

Fabricación de ladrillos con polvo-residuo de mármol en México

Propiedades físicas y mecánicas del polvo-residuo de mármol de la provincia de la Comarca Lagunera, en México

Physical and mechanical properties of bricks with dust residue from marble in México. Physical and mechanical properties of the marble dust-residue from the Comarca Lagunera Province, in Mexico

C. Ponce-Palafox

Universidad Autónoma de Coahuila, Torreón. Coahuila (México)

Escuela de Arquitectura

Cuerpo académico Viabilidad Sustentable de la Edificación

Julián Carrillo

Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, D. C. (Colombia)

Facultad de Ingeniería

Grupo de investigación Estructuras y Sísmica

A. López-Montelongo

Universidad Autónoma de Coahuila, Torreón. Coahuila (México)

Escuela de Arquitectura

Cuerpo académico Viabilidad Sustentable de la Edificación

C. Ponce-Palafox

Ingeniero civil. Catedrático investigador, Universidad Autónoma de Coahuila, México.

Maestría en Ingeniería Estructural, Universidad Nacional Autónoma de México.

Doctorado en Ingeniería Civil con Especialidad en Estructuras, Universidad de Sonora, México.

<https://orcid.org/0000-0002-5991-3395>

cesarponce@uadec.edu.mx

Julián Carrillo

Ingeniero civil. Profesor titular, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, D. C., Colombia.

Maestría en Ingeniería Estructural y Sísmica, Universidad de los Andes, Bogotá, D. C., Colombia.

Doctorado en Ingeniería Estructural, Universidad Nacional Autónoma de México.

<http://orcid.org/0000-0002-8274-5414>

julian.carrillo@unimilitar.edu.co

A. López-Montelongo

Catedrático investigador, Universidad Autónoma de Coahuila, México.

Maestría en Arquitectura en Diseño Ambiental, Universidad Autónoma de Baja California, México.

Doctorado en Arquitectura, Acentuación en Vivienda, Universidad Autónoma de Tamaulipas, México.

<https://orcid.org/0000-0001-9664-0237>

areli.lopez@uadec.edu.mx

Introducción

El propósito de esta investigación es buscar un uso al desecho de polvo de mármol que se genera en la provincia de la Comarca Lagunera, en México, ya que en la región actualmente se generan 450 t diarias. Esta investigación se desarrolla en la Universidad Autónoma de Coahuila (México), en la Escuela de Arquitectura Unidad Torreón, porque es la zona donde se tiene el problema ambiental y se cuenta con las líneas de investigación de materiales alternativos para la construcción. El proyecto se desarrolló con la colaboración del Grupo de Investigación de Estructuras y Sísmica de la Universidad Militar Nueva Granada (Colombia).

La provincia Lagunera es una región geográfica conformada por 10 municipios del estado de Durango y otros 5 del estado de Coahuila, en México. El estado de Durango tiene la mayor extracción de mármol en México. Estos 2 estados procesan aproximadamente 1.800.000 t/año de mármol, para que luego este sea comercializado en todas partes del mundo (Secretaría de Economía, 2016). De dicha producción, las empresas generan 450 t de desperdicio en polvo diario, que es producto del corte y el pulido del material. Este polvo de mármol se esparce fácilmente por la ciudad, gracias a las constantes corrientes de aire, lo que expone a toda la ciudadanía a enfermedades respiratorias como la neumoconiosis. Dicha enfermedad es considerada una de las principales causas de muerte entre los trabajadores del mármol (Secretaría de Salud, 2016). Además de este problema ambiental y de salud, el estado de Coahuila se enfrenta a una de sus más vertiginosas caídas económicas, lo cual hace difícil que la población adquiera una vivienda.

Es importante, entonces, buscar una pronta solución a los 2 problemas mencionados: 1) dar un uso al polvo-residuo de mármol que de otra forma está generando contaminación a partir de la fabricación de piezas de mampostería, al usarse solo el 62% de este polvo en cada pieza, y 2) ofrecer una solución de vivienda de bajo costo a los habitantes de la ciudad que están en la pobreza, a partir de la generación de piezas de mampostería para construir muros. Aunque ambos problemas pueden parecer completamente separados, sí podrían compartir una solución. Por ejemplo, si se logra aprovechar los desechos de la industria del mármol en un material de construcción económico y durable, las personas en situación de vulnerabilidad podrán mejorar la calidad de su vivienda, y, con esto, su salud y su calidad de vida.

Ponce-Palafox, C., Carrillo, J. y López-Montelongo, A. (2020). Fabricación de ladrillos con polvo-residuo de mármol en México. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 22(2), 106-113 <https://doi.org/10.14718/RevArq.2020.2554>



doi.org/10.14718/RevArq.2020.2554

Resumen

La industria del mármol genera gran cantidad de desperdicio en polvo. Estos desechos carecen de un adecuado plan de manejo, además de resultar altamente contaminantes para la población que rodea el lugar de los depósitos de dichos materiales. Para ofrecer una solución, en este artículo se presentan los resultados del desarrollo de un ladrillo a base del polvo de mármol, que tenga una resistencia a compresión suficiente para construir muros de mampostería en viviendas de baja altura. El programa experimental incluye 16 dosificaciones diferentes, en las que se varía la cantidad de cemento, cal comercial para albañilería y arena, y se deja constante la de polvo-residuo de mármol. El programa incluye el ensaye a compresión de 160 ladrillos, 3 ensayos a compresión en muretes, 3 pruebas de adherencia validada a compresión en muretes y 48 pruebas de absorción. Los resultados de los ensayos demostraron que la resistencia a compresión de las piezas individuales y de muretes es de 4,0 MPa y de 1,9 MPa, respectivamente, y la absorción de las piezas es del 21%. Estos resultados de absorción, compresión y adherencia son el primer indicativo de la viabilidad del uso de estos ladrillos para la construcción de muros de carga en viviendas desarrolladas en zonas de amenaza sísmica baja.

Palabras clave: Absorción; adherencia; compresión; muros de carga; vivienda;

Abstract

The marble industry generates a large amount of dust waste. These wastes do not have a proper management plan, as well as being highly contaminating the population surrounding the site of the deposits for these materials. To offer a solution, this article shows the results of the development of a brick-based marble powder to achieve sufficient compressive strength for the construction of masonry walls in low-rise housing. The experimental program includes 16 different dosages that varies the amount of cement, lime, and sand, and keep constant the marble powder. The program includes the compressive tests for 160 bricks, compressive tests for 3 small walls, validated adherence under compression tests for 3 small walls, and absorption tests for 48 bricks. The results of the test showed that the compression strength of the individual bricks and wall is 4.0 MPa and 1.9 MPa, respectively, and the absorption of the bricks is 21%. These results of absorption, compression and adhesion are a first indicator of the feasibility of used these bricks for the construction of load-bearing walls in housing projects developed in areas of low seismic demands.

Keywords: Absorption, adhesion, compression, load-bearing walls, housing;

Recibido: diciembre 26/2018

Evaluado: mayo 5/2019

Aceptado: marzo 20/2020

El objetivo principal de esta investigación es buscar la dosificación adecuada de agregados, polvo de mármol, cemento, arena y cal comercial de albañilería para que los ladrillos alcancen una resistencia a compresión adecuada para construir muros de mampostería en viviendas de baja altura.

Para el desarrollo de la presente investigación se plantean dos preguntas: 1) ¿Se podrán fabricar piezas de mampostería con polvo-residuo de mármol?, y 2) ¿Las piezas fabricadas con polvo-residuo de mármol alcanzarán la resistencia a compresión necesaria para construir con ellas muros en viviendas de baja altura (3,5 m)? Con base en dichas preguntas se plantean dos hipótesis: i) es posible fabricar piezas de mampostería con un contenido alto de polvo-residuo de mármol si se sigue un procedimiento correcto, y ii) las piezas construidas alcanzarán la resistencia mínima necesaria a compresión para construir muros de mampostería en viviendas de baja altura; incluso, la resistencia será mayor que la de algunas piezas que actualmente se comercializan en la región.

En el artículo se presentan los resultados de dos etapas del desarrollo de un ladrillo con polvo de mármol para construir muros de mampostería en viviendas de baja altura. La primera etapa del programa experimental del estudio incluye 16 dosificaciones diferentes, para establecer la más adecuada en la fabricación de ladrillos; de estas 16 dosificaciones, se fabrican 10 ladrillos de cada una, para tener así 160 ensayos de resistencia a compresión en ladrillos individuales, 3 ensayos a compresión en muretes, 3 ensayos de adherencia en muretes y 48 ensayos de absorción en ladrillos individuales. Los ensayos se planearon para comprobar que los ladrillos puedan trabajar adecuadamente a compresión en un muro de una vivienda de baja altura. Con la dosificación establecida, en la segunda etapa se busca eliminar el curado de los ladrillos y se presenta el ensayo a compresión de 10 ladrillos que fueron curados al saturarlos en agua y 10 ladrillos que no fueron curados.

La primera etapa incluye mezclas con diferentes dosificaciones de cemento, cal y arena, pero sin variar la cantidad de polvo de mármol. Las mezclas se proyectaron para verificar cuál de ellas presenta el mejor comportamiento de resistencia a compresión. Estos ensayos experimentales se realizaron de acuerdo con las Normas Mexicanas del Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (NMX-ONNCCE) vigentes.

Problemática social

La vivienda es una condición básica, dada la necesidad de alojamiento adecuado que tiene el ser humano; sin embargo, para gran parte de la población en Coahuila que no cuenta con un trabajo establecido resulta imposible satisfacer correctamente esta necesidad básica, pues los ingresos que reciben resultan insuficientes para la adquisición de una vivienda adecuada, según la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH, 2016). En la mayoría de los casos, la única alternativa para la población de escasos recursos económicos es construir sus propias viviendas; obstante, dichas viviendas, una vez edificadas, evidencian enormes deficiencias, ya que la mayoría de las veces son construidas con materiales inapropiados o de poca resistencia (Salgado y Molar, 2017). A las personas que viven en esas viviendas se las conoce como personas en estado de pobreza patrimonial, ya que sus ingresos les permiten satisfacer solamente ciertas necesidades, tales como el alimento o la educación, pero sin la posibilidad de adquirir un hogar satisfactorio (López et al., 2012).

Para estimar la cantidad de viviendas construidas con muros frágiles (muros fabricados con desecho de materiales urbanos, tales como cartón, papel, etc.), en el presente estudio se revisaron los resultados presentados por la ENIGH (2016). De esa manera, se encontró que el 62,2% de las viviendas en situación de pobreza tienen muros frágiles; por tanto, es necesario presentar una solución para que sus habitantes puedan tener acceso a construir muros de mampostería a bajo costo.

Durante el proceso de corte y pulido de un bloque de mármol para fines decorativos, aproximadamente entre el 20% y el 30% de dicho bloque se convierte en polvillo (Gencel et al., 2012), lo cual evidencia la gran cantidad de desecho que se genera en la región. El problema del desecho de polvo de mármol se halla presente en el mundo entero; por ejemplo, Turquía es uno de los países con mayor producción anual de mármol en el planeta (Bilgin et al., 2012); este país tiene también un enorme problema con el manejo de los desechos de tal industria. Otro país con problemas de residuos de mármol es Egipto, que se encuentra entre los principales productores de mármol (El-Sayed et al., 2016), y también tiene el problema de almacenar el residuo de material en los alrededores de las plantas de producción, y genera así contaminación a la población



This article is available in English on the website of *Revista de Arquitectura (Bogotá)*
<http://dx.doi.org/10.14718/RevArq.2020.2554>

**Physical and mechanical properties of bricks with dust residue from marble in México.
Physical and mechanical properties of the marble dust-residue from the Comarca
Lagunera Province, in Mexico**



cercana. Al crear conciencia sobre esta problemática, muchos investigadores a escala internacional están buscando nuevos usos y aplicaciones a los diferentes productos de desperdicio que se generan en el tratamiento de mármol.

Estudios previos sobre el polvo-residuo de mármol

En 2012, Santos et al. intentaron fabricar un ladrillo a base polvo de mármol. Las dosificaciones que fueron propuestas en su estudio se verificaron a prueba y error, porque no se tenía ninguna referencia experimental para iniciar la fabricación de los ladrillos. La resistencia a compresión de los ladrillos del estudio de Santos et al. (2012) fue $< 4,9$ MPa. Estos ladrillos se clasifican como *ladrillos no estructurales*, ya que el valor mínimo de resistencia a compresión para ladrillos sólidos de uso estructural con longitudes < 300 mm es 6,9 MPa, según la Norma Mexicana de la industria de la Construcción 404 del Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (NMX-C-404-ONNCCE-2012); sin embargo, la norma NMX-C-441-ONNCCE-2013 establece que la resistencia mínima a compresión para ladrillos de uso no estructurales es 3,1 MPa.

En 2014, Rangel y Nevarez intentaron establecer las dosificaciones necesarias para fabricar un ladrillo estructural con polvo-residuo de mármol. Estudiaron el polvo de mármol de tres productoras de dicho material de la región de la Provincia Lagunera. Su estudio (2014) incluyó dosificaciones que contenían arena de río, agua y cemento gris. Los especímenes fueron ensayados a compresión a los 7, a los 14 y a los 28 días de curado en agua; también construyeron especímenes con varios porcentajes de cemento en la mezcla. Los especímenes que contenían el 12 % y el 15 % de cemento alcanzaron los valores más altos de resistencia a compresión: por ejemplo, la resistencia de dichos especímenes fue $> 10,78$ MPa, el cual es superior al valor mínimo exigido por la norma NMX-C-404-ONNCCE2012 para ladrillos sólidos de uso estructural. Rangel y Nevarez (2014) observaron, por otra parte, que solo los ladrillos fabricados con polvillo proveniente de una de las empresas en estudio alcanzaron los límites de resistencia a compresión. La comparación entre los resultados de resistencia a compresión de los ladrillos de las diferentes productoras de mármol reveló diferencias de resistencia del orden del 50 %. La razón de tales diferencias es que la mayoría de los establecimientos especializados en el tratamiento del mármol reciclan el agua para darle más de un uso; el reciclado consiste en que separan el agua del polvillo a

través del filtrado de agua residual. Esto ha evitado la contaminación del polvo con otros materiales que afectan la resistencia a compresión. El filtrado consiste en separar el agua del polvo por medio de una trampa natural. El método usado por la empresa consiste en depositar el desecho producto de corte y pulido (agua y polvo de mármol) en un pozo de gran tamaño, por lo que, además, se logra la separación de los elementos por gravedad, ya que, al ser más pesado, el polvo de mármol se va al fondo del pozo y el agua se queda en la parte superior, lo cual permite que todo el polvillo se separe del agua y se pueda así utilizarla nuevamente. Cuando el desperdicio que contiene agua y polvo de mármol es depositado en esos pozos, el mayor peso del polvo de mármol lo lleva al fondo del pozo. Con esta separación, el agua puede ser extraída fácilmente, para evitar que el polvo de mármol contenga químicos que generen pérdida de resistencia a compresión en los ladrillos. En la presente investigación se usó únicamente el polvo-residuo de mármol proveniente de la empresa que no le agrega químicos al agua para su reutilización.

Santos et al. (2012) encontraron que la composición química del polvo de mármol objeto de su estudio tiene ciertas características especiales, como se muestra en la tabla 1. Se observa que la mayor parte de su composición es carbonato de calcio, pero también contiene, en menor cantidad, hierro, aluminio y óxido de silicio. Mientras que Shahul y Sekar (2009) encontraron que la mayor parte de la composición química del lodo de mármol es óxido de silicio, y, en menor cantidad, óxido de hierro, óxido de magnesio, óxido de sodio, óxido de potasio, óxido de aluminio y óxido de calcio.

Metodología

Programa experimental

El programa experimental en la primera etapa del presente estudio incluye 160 ensayos de resistencia a compresión en ladrillos individuales de $50 \times 80 \times 230$ mm, así como 3 ensayos a compresión en muretes, 3 ensayos de adherencia en muretes y 48 ensayos de absorción en piezas individuales. El programa experimental incluye 16 mezclas con diferentes dosificaciones de cemento, cal y arena, pero sin variar la cantidad de polvo de mármol.

Dosificación de ensaye

Para cada dosificación se construyeron 10 piezas. Algunas de las mezclas sustituyen porcentajes de cemento por cal y otras sustituyen la arena de río por arena caliza triturada; esto, para dejarse de usar arena de río y conservar los ríos naturales, como lo mencionan Singh et al. (2017). Al encontrar la dosificación adecuada, en la segunda etapa se fabrican 20 ladrillos más, para revisar

Tabla 1. Composición química del polvo de mármol.
Fuente: Santos et al. (2012).
CC BY-NC-SA

Componente	CaCO ₃	Fe	Al	SiO ₂
Contenido	95 %	0,038 %	0,10 %	1,02 %

si es posible quitar el curado en el proceso de fabricación.

Dimensiones de los especímenes

Se consideran las dimensiones propuestas de acuerdo con el resultado que reportaron Betancourt et al. (2015), quienes mencionan que ni la forma ni las dimensiones afectan la resistencia a compresión en concreto con polvo de mármol. En los moldes para fabricar los ladrillos se usó madera, la cual facilita el descimbrado y el manejo del molde.

Matriz de ensayos

En las dosificaciones propuestas en el presente estudio se utilizaron como base los porcentajes de cemento usados por Rangel y Nevarez (2004), quienes consideraron el 12% y el 15% de cemento, se usan estos porcentajes con el objetivo de tener en la mezcla la mayor cantidad de polvo-residuo de mármol y, en consecuencia, que el ladrillo se componga de un 62% de polvo-residuo de mármol, a pesar de los resultados de los estudios de Santos et al. (2012), Bilgin et al. (2012) y Corinaldesi, Moriconi, y Naik (2010) donde demostraron que si se sustituye más del 10% de cemento por polvo de mármol afecta la resistencia a compresión y flexión en el concreto, también Singh, Srivastava y Bhunia (2017) y Singh, Choudhary, Srivastava, Singh y Bhunia, et al. (2017) encontraron que se puede llegar a sustituir hasta 15% de cemento por polvo-residuo de mármol sin tener disminución en la resistencia a compresión.

En las 16 dosificaciones se modificaron las cantidades de cemento, cal y arena manteniendo la cantidad de polvo de mármol. Primero se modificaron las cantidades de cemento para usar la menor cantidad de este material. La arena de río se sustituyó por arena triturada de piedra caliza, ya que en la región objeto de estudio la arena de río escasea. La cal para albañilería se agregó a fin de comprobar las prácticas locales y el beneficio o el daño que genera este producto en combinación con el cemento.

En las tablas 2 y 3 se muestran las dosificaciones usadas en las mezclas que contenían el 12% y el 15% de cemento, respectivamente. Para cada dosificación se realizaron 10 muestras, de las cuales, 3 fueron ensayadas a los 7 días; otras 3, a los 14 días, y 3 más, a los 28 días, y se dejó una pieza como testigo. En todos los casos, la pieza que se tenía como testigo también se ensayó como parte de los especímenes.

Los porcentajes de cal dentro de las mezclas se calcularon en función de la cantidad de cemento agregado. Los valores de los otros materiales se calcularon en función de la cantidad de polvo de mármol en la mezcla. De esta manera, como lo muestran las tablas 2 y 3, se incluyen las 160 piezas que fueron fabricadas en el estudio.

N.º de lote	Polvo de mármol	Arena	Agua	Cemento	Cal
1		20% (río)		12,00%	-
2		20% (triturada)	35%	12,00%	-
3		20% (río)		11,40%	5%
4	15 kg	20% (triturada)		11,40%	5%
5		20% (río)		10,80%	10%
6		20% (triturada)	20%*	10,80%	10%
7		20% (río)		10,20%	15%
8		20% (triturada)		10,20%	15%

Tabla 2. Mezclas con el 12% de cemento.

Fuente: elaboración propia (2018). CC BY-NC-SA

N.º de lote	Polvo de mármol	Arena	Agua	Cemento	Cal
9		20% (río)		15,00%	-
10		20% (triturada)		15,00%	-
11		20% (río)		14,24%	5%
12	15 kg	20% (triturada)	20%	14,24%	5%
13		20% (río)		13,50%	10%
14		20% (triturada)		13,50%	10%
15		20% (río)		12,74%	15%
16		20% (triturada)		12,74%	15%

Tabla 3. Mezclas con el 15% de cemento.

Fuente: elaboración propia (2018). CC BY-NC-SA

En las dosificaciones de la investigación se estudiaron los 2 porcentajes de cemento (12% y 15%) a fin de verificar si es posible disminuir la cantidad de cemento necesaria para que el ladrillo alcance la resistencia mínima a compresión para ser considerado un ladrillo estructural. En general, lo que se buscó con estas dosificaciones fue alcanzar la resistencia a compresión de 6,9 MPa que indica la norma NMX-C-404 (2012) para ladrillos estructurales sólidos con longitudes < 300 mm.

Para la elaboración de los ladrillos se hizo la mezcla con los agregados en estado seco; las cantidades fueron las que se indican en las tablas 2 y 3, se mezclaron y, finalmente, se agregó agua hasta tener una mezcla con la consistencia adecuada para ser puesta en los moldes.

El llenado de los moldes con la mezcla se hizo en dos capas, donde se ponía una capa de aproximadamente la mitad de la altura y se le daban de cuatro a cinco golpes alrededor del molde, y en la segunda capa se hacía lo mismo y se enrasaban sin tener ninguna compactación.

Resultados

Elaboración de ladrillos

El polvo de mármol que es extraído del lugar de almacenamiento contiene algunos residuos, como basura o grumos; estos últimos se forman por la humedad que existe en el aire o por las

lluvias. Por lo anterior, fue necesario tamizar el material por la malla N.º 40 (0,42 mm), y, de este modo, separar los trozos de mármol, los grupos y la basura. Los trozos de mármol y basura se deben retirar del material, pero los grupos pueden demolerse para volver a convertirlos en polvo. Al igual que el polvo de mármol, la arena de río también se debe tamizar, pero utilizando la malla N.º 4 (4,76 mm) para extraer las piedras o los residuos que pueda contener. Una vez los materiales tienen las características de limpieza y dimensiones requeridas, el polvo de mármol, la arena y el cemento se mezclan en seco para lograr una mezcla homogénea de agregados. Ya mezclados los materiales en seco, se agrega agua. La primera cantidad de agua debe ser la que se indica en cada dosificación, y después se agrega un poco más de agua, según la necesidad de la mezcla, para que pueda acomodarse en la cimbra y lograr piezas sólidas. Para el caso objeto de estudio, no fue suficiente la cantidad de agua inicial, establecida en la dosificación del 20 % o el 35 %, y se agregó el 5 % más de agua.

A la cimbra se le aplicó un desmoldante para evitar que los ladrillos se pegaran a la cimbra al momento de quitarlas del molde. En este caso, a los moldes se les aplicó aceite automotor usado, para así facilitar la extracción de las piezas de los recipientes. En el presente estudio se usó dicho material porque es fácil de conseguir, se reusa para no contaminar el medio ambiente y no genera ningún efecto secundario en las piezas como, por ejemplo, que las piezas queden con algún color u olor inapropiados, o que puedan perder su resistencia a compresión.

De cada mezcla se obtuvieron 10 especímenes, identificados con las series de L1-M1 a L1-M10 (Lote 1, Muestra 1 hasta 10, etc.). Estos especímenes fueron saturados en agua y curados por 7, por 14 y por 28 días, antes de ser ensayados a compresión. En la figura 1 se muestran los 10 especímenes con su respectiva nomenclatura.

En la primera etapa el curado consistió en saturar en agua los ladrillos, ya que es el proceso de curado más común. En la segunda etapa se busca eliminar el curado por la cantidad de agua que se usa, y para verificar si es posible, en este proceso se construyen 20 ladrillos adicionales, con la dosificación que resulte con mejor comportamiento a compresión de las 16 estudiadas en la primera etapa. Los 20 ladrillos serán divididos en 2 grupos; 10 ladrillos serán curados, y los otros 10 ladrillos, no, para comparar su capacidad a compresión y definir si es conveniente omitir el curado en los ladrillos.

Descripción de ensayos

Para el ensayo a compresión es necesario dejar secar los ladrillos por completo, pues si llegaron a contener humedad, esta ayuda a los polvos a comprimirse ante la carga. De esa manera, los ladrillos podrían no presentar falla, y así obtener-

se resultados altos, pero no confiables; por tanto, los ladrillos se dejaron secar a la intemperie por 24 horas antes del ensayo a compresión.

Para la prueba de absorción de los ladrillos se usó el procedimiento indicado por la norma NMX-C-037-ONNCCE-2013. Por ello, se usaron 3 especímenes de ladrillos de cada dosificación y se saturaron en agua durante 24 horas. La capacidad de absorción de los especímenes se calculó con la ecuación 1. Este parámetro permitió obtener el porcentaje de agua que absorbe cada uno de los ladrillos:

$$(1) \quad H\% = \frac{ph - ps}{ps} \times 100$$

Donde H es el porcentaje de humedad que absorbe la pieza, y ph y ps son el peso de la pieza húmeda y de la pieza seca, respectivamente.

Las pruebas de adherencia entre ladrillos se incluyeron en el estudio porque se observó que algunos ladrillos tenían una superficie de contacto muy lisa, lo cual podría generar la posibilidad de que estos ladrillos no lograran adherirse entre sí, y provocar, por tanto, que no alcanzaran la resistencia a compresión adecuada. Las pruebas de adherencia entre los ladrillos se hicieron con base en los lineamientos de la norma NMX-C-082-ONNCCE-2013. Las muestras utilizadas para las pruebas de adherencia entre ladrillos son las mismas que corresponden a los 3 muretes construidos para determinar la resistencia a compresión en muretes.

Los muretes se construyeron con ladrillos sin curar; se siguieron al respecto las indicaciones de las Normas Técnicas Complementarias para Mampostería del Distrito Federal (Gaceta Oficial del D. F., 2004). Los muretes se forman con tres ladrillos, a los cuales se les aplicó una carga vertical para determinar la resistencia a compresión. El mortero que se usó en la unión de las piezas sí se sometió a curado y se dejó transcurrir el tiempo necesario para que el mortero alcanzara una resistencia a compresión adecuada, de 8,5 MPa.

En la construcción de los muretes, la boquilla que se usó fue de 6 mm. Según las recomendaciones reportadas por Salais y Ponce (2015). La proporción del mortero cemento-arena 1:4, que se usa es de acuerdo con la recomendación de Arrañaga et al. (2016), que indica cuál es la proporción que alcanza una resistencia de 8,5 MPa a compresión.

Resultados de los ensayos

En la figura 2 se muestra la variación de la resistencia a compresión de los ladrillos a edad de 7, 14 y 28 días, de las 16 dosificaciones. Para determinar la resistencia se consideró un área de contacto en la aplicación de la carga de 18.400 mm². En la figura 2 se observa que la resistencia a compresión a los 7 días es mayor en la dosificación 7, que contiene arena de río, el 10,2% de cemento y el 15% de cal. A los 14 días, la dosificación 7



Figura 1. Muestras de especímenes del lote 1.

Fuente: elaboración propia (2018). CC BY-NC-SA

presentó la mayor resistencia a compresión. Por último, a los 28 días, las dosificaciones 12 y 16 fueron las que presentaron la mayor resistencia a compresión. La cantidad de cemento de la dosificación 12 es el 1,5% mayor que la cantidad de cemento de la dosificación 16. Los resultados de resistencia a compresión expuestos en la figura 2 permiten deducir que la resistencia a compresión aumenta rápidamente entre 0 y 7 días de edad, y que alcanza, aproximadamente, el 82% de la resistencia máxima, mientras que entre los 7 y los 14 días el aumento de la resistencia a compresión es pequeño: aproximadamente, se eleva al 15% de su resistencia, y con una edad de entre 14 y 28 días su incremento es aún menor: aproximadamente, el 3%. El ensaye se realizó según la NMX-C-036-ONNCCE-2013.

La variación de resistencias a compresión entre los 14 y los 28 días es de 0,06 MPa; por lo tanto, se puede considerar aceptable la resistencia a los 14 días omitiendo ensayar a los 28 días. Kore y Vyas (2016) encontraron que la resistencia a compresión a 28 días de piezas que contienen lodo de mármol varió en el 18% con respecto a las muestras que no lo tienen; dichos autores argumentaron que el hecho de tener polvo de mármol no afecta significativamente al incremento de resistencia a los 28 días. En la tabla 4 se muestran los resultados promedio de los lotes de ensayos a compresión a 7, a 14 y a 28 días de edad de los especímenes, así como la desviación estándar y el coeficiente de variación de los resultados. En la primera columna de la tabla se indica el grupo de muestras, que para el caso corresponde a las 16 dosificaciones ensayadas. En las siguientes 3 columnas se encuentra la información a los 7 días de edad de las muestras con la resistencia a compresión promedio, que corresponde a 2,53 MPa, así como la desviación estándar, con 0,79 MPa, y el coeficiente de variación, con el 31,3%, respectivamente.

En la tabla 4 se observa que los ladrillos tienen una baja resistencia a compresión, debido a la cantidad de polvo de mármol, pues mientras más se agrega polvo-residuo de mármol a una mezcla de concreto, tanto más disminuye la resistencia a compresión y a flexión, según Santos et al. (2012), Bilgin et al. (2012) y Corinaldesi et al. (2010).

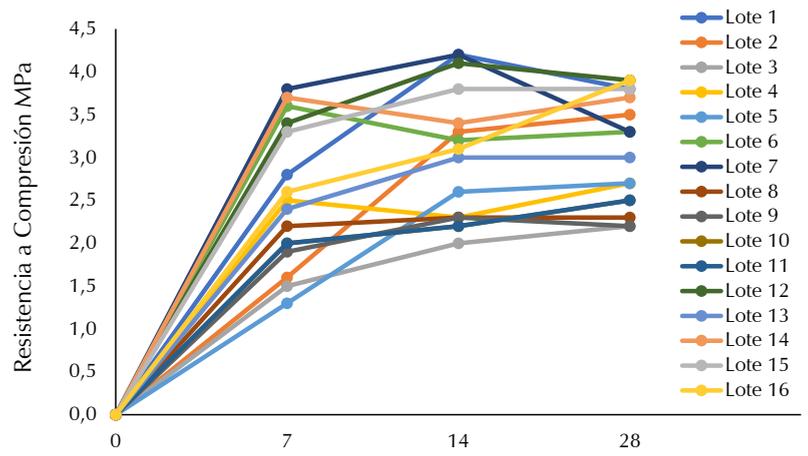


Figura 2. Variación de la resistencia a compresión de los ladrillos con los días de curado.

Fuente: elaboración propia (2018). CC BY-NC-SA

Grupo	Día 7			Día 14			Día 28		
	Promedio, MPa	σ	C.V. (%)	Promedio, MPa	σ	C.V. (%)	Promedio, MPa	σ	C.V. (%)
1	2,53	0,79	31,3	3,01	0,74	24,80	3,07	0,62	20,5

Los ensayos de absorción evidenciaron que el valor promedio de la absorción de agua es del 21% y que el coeficiente de variación es del 7,7%. Dicho valor de absorción es mayor que el valor límite, del 19%, que indica la norma NMX-C-037-ONNCCE-2013. Esto se debe a la cantidad de polvo de mármol que tienen los ladrillos, debido a que el óxido de Calcio (CaO) es muy reactivo y al tener contacto con el agua forma hidróxido de calcio (CaO(OH)₂) (Bilgin et al., 2012), lo cual genera porosidad en los ladrillos, y, en consecuencia, mayor absorción; por lo tanto, los ladrillos no cumplen con el valor límite de absorción, y se debe mejorar la absorción de humedad en los ladrillos. Cabe mencionar que la absorción hallada coincide con los resultados que obtuvieron Bilgin et al. (2012), los cuales muestran que al agregar el 70% de polvo de mármol al concreto para fabricar ladrillos se tiene una absorción de entre el 30% y el 40%; por lo tanto, se puede decir que si se aumenta el polvo de mármol en una mezcla, también aumenta la absorción.

Tabla 4. Resistencia a compresión promedio, desviación estándar y C. V.

Fuente: elaboración propia (2018). CC BY-NC-SA

En la figura 3 se muestra el ensayo a compresión de uno de los muretes. De estos ensayos realizados a los muretes se obtuvo que el valor promedio de resistencia a compresión es de 1,9 MPa, con un coeficiente de variación del 15,3%. En la misma figura se observa cómo el espécimen mantiene los ladrillos unidos entre ellos por el mortero, lo cual hace evidente que existe buena adherencia entre ellos para trabajar a compresión. Para la construcción de los muretes fue necesario humedecer los ladrillos: si los ladrillos no se humedecen, no se tiene la suficiente adherencia entre ellos al momento de unirlos con el mortero.

A partir de los resultados de los ensayos a compresión, en el presente estudio se considera



Figura 2. Muretes de ladrillos.

Fuente: elaboración propia (2018). CC BY-NC-SA

Grupo	Día 7		Día 14	
	Promedio, MPa	C. V. (%)	Promedio, MPa	C. V. (%)
1	2,6	12	3,1	14
2	2,6	14	2,5	16

Tabla 5. Valor medio de la resistencia a compresión.

Fuente: elaboración propia (2018). CC BY-NC-SA

que la dosificación 16 es la del mejor desempeño, tomando en cuenta que dicha dosificación es la que tiene menor cantidad de cemento y contiene arena triturada, además de tener un comportamiento creciente en los resultados de los ensayos a compresión. Con la dosificación 16 se fabricaron 20 ladrillos adicionales, divididos en dos grupos de 10 piezas. A un grupo de 10 piezas se lo sometió a curado con los procedimientos que recomienda la norma NMX-C-148-ONNCCCE2007. El segundo grupo de 10 piezas no fue sometido a ningún tipo de curado. En el presente estudio se realiza el ensayo de ladrillos a compresión curados y sin curar. Los 2 nuevos lotes de 10 piezas fueron ensayados a compresión a 7 y a 14 días, al considerar que en las 16 dosificaciones ensayadas durante la etapa anterior no se observaron incrementos significativos en la resistencia a compresión entre los ensayos a los 14 y a los 28 días de edad.

En la tabla 5 se muestran los valores promedio de resistencia a compresión de los ladrillos curados y los que no están curados. En la tabla 5, el grupo 1 corresponde a los ladrillos que están curados, y el grupo 2, a los ladrillos sin curar. En dicha tabla se observa que a los 14 días existe una diferencia del 20% entre los ladrillos curados y los que no están. Dicha diferencia muestra que no es necesario tener un curado para alcanzar más resistencia a compresión en las piezas, pues la resistencia de 3,1 MPa es adecuada para trabajar a compresión en muros de vivienda de baja altura.

Discusión

Las resistencias a compresión obtenidas con valores más pequeños que los que exige la norma se deben a la cantidad de polvo de mármol que contiene la pieza, como lo mencionan Singh et al. (2017) y Santos et al. (2012): al aumentar la cantidad de polvo de mármol, la resistencia a compresión disminuye; por lo tanto, los valores que Singh et al. (2017)

y Santos et al. (2012) recomiendan sustituir son los del 10% de polvo de mármol por cemento, para que no se afecte la resistencia a compresión.

Para el presente estudio se usó un porcentaje del 62% de polvo de mármol, mayor que el recomendado por Singh et al. (2017) y Santos et al. (2012), razón que afecta la resistencia a compresión; por lo tanto, a fin de lograr que los ladrillos alcancen los 6,9 MPa que indica la Norma Mexicana (NMX-C-404ONNCCCE-2012) para ladrillos estructurales, se deben seguir ensayando dosificaciones o plantear técnicas de fabricación idóneas para alcanzar dicho valor.

La fabricación de ladrillos a base de polvo de mármol es factible, como lo mencionan Betancourt et al. (2015), así como Rangel y Nevarez (2014); al no someterse a un proceso de cocción, se reduce el impacto ambiental. Bilgin et al. (2012) mencionan que agregar polvo de mármol a los ladrillos contribuye a disminuir el costo, por cuanto se usa un material de desecho, y, al mismo tiempo, se apoya a la ecología. Gencil et al. (2012) concluyen que los blocks que ellos fabrican con polvo de mármol tienen mejor resistencia al desgaste abrasivo.

En el presente trabajo se logró definir la técnica adecuada para fabricar los ladrillos. Además, se encontró una dosificación ideal a fin de que alcancen la resistencia a compresión para elementos no estructurales según la norma. Se encontró también la forma correcta de mezclar los materiales, y, finalmente, se fabricó un molde para que las piezas tuvieran una apariencia correcta sin dañarse. Con base en lo anterior, es posible construir muros de mampostería en viviendas de baja altura como elementos no estructurales.

Conclusiones

Los resultados experimentales reportados en este artículo demuestran que es viable elaborar ladrillos a base de polvo-residuo de mármol para construir muros de mampostería en viviendas de baja altura, de hasta 3,5 m, en zonas de amenaza sísmica baja.

En el presente trabajo se logró establecer la dosificación con el mejor desempeño a compresión y adherencia, así como la mezcla más económica al sustituir cemento por cal comercial de albañilería.

La dosificación que presenta buenos resultados para la fabricación de los ladrillos es la número 16, la cual se compone del 12,74% de cemento y el 15% de cal. De esta forma se logra dar uso al polvo de mármol a favor de disminuir la contaminación por acumulación del polvo de dicho material a la intemperie.

En lo referente a la absorción, el resultado que se obtuvo es del 21%, lo cual, a su vez, tiene una diferencia del 2% con el máximo que indica la norma, que es del 19%. La absorción en los ladrillos afecta la humedad que pierde el mortero al

momento de unirlos. Este efecto se soluciona aplicando una cantidad de agua a los ladrillos antes de ser unidos con el mortero. Dejar sin humedecer los ladrillos provoca que estos absorban toda la humedad del mortero, lo cual hace que se pierda adherencia por la pérdida de humedad. El humedecimiento de los ladrillos también ayuda a quitar todo el polvo que puedan tener estos, y si se quita dicho polvo se logra una mejor adherencia. De la adherencia obtenida se concluye que es suficiente entre las piezas para que puedan trabajar a compresión, sin agregar modificación alguna al ladrillo o al mortero.

Se puede omitir el curado en la fabricación de los ladrillos, pues la diferencia de resistencias entre los ladrillos curados y los que no están es del 20% y se considera que el incremento es poco.

Los resultados a compresión vertical en muretes presentan resultados de 1,9 MPa, y se los considera aceptables para usarse en muros de vivienda, ya que este material es más adecuado que los que actualmente se usan (desecho urbano).

En las dosificaciones ensayadas se observó cómo las mezclas que presentan los mayores valores de resistencia a compresión son las que tienen arena caliza triturada, en vez de arena de río.

Otra ventaja de la dosificación 16, elegida como la adecuada, es que logra la resistencia a compresión con menor cantidad de cemento, en comparación con la que tiene la dosificación 12.

Los valores bajos de resistencia a compresión indican que es necesario seguir estudiando dosificaciones que permitan alcanzar la resistencia de 6,9 MPa estipulada por la norma mexicana (NMX-C-404ONNCCE-2012). Para modificar las dosificaciones se deben hacer estudios químicos y físicos de los materiales, a fin de establecer la dosificación adecuada de los agregados para alcanzar la resistencia a compresión necesaria en ladrillos estructurales.

Una vez definidas la dosificación correcta y la resistencia a compresión de piezas estructurales, se deberán realizar ensayos para encontrar las propiedades de los materiales, tales como resistencia a tensión, módulo de elasticidad y análisis de ciclo de vida.

Finalmente, en próximos estudios se pretende construir muros de mampostería en una vivienda escala 1:1 de baja altura y validar los resultados obtenidos en el presente trabajo en la investigación.

Referencias

- Arriaga, A., Ponce C., Pérez Gómez, M. G. (2016). *Comparación Físico-Mecánica de morteros para unir block y definir su conveniencia. La vivienda. Vulnerabilidad ante el desarrollo humano Balam*.
- Betancourt, J., Lizárraga, L., Narayanasamy, R., Olgún, F., Sáenz, A. (2015). Revisión sobre el uso de residuos de mármol, para elaborar materiales para la construcción. *Revista de Arquitectura e Ingeniería* 9(3), 1-12. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193943013004>
- Bilgin, N., Yeprem, H. A., Arslan, S., Bilgin, A., Günay, E. y Marşoglu, M. (2012). Use of waste marble powder in brick industry. *Construction and Building Materials*, 29, 449-457. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.011>
- Corinaldesi, V., Moriconi, G., y Naik, T. (2010). Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, 24, 113-117. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.013>
- El-Sayed, H. A., Farag, A. B., Kandeel, A. M., Younes, A., Yousef, M. M. (2016). Characteristics of the marble processing powder waste at Shaq El-Thoaban industrial area, mEgypt, and its suitability for cement manufacture. *HBRC Journal*, 14, 171-179. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2016.06.002>
- Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH). (2016). *Nueva serie INEGI*. <https://www.inegi.org.mx/programas/enigh/nc/2016/>
- Gencel, O., Ozel, C., Koksall, F., Erdogmus, E., Martínez-Barrera, G., y Brostow, W. (2012). Properties of concrete paving blocks made with waste marble. *Journal of Cleaner Production*, 21(1), 62-70. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.08.023>
- Kore, S. y Vyas, A. K. (2016). Impact of marble waste as coarse aggregate on properties of lean cement concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 4, 85-92. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2016.01.002>
- López, A., Pérez Gómez, G. y Valdez, R. (2012). Revaloración constructiva de la vivienda de precaria en la periferia de la ciudad de Torreón, Coahuila, México. *Reporte técnico en proyecto de consolidación de cuerpos académicos en formación*. PRODEP.
- Norma Mexicana de la Industria de la Construcción del Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. NMX-C-036-ONNCCE-2013.
- Norma Mexicana de la Industria de la Construcción del Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. NMX-C-037-ONNCCE-2013.
- Norma Mexicana de la Industria de la Construcción del Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. NMX-C-148-ONNCCE-2007.
- Norma Mexicana de la Industria de la Construcción del Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. NMX-C-404-ONNCCE-2012.
- Norma Mexicana de la Industria de la Construcción del Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. NMX-C-441-ONNCCE-2013.
- Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería Reglamento de construcciones del Distrito Federal. (2004). *Gaceta Oficial del Distrito Federal*.
- Rangel, L. y Nevarez, C. (2014). *Estudio experimental para elaborar ladrillos con residuos de mármol (polvo)*. (Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería de la Universidad Juárez del Estado de Durango, México).
- Santos, A., Villegas, N. y Betancourt, J. (2012). Residuo de mármol como insumo en la construcción civil - diagnóstico de la Comarca Lagunera. *Revista de la Construcción*, 11(2), 17-26. www.redalyc.org/service/redalyc/downloadPdf/1276/127625512007/1
- Salais, L., y Ponce, C. (2015). *Espesor óptimo en junta de muros de mampostería con tabique recocado en fabricación artesanal* (tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería de la Universidad Juárez del Estado de Durango, México).
- Salgado, O. L. y Molar, M. (2017). Diagnóstico de viviendas de bajo recurso en Torreón, Coahuila. En *Compendio Investigativo de Academia Journals Fresnillo 2017* (pp. 1631-1635). <http://www.academiajournals.com/pubfresnillo>
- Secretaría de Economía (SE). *Perfil del mercado del mármol*. Dirección General de Desarrollo Minero, México 2016.
- Shahul, H. y Sekar, A. (2009). Properties of green concrete containing quarry rock dust and marble sludge powder as fine aggregate. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4(4), 83-89. http://www.arpnjournals.com/jeas/research_papers/rp_2009/jeas_0609_202.pdf
- Singh, M., Srivastava, A. y Bhunia, D. (2017). An investigation on effect of partial replacement of cement by waste marble slurry. *Construction and Building Materials*, 134, 471-488. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.155>
- Singh, M., Choudhary, K., Srivastava, A., Singh, K. S. y Bhunia, D. (2017). A study on environmental and economic impacts of using waste marble powder in concrete. *Journal of Building Engineering*, 13, 87-95. <https://doi.org/10.1016/j.job.2017.07.009>
- Secretaría de Salud. (2016). (SS) Coahuila, México. <http://www.saludcoahuila.gob.mx/>