

Influencia de la proporción de arena en las propiedades físicas y mecánicas de morteros para la edificación

M. Navarrete-Seras^{1*} , W. Martinez-Molina¹ , H. L. Chavez-Garcia¹ ,
A. Sanchez-Calvillo^{1,2} , M. Arreola-Sanchez^{1,4} , J. A. Borrego-Perez^{1,4} ,
N. A. Perez-Castellanos^{4,5} , R. P. Ruiz-Torres⁶ , A. M. Duran-Ramos¹,
E. M. Alonso-Guzman^{1,3*} 

*Autor de Contacto: mnavarrete@umich.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.684>

Recibido: 01/04/2023 | Correcciones recibidas: 16/04/2023 | Aceptado: 19/04/2023 | Publicado: 01/05/2023

RESUMEN

Se analizó la influencia de la proporción de arena en morteros Tipo II según norma N-CMT-2-01-004/02 empleando tres tipos de áridos de la región de Morelia, Michoacán determinando su influencia en sus propiedades físico-mecánicas, contemplando el uso de diferentes materiales cementantes (MC): el cemento Portland más cal (B1), cemento Portland más cemento de albañilería (B2). Se elaboraron mezclas para B1 y B2 con relaciones en volumen arena/MC, desde 2.25 hasta 4, determinando la fluidez, resistencia a compresión uniaxial (UCS) y resistividad eléctrica húmeda (WER). Se estudió la relación entre la fluidez y la cantidad de agua/MC, concluyendo que el tipo de árido y proporciones modifican la fluidez y demanda de agua en estado fresco impactando en UCS y WER.

Palabras clave: morteros de construcción; resistividad eléctrica; agregados finos; resistencia mecánica, granulometría.

Citar como: Navarrete-Seras, M., Martinez-Molina, W., Chavez-Garcia, H. L., Sanchez-Calvillo, A., Arreola-Sanchez, M., Borrego-Perez, J. A., Perez-Castellanos, N. A., Ruiz-Torres, R. P., Duran-Ramos, A. M., Alonso-Guzman, E. M. (2023), “Influencia de la proporción de arena en las propiedades físicas y mecánicas de morteros para la edificación”, Revista ALCONPAT, 13 (2), pp. 158 – 174, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.684>

¹ Materials Department, Faculty of Civil Engineering, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 58040.

² Sustainable Energy, Machinery and Buildings (SEMB), Universitat de Lleida, Lleida, Spain, 25002.

³ PIDA, Faculty of Architecture, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México 58040.

⁴ Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT.

⁵ Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM, Coyoacán, CDMX, México, 04510.

⁶ Faculty of Architecture, UNACH, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, 29050.

Contribución de cada autor

En este trabajo la experimentación fue llevada a cabo por M. Navarrete-Seras (50%), A.M. Duran-Ramos (50%); la actividad de búsqueda bibliográfica M. Navarrete-Seras (25%), A.M. Duran-Ramos (25%), A. Sanchez-Calvillo (25%) y E.M. Alonso-Guzman (25%); la actividad de extracción de información por W. Martinez-Molina (20%), J.A. Borrego-Perez (20%), H.L. Chavez Garcia (20%), E.M. Alonso-Guzman (20%) y M. Arreola-Sanchez (20%); análisis y discusión de resultados por M. Navarrete (20%), W. Martinez-Molina (20%), M. Arreola-Sanchez (20%), J. A. Borrego-Perez (20%) y H.L. Chavez García (20%); la redacción del documento por A. Sanchez-Calvillo (20%), N.A. Perez-Castellanos (20%), R.P. Ruiz-Torres (20%), W. Martinez-Molina (20%) y M. Arreola-Sanchez (20%); la revisión del texto por A.M. Duran-Ramos (20%), N.A. Perez-Castellanos (20%), R.P. Ruiz-Torres (20%), M. Navarrete-Seras (20%) y E. M. Alonso-Guzman (20%); el diseño de figuras y la adaptación al formato por W. Martinez-Molina (25%), H. L. Chavez-Garcia (25%), M. Arreola-Sanchez (25%) y J.A. Borrego-Perez (25%); traducción al Inglés por A. Sanchez-Calvillo (60%), N.A. Perez-Castellanos (20%) y R. P. Ruiz-Torres (20%).

Influence of sand proportion in the physical and mechanical properties of construction and building mortars

ABSTRACT

The influence of sand proportion of in mortars Type II was studied according to the standard N-CMT-2-01-004/02. Three different types of fine aggregates from the region of Morelia, in Michoacan, were used to determine their influence in the physical and mechanical properties. Different cementitious materials (CM): Portland cement plus lime (B1), and Portland cement plus construction cement (B2) were considered and mixed. The mortar mixtures were designed for B1 and B2 with different volume ratios of aggregates/CM, from 2.25 to 4. The characterization determined the fluency, the uniaxial compressive strength (UCS) and the wet electrical resistivity (WER). Analyzing the fluency and the ratio water/CM it was concluded that the aggregate properties and their proportions modify the water demand in the fresh state of the mortar and consequently the UCS and WER.

Keywords: construction mortars; electrical resistivity; fine aggregates; mechanical resistance; sieve analysis.

Influência da proporção de areia nas propriedades físicas e mecânicas de argamassas para construção

RESUMO

As proporções de areia nas argamassas de tipo II foram analisadas de acordo com a norma N-CMT-2-01-004/02. Foram utilizados três tipos de agregados da região de Morelia, Michoacán para determinar a sua influência nas suas propriedades físico-mecânicas. Considerando a utilização de diferentes materiais cimentícios (CM): cimento Portland mais cimento de alvenaria (B2) e cimento Portland mais cal (B1). Foram preparadas misturas para B1 e B2 com relações areia/MC de 2,25 para 4. Foram determinadas a fluidez, resistência uniaxial à compressão (UCS) e resistividade elétrica úmida (WER). Estudando a relação entre a fluidez e a quantidade de água/MC, concluindo que o tipo de agregado e as proporções modificam a fluidez e a demanda de água no estado fresco com impacto no UCS e no WER.

Palavras-chave: argamassas de construção; resistividade elétrica; agregados finos; resistência mecânica, dimensão das partículas.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2023) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2024 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2023.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

Históricamente, los edificios residenciales y la vivienda han sido edificados con distintos materiales de construcción como rocas regulares e irregulares, ladrillos cerámicos, madera o bloques de tierra cruda entre otros muchos. Estos muros y pisos usualmente cuentan con morteros de unión tanto para las mamposterías o aplanados para recubrir estos sistemas (Álvarez Galindo et al., 1995). Los morteros son mezclas que incorporan conglomerantes inorgánicos, agregados, agua y otros elementos usados como aditivos. Los principales objetivos de estos sistemas son unir los elementos constructivos, llenar los espacios vacíos como agentes de relleno, y proteger las superficies y los distintos sistemas de los agentes externos (Sánchez Tizapa et al., 2017; Wu et al., 2021).

En la Antigua Roma, los contenedores donde se transportaban las mezclas de cal en pasta y arena solían ser llamados “mortarius”, y con el tiempo el término derivó hasta al actual “mortero” con el que se designa al elemento. Encontramos los primeros registros de la mención de los morteros en Vitrubio, que detalla el proceso de selección y producción a partir de la roca caliza para su uso en edificación (Navarro-Mendoza et al., 2023). Estos sistemas tradicionales fueron usados por siglos para la construcción de cimentaciones, muros de carga, pavimentos y revestimientos de todo tipo hasta la popularización del cemento Portland (Álvarez Galindo et al., 1995; Navarro-Mendoza et al., 2020).

Los morteros han tenido múltiples usos en la construcción a lo largo del tiempo; por ejemplo, en los edificios pueden ser utilizados por sus propiedades térmicas y acústicas, también para evitar la proliferación de fauna o flora nociva o problemática, o incluso para lograr ciertas propiedades estéticas. Respecto a su función adhesiva, los morteros requieren alcanzar resistencias mecánicas adecuadas para permitir que las mamposterías de elementos estructurales puedan soportar las cargas necesarias. Antes del surgimiento del cemento moderno de construcción, en México, los artesanos y constructores solían adicionar cal a la mezcla para incrementar los tiempos de colocación y aplicación de los morteros. La cal tenía la función de retener el agua para permitir la correcta hidratación y curado interno. Este tipo de mezclas, resultado de la experiencia en los trabajos, recibe el nombre de mortero terciado, debido a los tres elementos empleados: cemento, cal y agregados. Actualmente el cemento de albañilería ha desplazado de manera importante el uso de la cal más cemento Portland.

El mortero es un producto fácil de elaborar, ya que los elementos necesarios (agua, aglutinantes y arena) para hacer la mezcla son asequibles y la aplicación del sistema es simple. Sin embargo, los usuarios han subestimado la importancia de usar proporciones adecuadas de los componentes, y esta situación ha generado que aparezcan problemas como la disminución de la resistencia y la adherencia, deterioros estructurales, o la contracción que provoca la aparición de fisuras que reducen la vida útil de los morteros (Jacques et al., 2023; Li et al., 2023). En muchos casos, las propiedades físicas y mecánicas de los agregados de los bancos son desconocidas, siendo los precios más bajos los que determinan la selección del material.

La clase y las proporciones empleadas de los materiales que constituyen los morteros tienen influencia en las propiedades en estado fresco (Giordani & Masuero, 2019), y consecuentemente, el comportamiento en estado endurecido (Haach et al., 2011). Una de las características más deseadas durante el estado fresco es la trabajabilidad, que debe adecuarse a los requisitos de ejecución de los recubrimientos o aplanados para garantizar una buena adhesión a la superficie (Ribeiro & Oliveira Rey, 2019; Tena et al., 2017). Algunos elementos que afectan directamente las propiedades del mortero son las materias primas como las arenas y su calidad. Por este motivo, el análisis reológico es fundamental para determinar si los agregados cumplen con las normativas establecidas y si sus cualidades están afectando a la viscosidad y trabajabilidad de los morteros (Danish & Ozbakkaloglu, 2023; Li et al., 2022; Westerholm et al., 2008).

Normalmente, los agregados finos (FA, por sus siglas en inglés) representan alrededor del 35% del volumen total del mortero, siendo uno de los componentes más importantes en la mezcla. Por lo tanto, el empleo de distintos tipos de arena con geometrías irregulares y una ineficiente distribución granulométrica puede resultar en un deterioro de las propiedades de fluidez, reduciendo la densidad y aumentando el área superficial específica haciendo que la pasta reduzca a su vez su grosor (Hafid et al., 2016; Stolz & Masuero, 2018). La morfología de los agregados finos también juega un papel importante en las propiedades físicas del mortero debido al impacto directo en la reología (Durán Ramos, 2021; Ren et al., 2021).

Varios estudios han tratado de analizar la importancia de los FA y su sustitución parcial en las mezclas de mortero. Se ha reportado cómo el uso de agregados finos incrementó en un 30% la viscosidad plástica de los morteros (Hu, 2005); otras investigaciones han comparado la afectación en el desempeño de morteros de cemento Portland con la adición de geopolímeros con partículas residuales de vidrio (Gao et al., 2022); el efecto de la carbonatación también fue estudiado mediante la adición de diferentes materiales de residuo con propiedades cementantes y/o puzolánicas como sustitución del cemento Portland, determinando si éstos pueden limitar o mejorar la carbonatación de las mezclas al endurecer (Martínez-Molina et al., 2021).

Otros trabajos investigaron la idoneidad del plástico reciclado como sustitución del FA reportando una reducción del 10 al 20 % en la resistencia a compresión y a la tensión directa (Ullah et al., 2021). La influencia de la adición de fibras también ha sido analizada en las propiedades en estado fresco, la deformabilidad y el comportamiento mecánico (Brazão Farinha et al., 2021); además, los efectos de adiciones como humo de sílice, superplastificantes, y la relación agua/aglutinante también han sido estudiados (Senff et al., 2009). La sustitución parcial de la masa de cemento Portland por carbonato de cal en polvo (0, 9, 16, 23 y 30 %) también ha demostrado afectación en las propiedades reológicas, mecánicas y de durabilidad (Souza et al., 2020), así como la cáscara de huevo triturada (Beng Wei et al., 2021), o las puzolanas naturales (HAMMAT et al., 2021).

La problemática descrita en torno a la importancia de los agregados finos en los morteros, aunado a la ambigüedad descrita en la normatividad mexicana (NMX-C-486-ONNCCE-2014 y N-CMT-2-01-004/02) con relación a las proporciones de cementante y agua para la correcta trabajabilidad del mortero, dan paso a este trabajo de investigación. Se debe tomar en cuenta que esta investigación se realizó con bancos de agregados finos de una zona de México en particular (Morelia). La importancia de este trabajo radica en visualizar las diferencias que pueden existir en la trabajabilidad y el estado endurecido del mortero al utilizar diferentes bancos de agregados en una misma zona, además de la confiabilidad y calidad en el mortero actualmente usado como recubrimiento estructural.

La presente investigación se enfoca en el estudio de todo el rango de relaciones cementante/arena que permita la normatividad mencionada anteriormente, para determinar la cantidad máxima de arena que puede usarse para producir un mortero de uso estructural, además de estudiar tres tipos de arenas naturales, FA, con distintas dosificaciones de cemento hidráulico (cemento Portland), cemento de albañilería y cal, para analizar la influencia de la proporción de arena en las propiedades físico-mecánicas. Estas mezclas fueron caracterizadas con técnicas de análisis no destructivas y con ensayos mecánicos como la resistencia a compresión; para evaluar las mejores mezclas en función de los requerimientos de las normativas nacionales e internacionales. Todo esto, con la finalidad de incrementar el conocimiento técnico y científico sobre los morteros usados comúnmente en la edificación y construcción de infraestructura, para con ello lograr impactar positivamente en su calidad y durabilidad.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los morteros fueron diseñados tanto para ser aplicados en el interior como en el exterior de

edificios, particularmente para su uso en vivienda residencial autoconstruida. La norma N-CMT-2-01-004/02 para morteros de mampostería define tres clases: I, II y III, en función de los componentes y los valores mínimos de resistencia mecánica. Las mezclas se diseñaron para morteros de Tipo II, siendo combinaciones volumétricas de cemento hidráulico, cemento de albañilería y cal, con distintas cantidades de arena para determinar los mejores desempeños. La proporción de arena en ningún caso fue menor a 2.25 o superior a 4 veces la suma de los materiales cementantes en volumen, como lo indica la normativa antes comentada.

Para esta investigación, toda la experimentación se realizó en el laboratorio de materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”, de la Facultad de Ingeniería Civil, de la Universidad Michoacana, empezando por el control de calidad de todos los materiales en forma individual. Se utilizó cemento CPC 30R RS, según la NMX-C-414-2017-ONNCCE, que se clasifica como Tipo II según la norma ASTM C150-C150M-22 (ASTM International, 2022c). Por otro lado, la cal cumple con la norma ASTM E1266-20 (ASTM International, 2020b). Las arenas fueron muestreadas de bancos de la Región Morelia, de Michoacán, en México, y analizadas en el laboratorio, siempre como el promedio de tres ensayos. La caracterización física de las arenas se efectuó mediante lo indicado por los estándares internacionales de la American Society of Testing Materials (ASTM), y el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE) de México.

Una vez elaboradas las mezclas, se determinó la fluidez en estado fresco, y una vez endurecidas fueron ensayadas para obtener las propiedades mecánicas como la Resistencia a Compresión Uniaxial (UCS) considerando la resistencia mínima de diseño de 75 kgf/cm^2 requerida por la norma NMX-C-486-ONNCCE-2014 (ONNCCE, 2014); otras características fueron extraídas mediante el uso de Ensayos No-Destructivos (NDT), como la Resistividad Eléctrica Húmeda (WER) a 7 y 28 días de edad.

2.1 Diseño de las mezclas

Todos los especímenes del mortero Tipo II, acorde a las normativas, fueron preparados bajo condiciones de laboratorio con distintas dosificaciones volumétricas de cemento hidráulico, cemento de albañilería y cal, y arena como se muestra en la tabla 1. Todas las mezclas se mantuvieron en el rango de fluidez 105-130 % (ONNCCE, 2015b). Posteriormente, se curaron en inmersión en agua según se indica en la norma ASTM C31-C31M-22 (ASTM 2022a), siendo el agua obtenida de la red pública del campus de la UMSNH. La mitad de los morteros (B1) fueron preparados con cemento hidráulico, cal y arena, realizándose 6 especímenes para cada una de las 8 distintas proporciones, obteniéndose 48 muestras; mientras que la otra mitad (B2) incorporó cemento hidráulico, cemento de albañilería y arena, realizándose la misma cantidad de 48 especímenes que (B1), para obtener un total de 96 muestras a ensayar, primero en forma no destructiva obteniendo WER y después destructivamente hasta la falla para obtener UCS. ;

Tabla 1. Diseño de las mezclas y proporciones en volumen.

ID	Cemento hidráulico (cemento Portland)	Cemento de Albañilería (Cemento para construcción)	Cal	Arena
B1	1	-	$\frac{1}{2}$	2.25, 2.5, 2.75, 3, 3.25, 3.5, 3.75, 4
B2	1	1	-	2.25, 2.5, 2.75, 3, 3.25, 3.5, 3.75, 4

2.2 Caracterización y propiedades de los agregados finos

Las arenas fueron extraídas de bancos de material en el estado de Michoacán, en México. El estado está situado en el Eje Neovolcánico, donde abundan las rocas ígneas extrusivas y los materiales de origen silíceo, como los agregados de río o las arenas de cuarzo. Los tres agregados utilizados para

la investigación son arenas naturales sin triturar. En primer lugar, el banco “El Coro” (CH) del municipio de Zinapécuaro, cerca del lago Cuitzeo, en latitud 19.893889 y longitud -100.875833; después, el banco “El Cuervo” (R), del río Huajúmbaro en la depresión del Balsas, en latitud 19.626110 y longitud -100.636667; finalmente, el banco “Joyitas” (J), en Morelia, en latitud 19.727222 y longitud -101.385278. Las tres arenas se muestran en la figura 1.



Figura 1. Arenas: (a) Arena volcánica de Joyitas (J); (b) Arena limosa de El Coro (CH); (c) Arena de río de El Cuervo (R). Fuente: (Durán, 2021; Durán, 2021; Mondragón, 2021).

Las arenas se muestrearon en los bancos mencionados y se transportaron al laboratorio de materiales para su análisis. En primer lugar, se secaron y prepararon como muestras representativas (100 kg) para empezar el proceso de diseño de los morteros. Los geomateriales no cuentan con el mismo control de calidad estricto que tiene el cemento, debido a su origen natural; en cambio, es común que los morteros se produzcan en base a la experiencia de los usuarios, artesanos y constructores. La tabla 2 presenta el conjunto de métodos de caracterización que se aplicaron en las tres arenas utilizadas en la investigación antes de efectuar los morteros (ASTM International, 2017, 2018, 2019b, 2022b; ONNCCE, 2004, 2006, 2020).

Tabla 2. Métodos de ensayo aplicados a los agregados de cada banco de materiales

Método de ensayo	Norma	R	CH	J
Standard Practice for Sampling Aggregates (kg)	ASTM D75/D75M-19	100	100	100
Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate (g/cm ³) Agregados – Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado fino – Método de ensayo (g/cm ³)	ASTM C128-22 NMX-C-165-ONNCCE	2.22	2.13	2.40
Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate (%) Agregados – Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado fino – Método de ensayo (g/cm ³)	ASTM C128-22 NMX-C-165-ONNCCE	7.02	5.92	4.75
Standard Test Method for Bulk Density and Voids in Aggregate (g/cm ³) Agregados – Masa volumétrica – Método de prueba (g/cm ³)	ASTM C29/C29M-17a NMX-C-073-ONNCCE	1.18	1.23	1.36
Standard Test Method for Bulk Density and Voids in Aggregate (g/cm ³) Agregados para Concreto - Partículas más Finas que la Criba 0,075 mm (No. 200) por Medio de Lavado – Método de Prueba (g/cm ³)	ASTM C29/C29M-17a NMX-C-084-ONNCCE	1.28	1.36	1.42
Standard Specification for Concrete Aggregates (Módulo de Finura)	ASTM C33-C33M-18	3.51	2.98	3.87

* La densidad y la absorción se separaron en la tabla anterior, pero corresponden a las mismas normas.

Se calculó la densidad aparente de las arenas, con resultados muy similares para las tres (ASTM, 2017); por otro lado, CH presentó un coeficiente de absorción superior al 7%, mientras que el de J fue de 4.75%, siendo este un aspecto relevante. Esta condición puede tener una afectación directa en las propiedades del mortero, incrementando la demanda de agua y consecuentemente disminuyendo la resistencia a compresión.

La figura 2 presenta las curvas granulométricas de las distintas arenas, representando los límites inferiores y superiores de diseño (ASTM International, 2018), mostrando como R se adapta perfectamente a las curvas propuestas; por otro lado, CH presenta un exceso de material fino en el rango de 0.1 a 0.4 mm aproximadamente, mientras que J sobrepasa ligeramente el límite inferior. Estas condiciones pueden tener consecuencias en las propiedades de los morteros como la fluidez y la demanda de agua en estado fresco, como puede observarse más adelante en las figuras 6 y 7.

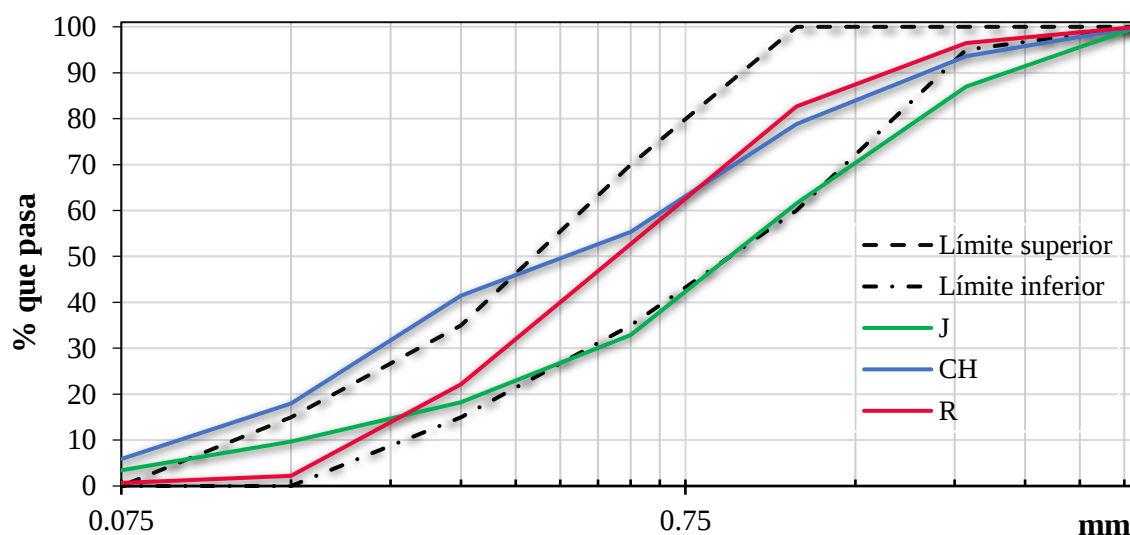


Figura 2. Curvas granulométricas de los agregados.

2.3 Métodos de ensayo aplicados a las mezclas de mortero

La tabla 3 muestra el conjunto de métodos de ensayo y pruebas realizadas para la caracterización de las mezclas de mortero en estado fresco y endurecido. Se siguieron tanto las normativas internacionales como las mexicanas (ASTM y ONNCCE) para analizar las dos combinaciones de diseño. Adicionalmente, los tres métodos de ensayo y su procedimiento se detallarán en el siguiente apartado (ASTM International, 2019a, 2020a, 2021; ONNCCE, 2014, 2015a, 2019).

Tabla 3. Métodos de ensayo aplicados a los morteros.

Métodos de ensayo	Norma	Condiciones
Esfuerzo de Compresión Uniaxial (UCS)	ASTM C109/C109M-21 NMX-C-486-ONNCCE-2014	Cubos sólidos 5x5x5 cm ³
Resistividad Eléctrica Húmeda (WER)	ASTM C1876-19 NMX-C-514-ONNCCE-2016	Cubos sólidos 5x5x5 cm ³
Consistencia de las mezclas y pastas para mortero base cemento portland	ASTM C305-20 NMX-C-061-ONNCCE-2015	Mezcla en estado fresco

2.3.1. *Fluidez*

El ensayo de fluidez (ver figura 3) permite determinar la trabajabilidad del mortero en estado fresco en función del contenido de agua utilizado, según la ecuación 1. La prueba infiere la consistencia de la mezcla, así como la idoneidad de aplicación para cada técnica. Los límites de aceptación de la prueba varían entre 105-130%, que es el incremento del diámetro del mortero extendido con respecto al diámetro original del mortero ensayado.

$$Fluidez (\%) = \frac{\text{diámetro extendido} - 25 \text{ cm}}{25 \text{ cm}} \times 100 \quad (1)$$



Figura 3. Ensayos en las mezclas de mortero: (a) Moldeado; (b) Consistencia; (c) Adherencia.

Fuente: (Durán, 2021).

2.3.2. *Resistividad Eléctrica Húmeda (WER)*

WER es un método alternativo para evaluar la homogeneidad de matrices de concreto, permitiendo obtener información relevante del desempeño del material sin comprometer físicamente la estructura, siendo un NDT. El ensayo se realizó según las normas NMX-C-514-ONNCCE y ASTM C1876-19 (ver figura 4). El procedimiento se basa en la Ley de Ohm, que indica que la resistividad eléctrica es recíproca a la conductividad, siendo una propiedad volumétrica de los materiales que indica la resistencia al paso de corriente eléctrica. WER se representa con la ecuación 2, donde R es la resistividad eléctrica en kΩ-cm, l es la longitud del espécimen en cm y A es el área en cm².

$$R = \frac{V}{I} = \rho \frac{l}{A} \quad (2)$$



Figura 4. Equipo de resistividad eléctrica Nillson 400.

2.3.3. *Resistencia a Compresión Uniaxial (UCS)*

El objetivo de este ensayo es determinar la resistencia a la compresión uniaxial de especímenes cúbicos de 50 mm (ver figura 5) según las normas NMX-C-486-ONNCCE y ASTM C109/C109M-21. La UCS se obtiene mediante la ecuación 3, donde W es la carga máxima en kgf que soporta el cubo, y A es el área de contacto en cm² del espécimen.

$$UCS = \frac{W}{A} \quad (3)$$



Figura 5. Máquina Universal de Pruebas, Resistencia a compresión uniaxial (UCS).

3. RESULTADOS

La investigación analizó las propiedades de tres bancos de arena en mezclas de mortero y sus distintas proporciones de diseño. La figura 6 muestra la comparación entre la fluidez de las mezclas con los tres agregados y la relación volumétrica entre el contenido de agua/material cementante aplicado en cada uno de los especímenes de mortero B1. Como puede observarse CH y J emplearon la misma cantidad de agua (las curvas se superponen), mientras que R necesitó una menor cantidad coincidiendo con (Hu, 2005). Por otro lado, la figura 7 muestra los resultados para los morteros clase B2; en este caso, cada una de las arenas requirió una dosificación de agua distinta y hasta la proporción 3.25 la cantidad de agua requerida por R también fue la menor correspondiendo con (Durán Ramos, 2021; Ren et al., 2021). Como se mencionó anteriormente, los límites de fluidez deben encontrarse en el rango entre 105 y 130 %, cumpliendo con este requisito todas las muestras. Para ambas clases de morteros se comprobó que a mayor proporción de arena se tiene una mayor relación agua/material cementante concordando con la investigación de (Giordani & Masuero, 2019).

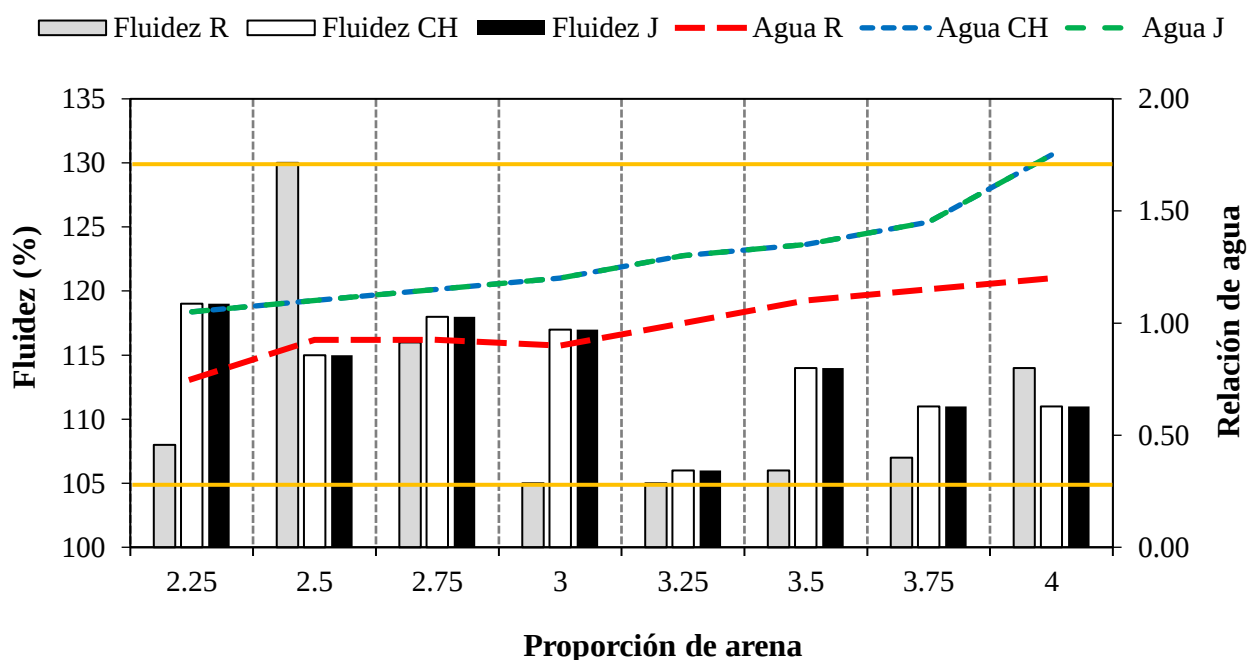


Figura 6. Fluidez y relación volumétrica de agua/cementantes de los morteros B1 (cemento hidráulico: cal: arena).

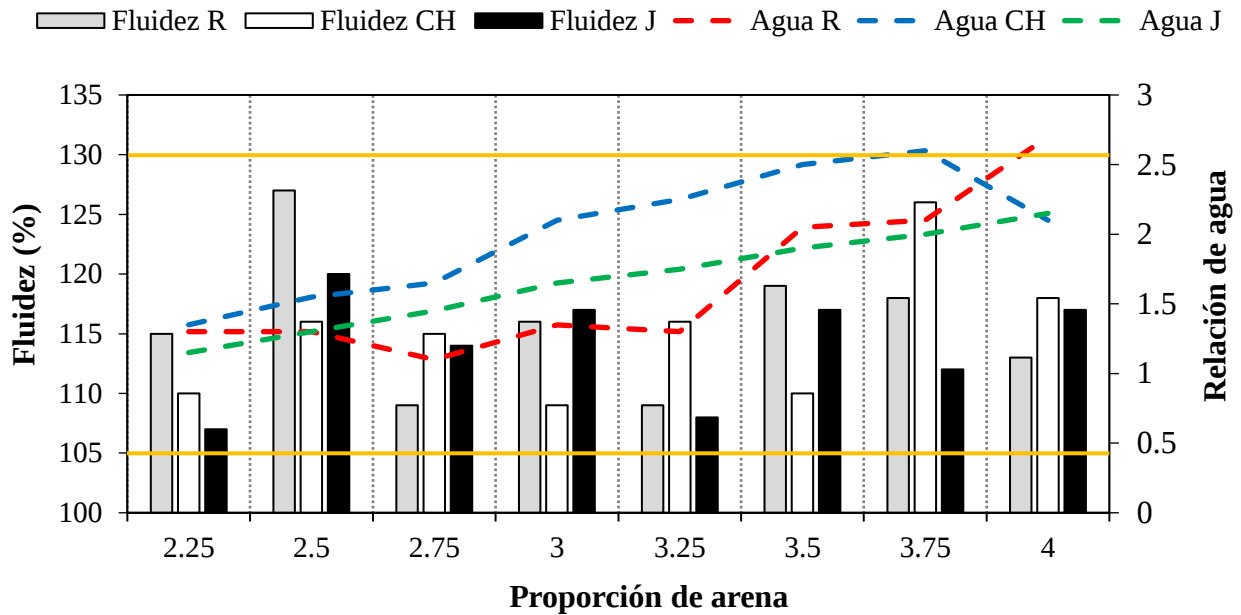


Figura 7. Fluidez y relación volumétrica de agua/cementantes de los morteros B2 (cemento hidráulico: cemento albañilería: arena).

Las figuras 8 y 9 representan los resultados del ensayo WER a 7 y 28 días de edad para los especímenes B1 y B2 respectivamente; podemos comprobar el desempeño de las tres arenas y cómo se comportaron con las distintas mezclas de mortero. El límite mínimo sugerido por la norma NMX-C-514-ONNCCE-2019 es de 10 k Ω -cm, para mezclas de concreto; un valor inferior podría resultar en una porosidad excesiva, como resultó en todos los casos analizados. Para ambos morteros B1 y B2 las mezclas con la arena CH fueron las que presentaron mayor resistividad eléctrica, sobresaliendo la mayor resistividad en mezclas B2.

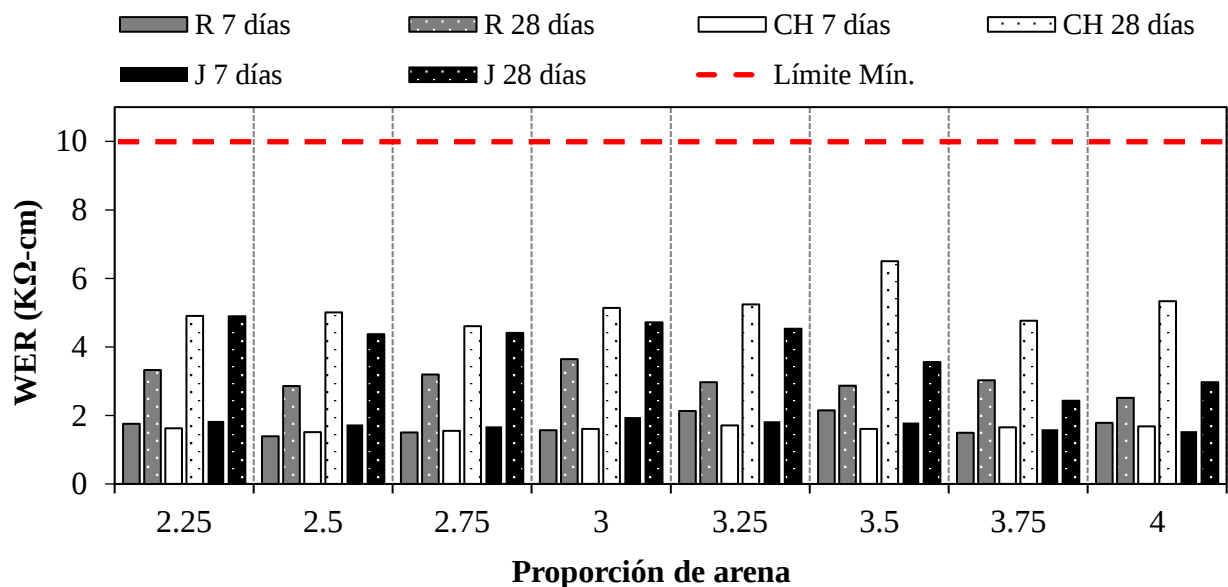


Figura 8. Resistividad eléctrica húmeda (WER) de los morteros B1 (cemento hidráulico: cal: arena) en función de la proporción de arena.

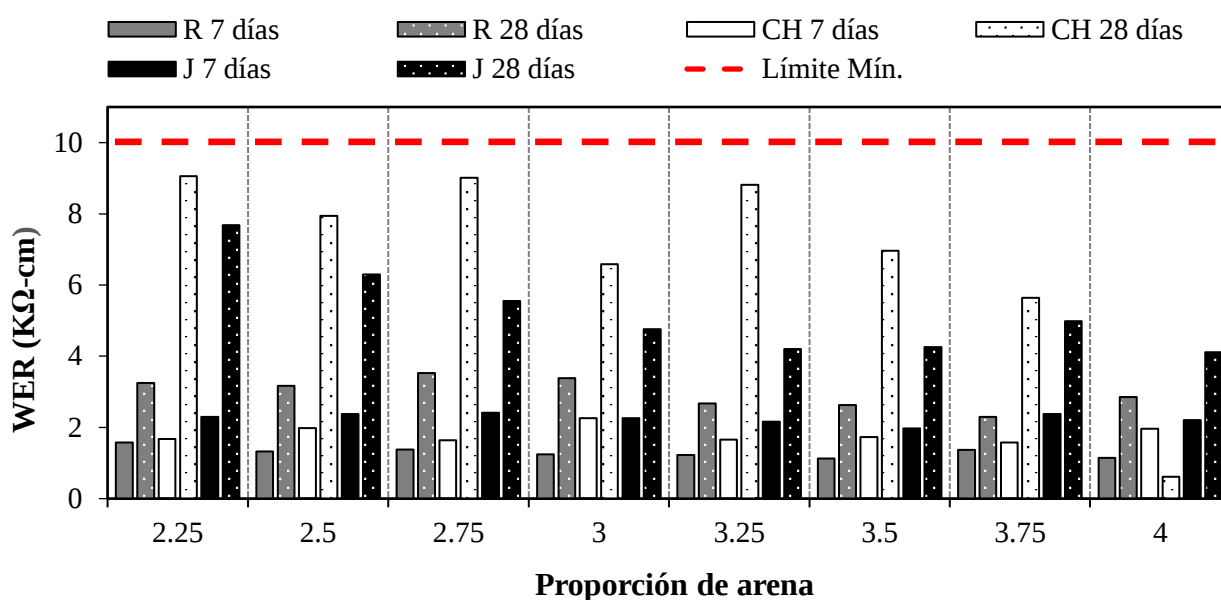


Figura 9. Resistividad eléctrica húmeda (WER) de los morteros B2 (cemento hidráulico: cemento albañilería: arena) en función de la proporción de arena.

Las figuras 10 y 11 muestran la UCS a 7 y 28 días de edad de los morteros B1 y B2 respectivamente, en función de las proporciones en volumen utilizadas (de 2.25 a 4). La resistencia mínima de diseño según la N-CMT-2-01-004/02 es $UCS = 75 \text{ kgf/cm}^2$ (7.5 MPa), considerado la utilización y las aplicaciones de estos morteros.

Como es lógico, los morteros incrementan su resistencia a mayor edad, y las muestras a 28 días reportaron los valores más altos de resistencia estudiados. En general, las proporciones volumétricas de 2.25 a 3 (arena/suma de cementantes) fueron las que funcionaron mejor, ya que para B1 para valores mayores a 3.25 ninguna de las mezclas cumplió con la mínima resistencia requerida de 75 kgf/cm^2 . Podemos apreciar como los morteros B1 tuvieron un mejor desempeño, con una mayor cantidad de especímenes alcanzando la resistencia mínima, en concordancia con lo reportado por (Souza et al., 2020; Beng Wei et al., 2021; HAMMAT et al., 2021). Para los morteros B1 el mejor agregado fue R, mientras que para los morteros B2 fue J.

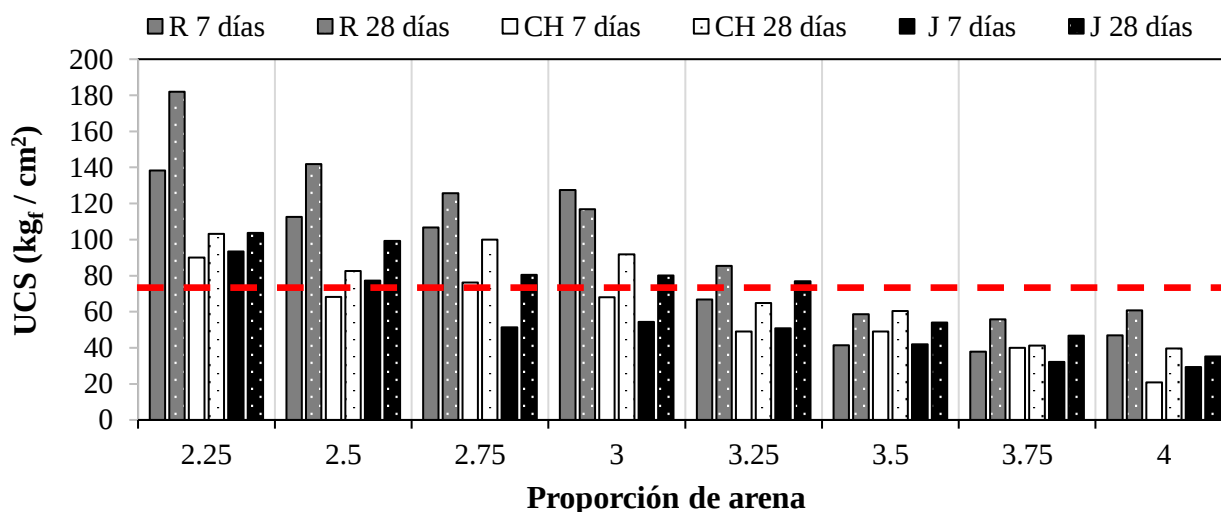
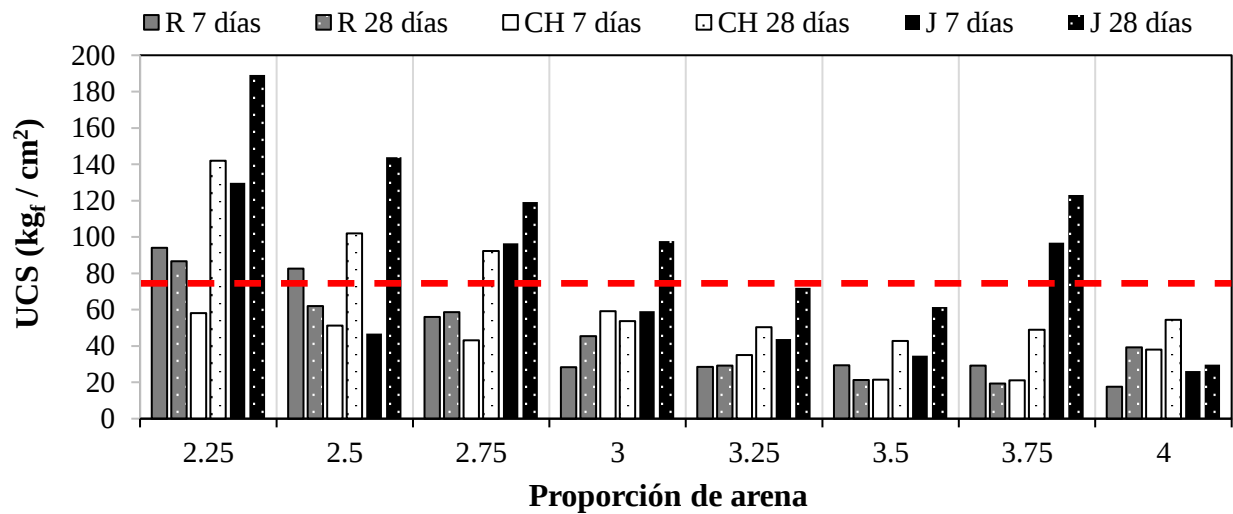
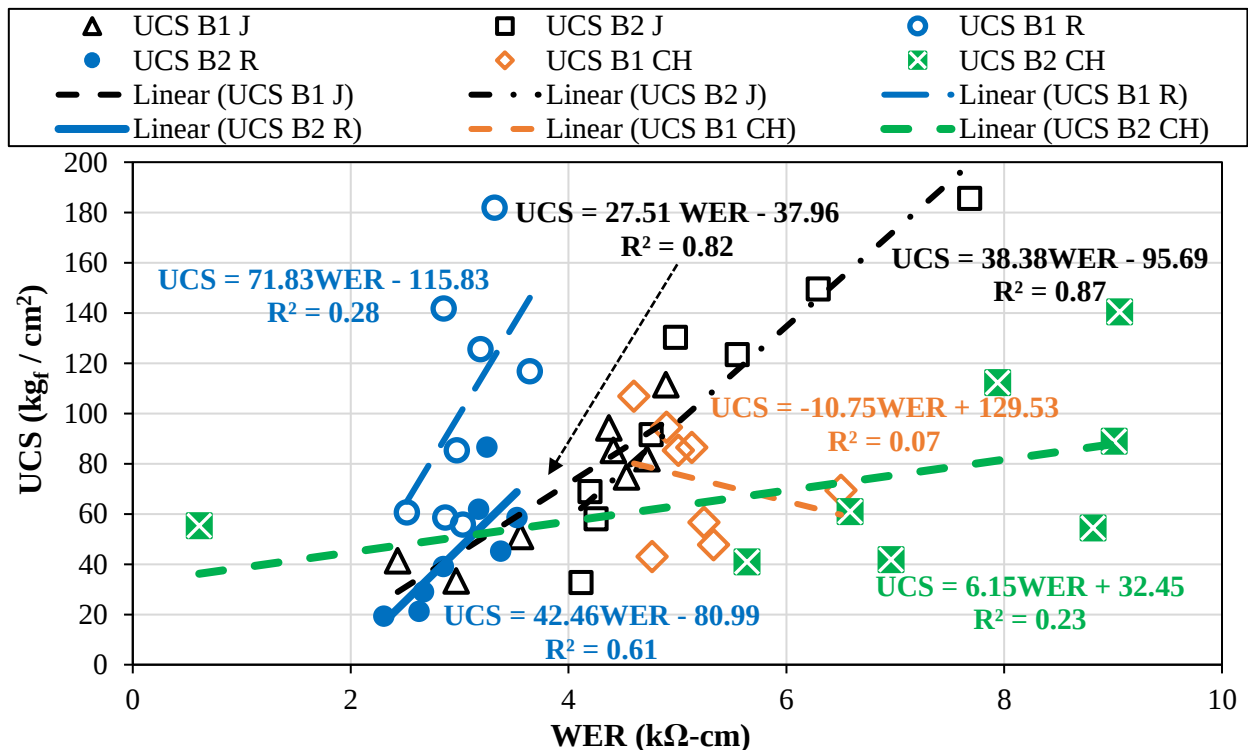


Figure 10. Resistencia a compresión de los morteros B1 en función de la proporción volumétrica de arena/suma de cementantes.



La figura 12 muestra la correlación entre los resultados de UCS y WER a 28 días de edad para todos los morteros diseñados. El agregado J es el que obtuvo el mejor coeficiente de correlación $R^2 = 0.87$ para los morteros clase B2, y $R^2 = 0.82$ para los morteros clase B1. Esta gran correlación entre los métodos de ensayo puede ligarse a la baja absorción y alta densidad del material, además de su correcta distribución mostrada en la curva granulométrica según lo especificado por la norma ASTM C-91. Por otro lado, R y CH evidenciaron la menor correlación, especialmente la última. Estos morteros presentaron mayor absorción y más cantidad de material fino en el análisis granulométrico, lo que incrementa la demanda de agua y consecuentemente la relación agua/material cementante, al igual que lo reportado por (Haach et al., 2011).



4. DISCUSIÓN

El banco de Joyitas (J) históricamente ha sido el más explotado y demandado por los artesanos y constructores de la región cercana a Morelia, en Michoacán. Esta arena volcánica oscura, de origen andesítico conforme a los análisis granulométricos, presenta una mayor cantidad de material fino y un ligero exceso de granos gruesos que quedan retenidos en las mallas ASTM 16 y 30, generando un mejor comportamiento mecánico respecto a los otros dos bancos. Además, J presentó mayores valores de densidad y una menor absorción de agua, justificando la elección de los usuarios de la región.

El proceso de caracterización permitió evaluar las tres distintas arenas y determinar cómo se comportan para cada tipología de mortero (B1 y B2) y bajo qué proporciones se obtienen los mejores resultados. Es importante entender que además de cumplir con los requerimientos mínimos de diseño, cada mezcla puede ser útil bajo condiciones específicas. La resistividad eléctrica es una NDT novedosa para evaluar la durabilidad de concretos y morteros, además de inferir la porosidad, mientras que toda esta información puede ser correlacionada con el análisis granulométrico y el tamaño de partícula de las arenas estudiadas. Bajo este supuesto la arena CH presentó los valores de resistividad eléctrica más elevados, a la vez que reportó considerables cantidades de material fino retenido en las mallas ASTM 100 y 200, y éstos actúan como fillers/llenadores de poros, sellando la porosidad de las mezclas y obstaculizando la permeabilidad de los iones despasivantes que pudieran reducir la durabilidad de las estructuras de mezclas concreto/mortero armados, abonando a lo reportado por (Giordani & Masuero, 2019; Haach et al., 2011; Durán Ramos, 2021; Ren et al., 2021).

Las proporciones más bajas de arena lograron el mejor comportamiento mecánico a la vez que cumplieron correctamente con los valores de diseño por fluidez. Con respecto a la resistividad eléctrica, todos los valores encontrados estuvieron por debajo de los 10 k Ω -cm según la NMX-C-514-2019, aunque este parámetro es para mezclas de concreto, por haberse diseñado las mezclas de mortero con altos valores de relación agua/material cementante, según se puede observar en las figuras 8 y 9, debido a la necesidad de tener una fluidez necesaria para la correcta trabajabilidad de los morteros en la obra, recordando que sus prestaciones deben estar dirigidas a la buena adherencia con la mampostería, ya sea como adhesivo o como recubrimiento. Adicionalmente, se corroboró que la proporción de arena tiene una correlación directa con la demanda de agua, resultando en un incremento de la relación agua/material cementante. Por lo tanto, los mejores y más adecuados morteros son aquellos con proporciones de arena bajas sin tener en cuenta su tipología y productos cementantes, en coincidencia con (Hafid et al., 2016; Stolz & Masuero, 2018). Es interesante comprobar como los morteros B1 lograron un desempeño satisfactorio para todos los métodos de ensayo, tomando en cuenta que se elaboraron con cal, un material que ha sido reportado con bajas resistencias (Souza et al., 2020) y sustituido con asiduidad por el cemento hidráulico o cemento Portland. Pese a que su comportamiento mecánico fue más bajo, las mezclas B1 generalmente demandan menos cantidad de agua que las mezclas B2, a la vez que alcanzan los mismos requisitos de fluidez, siendo éste un aspecto a considerar.

La técnica WER ha demostrado ser de gran utilidad para la caracterización de materiales y componentes y la evaluación de su durabilidad. Los excelentes coeficientes de correlación R^2 de J muestran como la densidad, la resistividad eléctrica y la resistencia mecánica se correlacionan en alto grado. El coeficiente entre UCS y WER está ligado fuertemente a la absorción y densidad de los agregados finos; cuando estas dos variables incrementan, el coeficiente variará fuertemente, con una importante dispersión de los datos. Por esta razón, es esencial combinar los NDT con ensayos de resistencia mecánica para contar con una mejor comprensión y entendimiento de los materiales de construcción.

Según la normatividad el MF para la arena empleada en morteros para la edificación se encuentra

entre el rango de 1.6 a 2.5 (de más fina a más gruesa). Las tres arenas estudiadas cumplen con este parámetro. Según la granulometría, la arena de El Coro (CH) presenta el menor Módulo de Finura de las tres arenas estudiadas, con un valor de 2.06, teniendo además ligero exceso de finos, según la Figura 2, lo que puede influir para que estos se comporten como filler obturando la porosidad y, por lo tanto, incrementando la Resistividad en ambas mezclas B1 y B2, repercutiendo así en una mayor durabilidad de esta mezcla de mortero a los 28 días, acentuándose este comportamiento en mezclas B2.

5. CONCLUSIONES

Los resultados muestran que en los morteros estudiados la cantidad de agua empleada se incrementa conforme aumenta el consumo de materiales cementantes y de los agregados finos, como se esperaba. En ambas mezclas B1 (cemento hidráulico: cal: arena) y B2 (cemento hidráulico: cemento de albañilería: arena), al reducirse la proporción volumétrica de arena/material cementante se incrementó la resistencia a la compresión UCS, así como la fluidez que se mantuvo en el rango de 105 a 130%; en el mismo sentido el consumo de agua/material cementante A/MC, en volumen, se incrementó proporcionalmente en el rango de 1.10 a 1.80 para mezclas B1 y de 1.10 a 2.60 para mezclas B2, teniéndose una menor demanda de agua en mezclas con cal que con cemento de albañilería, sobre todo a mayores proporciones de arena. Respecto a la Resistividad eléctrica WER, a edades tempranas de 7 días ambas mezclas B1 y B2 tuvieron un comportamiento similar, teniéndose un ligero incremento en J sobre CH y R; a los 28 días destaca CH particularmente en mezclas B2, teniendo la proporción arena/material cementante de 2.25 un valor cercano a los 10 kΩ-cm, que es la WER mínima requerida para tener mezclas de concreto hidráulico para considerarse con velocidad de corrosión moderada. En este caso del estudio de morteros al tenerse altos valores de relación agua/material cementante, por la fluidez necesaria de estas mezclas en las obras, no se llegó a valor mencionado. Con los resultados obtenidos en el presente trabajo se confirma la necesidad de estudiar y caracterizar adecuadamente los materiales usados en la construcción, en especial los composites como los morteros de albañilería, ya que un uso inadecuado de los áridos y de los cementantes puede afectar enormemente la capacidad resistente de dichos morteros. Estos resultados incrementan el conocimiento técnico-científico de los morteros de albañilería, lo que permite a los constructores tomar decisiones acertadas y basadas en estudios formales.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte financiero de la Coordinación de la Investigación Científica, CIC, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH); así como el financiamiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) mediante el proyecto PRONACE 321260: Desarrollo de un modelo de producción social replicable de vivienda y hábitat y del Proyecto CF-2023-G-985, Concretos y morteros auto degradantes de biota y compuestos contaminantes presentes en la atmósfera, para su aplicación en vivienda digna de interés social, en ciudades medias mexicanas; el programa SEP-Prodep; y también el apoyo técnico del laboratorio “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH. Finalmente, se agradece el apoyo del ingeniero civil Saúl Mondragón Martínez por su colaboración en los ensayos de laboratorio.

7. REFERENCIAS

- Álvarez Galindo, J. I., Martín Pérez, A., García Casado, P. J. (1995). *Historia de los morteros*. Revista PH, 13, 52. <https://doi.org/10.33349/1995.13.263>
- ASTM International. (2017). *ASTM C29/C29M 17a. Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate*. ASTM International.
- ASTM International. (2018). *ASTM C33-C33M-18. Standard Specification for Concrete Aggregates*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0033_C0033M-18
- ASTM International. (2019a). *ASTM C1876-19. Standard Test Method for Bulk Electrical Resistivity or Bulk Conductivity of Concrete*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C1876-19>
- ASTM International. (2019b). *ASTM D75/D75M-19. Standard Practice for Sampling Aggregates*. ASTM International.
- ASTM International. (2020a). *ASTM C305-20. Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0305-20>
- ASTM International. (2020b). *ASTM E1266-20. Standard Practice for Processing Mixtures of Lime, Fly Ash, and Heavy Metal Wastes in Structural Fills and Other Construction Applications*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E1266-20>
- ASTM International. (2021). *ASTM C109/C109M-21. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens)*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0109_C0109M-21
- ASTM International. (2022a). *ASTM C31/C31M-22. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0031_C0031M-22
- ASTM International. (2022b). *ASTM C128-22. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. ASTM International.
- ASTM International. (2022c). *ASTM C150-C150M-22. Standard Specification for Portland Cement*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0150-07>
- Beng Wei, C., Othman, R., Yee Ying, C., Putra Jaya, R., Shu Ing, D., Ali Mangi, S. (2021). *Properties of mortar with fine eggshell powder as partial cement replacement*. Materials Today: Proceedings, 46, 1574–1581. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.240>
- Brazão Farinha, C., de Brito, J., Veiga, R. (2021). *Incorporation of high contents of textile, acrylic and glass waste fibres in cement-based mortars. Influence on mortars’ fresh, mechanical and deformability behaviour*. Construction and Building Materials, 303, 124424. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124424>
- Danish, A., Ozbakkaloglu, T. (2023). *Impact of nano-silica on the mechanical properties of mortar containing e-waste plastic as fine aggregates*. Materials Today: Proceedings. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.182>
- Durán Ramos, A. M. (2021). *Diseño de mezclas plásticas aglomerantes y su consideración de proporcionamiento por medio del ensayo de fluidez (Bachelor’s Degree Thesis)*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Gao, X., Yao, X., Xie, R., Li, X., Cheng, J., Yang, T. (2022). *Performance of fly ash-based geopolymer mortars with waste cathode ray tubes glass fine aggregate: A comparative study with cement mortars*. Construction and Building Materials, 344, 128243. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128243>
- Giordani, C., Masuero, A. B. (2019). *Blended mortars: Influence of the constituents and proportioning in the fresh state*. Construction and Building Materials, 210, 574–587. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.077>

- 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(6), 2980–2987. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.011>
- Hafid, H., Ovarlez, G., Toussaint, F., Jezequel, P. H., Roussel, N. (2016). *Effect of particle morphological parameters on sand grains packing properties and rheology of model mortars*. Cement and Concrete Research, 80, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.11.002>
- Hammat, S., Menadi, B., Kenai, S., Thomas, C., Kirgiz, M. S., Sousa Galdino, A. G. de. (2021). *The effect of content and fineness of natural pozzolana on the rheological, mechanical, and durability properties of self-compacting mortar*. Journal of Building Engineering, 44, 103276. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103276>
- Hu, J. (2005). *A study of effects of aggregate on concrete rheology* [Iowa State University, Digital Repository]. <https://doi.org/10.31274/rtd-180813-15380>
- Jacques, K. T. J., Zengyao, W., Shoude, W., Shifeng, H., Xin, C. (2023). *The influence of different fine aggregate and cooling regimes on the engineering properties of sulphoaluminate cement mortar after heating*. Case Studies in Construction Materials, 18, e01866. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01866>
- Li, T., Nogueira, R., de Brito, J., & Liu, J. (2023). *Underlying mechanisms of the influence of fine aggregates' content and properties on mortar's plastic viscosity*. Journal of Building Engineering, 67, 106016. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106016>
- Li, T., Zhou, Y., Zhu, J., Liu, J. (2022). *Effect of fine aggregate gradation on the rheology of mortar*. Construction and Building Materials, 332, 127362. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127362>
- Martinez-Molina, W., Chavez-Garcia, H. L., Perez-Lopez, T., Alonso-Guzman, E. M., Arreola-Sanchez, M., Navarrete-Seras, M. A., Borrego-Perez, J. A., Sanchez-Calvillo, A., Guzman-Torres, J. A., Perez-Quiroz, J. T. (2021). *Effect of the Addition of Agribusiness and Industrial Wastes as a Partial Substitution of Portland Cement for the Carbonation of Mortars*. Materials, 14(23), 7276. <https://doi.org/10.3390/ma14237276>
- Navarro-Mendoza, E. G., Alonso-Guzman, E. M., Ruvalcaba-Sil, J. L., Sánchez-Calvillo, A., Martínez-Molina, W., García, H. L. C., Bedolla-Arroyo, J. A., Becerra-Santacruz, H., Borrego-Pérez, J. A. (2020). *Compressive strength and ultrasonic pulse velocity of mortars and pastes, elaborated with slaked lime and high purity hydrated lime, for restoration works in Mexico*. In Key Engineering Materials: Vol. 862 KEM. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.862.51>
- Navarro-Mendoza, E. G., Alonso-Guzman, E. M., Sanchez-Calvillo, A., Bedolla-Arroyo, J. A., Becerra-Santacruz, H., Navarro-Ezquerria, A., Gonzalez-Sanchez, B., Martinez-Molina, W. (2023). *Physical and Mechanical Characterization of Lime Pastes and Mortars for Use in Restoration*. Heritage, 6(3), 2582–2600. <https://doi.org/10.3390/heritage6030136>
- ONNCCE. (2004). *NMX-C-073-ONNCCE-2004. Industria de la construcción - Agregados - Masa volumétrica. Método de prueba*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- ONNCCE. (2006). *NMX-C-084-ONNCCE-2006. Industria de la construcción - Agregados para Concreto - Partículas más Finas que la Criba 0,075 mm (No. 200) por Medio de Lavado – Método de Prueba*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- ONNCCE. (2014). *NMX-C-486-ONNCCE-2014. Industria de la construcción-Mampostería - Mortero para uso estructural- especificaciones y métodos de ensayo*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación.
- ONNCCE. (2015a). *NMX-C-061-ONNCCE-2015. Building Industry – Hydraulic Cements – Determination of Compressive Strength of Hydraulic Cements*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.

- ONNCCE. (2015b). *NMX-C-144-ONNCCE-2015. Building Industry - Hydraulic Cement - Specifications for the Apparatus used in the Flow Test for Mortars made of Hydraulic Cements*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- ONNCCE. (2019). *NMX-C-514-ONNCCE-2019. Building Industry – Electrical Resistivity of Hydraulic Concrete - Specifications and Testing Methods*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- ONNCCE. (2020). *NMX-C-165-ONNCCE-2020. Industria de la construcción - Agregados para concreto - Determinación de la reactividad potencial*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- ONNCCE. (2002). *N-CMT-2-01-004/02. Characteristics of Materials. Materials For Structures. Materials For Hydraulic Concrete*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- Ren, Q., Tao, Y., Jiao, D., Jiang, Z., Ye, G., De Schutter, G. (2021). *Plastic viscosity of cement mortar with manufactured sand as influenced by geometric features and particle size*. *Cement and Concrete Composites*, 122, 104163. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104163>
- Ribeiro, D. V., Oliveira Rey, R. (2019). *Avaliação dos agregados utilizados na região metropolitana de Salvador quanto à ocorrência de Reatividade Álcalis-Agregado (RAA)*. *Revista ALCONPAT*, 9(2), 185–199. <https://doi.org/10.21041/ra.v9i2.326>
- Sánchez Tizapa, S., Villaseñor Franco, A., Guinto Herrera, E., Barragán Trinidad, R., Mebarki, A. (2017). *Propuesta de valores de referencia para la resistencia de diseño a compresión diagonal y compresión de la mampostería en el estado de Guerrero, México*. *Revista ALCONPAT*, 7(3), 231–246. <https://doi.org/10.21041/ra.v7i3.159>
- Senff, L., Barbeta, P. A., Repette, W. L., Hotza, D., Paiva, H., Ferreira, V. M., Labrincha, J. A. (2009). *Mortar composition defined according to rheometer and flow table tests using factorial designed experiments*. *Construction and Building Materials*, 23(10), 3107–3111. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.028>
- Souza, A. T., Barbosa, T. F., Riccio, L. A., Santos, W. J. dos. (2020). *Effect of limestone powder substitution on mechanical properties and durability of slender precast components of structural mortar*. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(1), 847–856. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.024>
- Stolz, C. M., Masuero, A. B. (2018). *Influence of grain distribution on the rheological behavior of mortars*. *Construction and Building Materials*, 177, 261–271. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.131>
- Tena, A., Liga, A., Pérez, A., González, F. (2017). *Proposal for improved mixes to produce concrete masonry units with commonly used aggregates available in the Valley of Mexico*. *Revista ALCONPAT*, 7(1), 36–56. <https://doi.org/10.21041/ra.v7i1.170>
- Ullah, Z., Qureshi, M. I., Ahmad, A., Khan, S. U., Javaid, M. F. (2021). *An experimental study on the mechanical and durability properties assessment of E-waste concrete*. *Journal of Building Engineering*, 38, 102177. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102177>
- Westerholm, M., Lagerblad, B., Silfwerbrand, J., Forssberg, E. (2008). *Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars*. *Cement and Concrete Composites*, 30(4), 274–282. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.08.008>
- Wu, M., Zhao, Q., Shen, W., Zhao, J., Xu, G., Zhao, D., Xiong, X. (2021). *Mix design of self-leveling mortar prepared by crushed sand with high flowability and early strengthening*. *Construction and Building Materials*, 283, 122679. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122679>