (2020). Microstructure as a critical factor of cement mortars' behaviour: The effect of aggregates' properties. *Cement and Concrete Composites*, *111*, 103628. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103628>
- Scrivener, K., & Nonat, A., (2011). Hydration of cementitious materials, present and future. *Cement and Concrete Research*, *41*, 651-665. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.026>
- Scrivener, K. (2004). The Interfacial Transition Zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete. *Interface Science*, *12*(4), 411-421. <https://doi.org/10.1023/B:INTS.0000042339.92990.4c>
- Tasong, W., Cripps, C., & Lynsdale, C. (1998a). Aggregate-cement chemical interaction. *Cement and Concrete Research*, *28*(7), 1037-1048. Retrieved from https://www.academia.edu/25147926/Aggregate_cement_chemical_interactions
- Tasong, W. A., Lynsdale, L., & Cripps, J. (1998b). Aggregate-cement paste interface. II: influence of aggregate physical properties. *Cement and Concrete Research*, *28*(10), 1453-1465. Retrieved from https://www.academia.edu/25147923/Aggregate_cement_paste_interface_ii_influence_of_aggregate_physical_properties
- Tasong, W. A., Lynsdale, L., & Cripps, J. (1999). Aggregate-cement paste interface. Part I. Influence of aggregate geochemistry. *Cement and Concrete Research*, *29*, 1019-1025. Retrieved from https://www.academia.edu/25147935/Aggregate_cement_paste_interface_Part_I_Influence_of_aggregate_geochemistry
- Vásquez, B. y Corrales, S. (2017). Industria del cemento en México: Análisis de sus determinantes. *Problemas del Desarrollo*, *48*(188), 113-138. <https://doi.org/10.1016/j.rpd.2017.01.006>
- Zang, M. H., & Gjorv, O. E. (1990). Microstructure of the interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste. *Cement and Concrete Research*, *20*(4), 610-618. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(90\)90103-5](https://doi.org/10.1016/0008-8846(90)90103-5)
- Zhang, Y., & Chen, W. F. (1998). Strength and durability of concrete: Effects of cement paste-aggregate interfaces. Purdue University: West Lafayette. Retrieved from <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1825&context=jtrp>

CC BY-NC-ND