

LADRILLOS A BASE DE DESECHOS DE MÁRMOL, UNA PROPUESTA SUSTENTABLE

Brick made of marble waste, a sustainable proposal

Julio Roberto BETANCOURT-CHÁVEZ^{1*}, María Azucena GONZÁLEZ-LOZANO²
y Juan RENTERÍA-SOTO¹

¹ Universidad Juárez del Estado de Durango, Campus Gómez Palacio, Avenida Universidad s/n, Colonia Fila-delfia, 35010 Gómez Palacio, Durango, México.

² Universidad Juárez del Estado de Durango, Av. Veterinaria s/n, Circuito Universitario, Colonia Valle del Sur, 34120 Durango, Durango, México.

*Autor para correspondencia: jbetancourt@ujed.mx

(Recibido: noviembre de 2021; aceptado: marzo de 2023)

Palabras clave: ladrillos no estructurales, residuos de mármol, desechos de construcción.

RESUMEN

Es muy conocido que los recursos naturales se están deteriorando mucho más allá de su tasa de renovación. La sobreexplotación y la emisión de sustancias contaminantes nocivas están llevando a cambios potencialmente irreversibles, poniendo en riesgo la estabilidad de los ecosistemas. En este sentido es necesario —y es tarea de todos— buscar la manera de reutilizar los residuos que se producen como desechos industriales que no cuentan con un plan de manejo. Este trabajo presenta resultados sobre la factibilidad de utilizar polvo de mármol de desecho como material base para la fabricación de ladrillos no estructurales. Los ladrillos fueron fabricados con mezclas de polvo de mármol, cemento Portland, arena y agua; las pastas fueron moldeadas, prensadas y curadas con agua a temperatura ambiente. La resistencia a la compresión fue evaluada siete, 14 y 28 días después del curado. La absorción de agua fue medida en las muestras curadas, después de ser secadas a 100 °C por 24 h. La estructura y microestructura de los ladrillos fue caracterizada por espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier, microscopía electrónica de barrido y difracción de rayos X. Los resultados obtenidos en cuanto a la absorción de agua y resistencia a la compresión, indican que los ladrillos con 28 días de curado podrían ser utilizados como ladrillos no estructurales, ya que cumplen con los parámetros de referencia marcados en las normas mexicanas.

Key words: non-structural brick, marble waste, construction waste.

ABSTRACT

It is well known that natural resources are deteriorating well beyond their renewal rate. The overexploitation and emission of harmful pollutants are leading to potentially irreversible changes, putting the stability of ecosystems at risk. In this sense, finding a way to reuse industrial waste that does not have a management plan is necessary and is the responsibility of all. This work presents results on the feasibility of using waste marble dust as a base material for the manufacture of non-structural bricks. The bricks were made with mixtures of marble dust, Portland cement, sand, and water; the pastes were

molded, pressed and cured with water at room temperature. The compressive strength was evaluated at seven, 14, and 28 days after curing. Water absorption was measured in the cured samples, after being dried at 100 °C for 24 h. The structure and microstructure of the bricks was characterized by Fourier transform infrared spectroscopy, scanning electron microscopy, and X-ray diffraction. The results obtained for water absorption and compressive strength indicate that the bricks with 28 days of curing could be used as non-structural bricks, since they comply with the reference parameters established in the Mexican standards.

INTRODUCCIÓN

Es sabido que los procesos industriales generan diferentes y abundantes residuos, muchos son inorgánicos, lo que provoca daños a los recursos naturales y al ambiente, degradación y aceleramiento del calentamiento global (Khan et al. 2020). En este sentido, se ha enfocado al manejo y tratamiento de residuos sólidos, incluidos aquellos derivados de la industria minera y las involucradas en la extracción de piedra natural como el mármol (Ruiz-Sánchez et al. 2019).

El mármol es una roca metamórfica formada por granos de calcita y dolomita finamente cristalizados. El 99 % de este material está compuesto por CaCO_3 y contiene también MgO , SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , y en menor proporción K_2O , P_2O_5 , MnO , S , F , Cu , Pb y Zn (Ruiz-Sánchez et al. 2019).

En algunos trabajos se han utilizado residuos de mármol en mezclas para concreto autocompactable, adicionando polvo de mármol como relleno, en sustitución del cemento, y se ha llegado a la conclusión de que las características mecánicas son muy similares a los concretos de referencia (Valdez et al. 2011, Uygunoglu et al. 2014). Shelke et al. (2012) elaboraron mezclas de concreto utilizando como sustituto parcial del cemento humo de sílice (8 % fijo) y polvo de mármol en diferentes porcentajes (0, 8, 10 y 12 %). Estos investigadores observaron que la trabajabilidad disminuyó ligeramente poco y la resistencia a la compresión se incrementó al agregar humo de sílice al 8 % en combinación con 8 % de polvo de mármol.

Por otro lado, se ha encontrado que el uso de residuos de mármol como agregado grueso en concretos tiene un desempeño similar al concreto tradicional en algunas de sus características físicas y mecánicas (André et al. 2014), principalmente en términos de durabilidad, y se ha determinado que su uso es muy factible. Shalul y Sekar 2009 experimentaron con el uso de polvo de cantera y mármol, y Hebhoub et al. (2011) utilizaron piedra de mármol en sustitución

de los agregados del concreto. En ambos estudios se llegó a la conclusión de que el uso de hasta un 75 % de agregados producidos con residuos de mármol es muy beneficioso para la resistencia de estos materiales a la compresión.

Mucha de la información encontrada en la literatura se enfoca al uso de desechos de mármol como material de relleno o materia prima para producir materiales cementosos y cerámicos sinterizados a altas temperaturas. Esta investigación se enfocó al desarrollo de un proceso para producir ladrillos no estructurales cuyo material base es mármol de desecho.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la elaboración de tabiques se utilizaron como materias primas los siguientes materiales: desecho de mármol en polvo proporcionado por la empresa Mármoles Parra, ubicada en la región noreste del estado de Durango, México, el cual se obtuvo de manera aleatoria en los depósitos de dicha empresa y posteriormente se realizó la mezcla y el cuarteo para obtener una muestra representativa conforme al método indicado por Crespo (1998); cemento portland compuesto; arena proveniente del lecho seco del río Nazas, y agua potable tomada de la red general de la ciudad de Gómez Palacio. La composición química y mineralógica, así como las características físicas del mármol utilizado, se presentan en el **cuadro I**, mientras que el análisis granulométrico se muestra en la **figura 1**. Asimismo, las características físicas de la arena y el análisis de cribas se presentan en el **cuadro II** y la **figura 2**, respectivamente. Por otra parte, al agua utilizada para todos los experimentos se le realizó el análisis físico y químico respectivo, para lo cual se tomaron dos muestras (frasco 1 y frasco 2) y se hicieron tres repeticiones del análisis. Los resultados se presentan en el **cuadro III**.

La fabricación de ladrillos con 12 (PMA1) y 15 % de cemento (PMA2) se realizó mezclando y homogeneizando los componentes secos de la mezcla, a la que

CUADRO I. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y MINERALÓGICAS DEL MÁRMOL.

Propiedades físicas	Composición química (% peso)	Fases minerales
Peso volumétrico 1400 kg/m ³	CaCO ₃ (95.0) Fe (0.038)	Calcita, cuarzo y dolomita
Densidad 2780 kg/m ³	Al (0.10) SiO ₂ (1.02) Otros (3.842)	

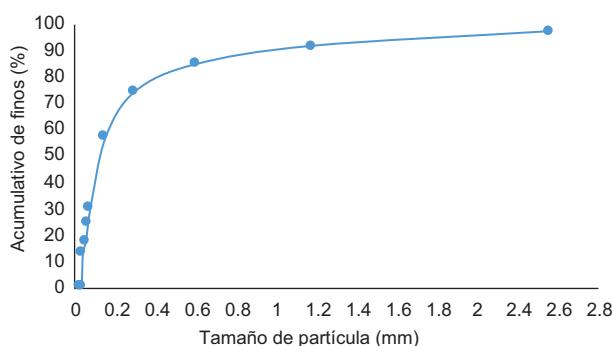


Fig. 1. Análisis granulométrico del mármol.

CUADRO II. CARACTERÍSTICAS DE LA ARENA.

Propiedad	Valor
Peso volumétrico seco suelto	1310 kg/m ³
Peso volumétrico seco varillado	1450 kg/m ³
Densidad	2.88 g/cm ³
Absorción	3.09 %

después se adicionó agua y se mezcló hasta formar una masa plástica cuya composición se muestra en el **cuadro IV**. Enseguida se vertió la mezcla en moldes de acero de 12 × 24 × 10 cm y se pasó a una prensa manual aplicando una presión de 0 a 100 kg/cm² en

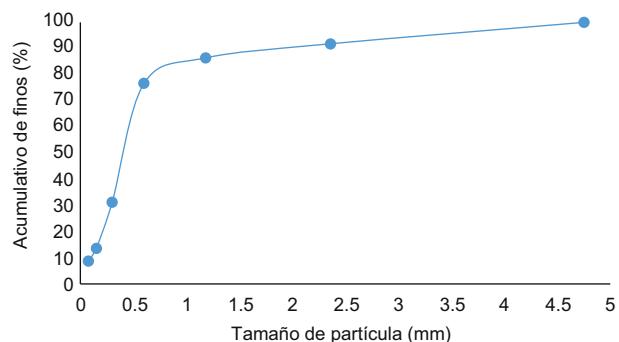


Fig. 2. Análisis de cribas de la arena. Más del 90 % de la arena tiene tamaño de partícula menor a 2.36 mm.

CUADRO IV. COMPOSICIONES INVESTIGADAS: LADRILLOS CON 12 % DE CEMENTO (PMA1) Y LADRILLOS CON 15 % DE CEMENTO (PMA2).

Muestra	Mármol (g)	Arena (g)	Cemento (g)	Agua (mL)
PMA1	800	200	120	200
PMA2	800	200	150	200

1 min y manteniendo la presión por 1 min más. Posteriormente se dejaron reposar 24 h y se sometieron a curado por inmersión durante 7, 14 y 28 días (el proceso se muestra en la **figura 3**). Se fabricaron 10 ladrillos para cada mezcla, pero sólo se ensayaron ocho, dejando dos especímenes como controles del experimento. Pasado el tiempo de curado se obtuvo la masa húmeda secando superficialmente las muestras. Inmediatamente después se introdujeron al horno para su secado por 24 h a 100 °C; posteriormente se sacaron del horno y se dejaron enfriar a temperatura ambiente para obtener su masa en seco. Asimismo,

CUADRO III. ANÁLISIS FÍSICO Y QUÍMICO DEL AGUA.

Muestra	Ca (mEq/L)	Mg (mEq/L)	CO ₃ mEq/L	HCO ₃ (mEq/L)	Cl (mEq/L)	pH	CE (μS/cm)
Repetición 1	9.2	9.6	0	23.2	10.26	7.66	1.113
Repetición 2	10.4	7.6	0	24	9.91	7.78	1.13
Repetición 3	11.6	11.2	0	24.8	10.26	7.82	1.13
Frasco 1						7.83	1.15
Repetición 1	11.2	8.4	0	23.2	9.57	7.54	1.1
Repetición 2	13.2	5.2	0	22	10.26	7.62	1.1
Repetición 3	11.2	8	0	20.8	10.94	7.62	1.12
Frasco 2						7.62	1.1

CE: conductividad eléctrica.



Fig. 3. Proceso de elaboración de ladrillos. a) Materiales en seco, b) llenado del molde, c) prensado de la mezcla y d) desmolde del ladrillo.

los ensayos en compresión se realizaron sobre los ladrillos secos usando un equipo marca CONTROLS C 820/0Z. Las pruebas se realizaron usando los parámetros de referencia marcados en las normas mexicanas NMX-C-037-ONNCCE-2013 (ONNCCE 2013a) y NMX-C-036-ONNCCE-2013 (ONNCCE 2013c) para absorción de agua y resistencia a la compresión, respectivamente.

La estructura y microestructura de los ladrillos fue analizada mediante espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (IRTF), microscopía electrónica de barrido (MEB) y difracción de rayos X (DRX). Las muestras para IRTF fueron preparadas moliendo un trozo de ladrillo hasta hacerlo pasar a través de una malla 200 ($75 \mu\text{m}$). Posteriormente se mezcló con KBr y se prensó hasta formar una pastilla, la cual fue analizada en un espectrómetro SHIMADZU XRD-6000 (Shimadzu, EUA) equipado con un monocromador y tubo de cobre. Se requirieron dos gramos para cada muestra. Las muestras se molieron con un mortero de ágata y se analizaron en un soporte de muestras de aluminio (fracción no orientada) en un ángulo de 2θ con intervalos que van de 4 a 70° y velocidad de $2^\circ/\text{min}$. Para los análisis por MEB, un trozo de ladrillo de cada composición fue desbastado con lijas de SiC de varios granos y pulido. Posteriormente se le dio un recubrimiento con grafito, antes de ser observado en un microscopio marca JEOL JSM-6010LA equipado con espectroscopía de energía dispersiva (EDS).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Absorción de agua

Los resultados de absorción de agua se muestran en el **cuadro V**, donde se puede observar que los

CUADRO V. RESULTADOS DE ABSORCIÓN DE AGUA DE LOS LADRILLOS CON 12 % DE CEMENTO (PMA1) Y LADRILLOS CON 15 % DE CEMENTO (PMA2).

Mezcla	Absorción (%)	Promedio	Desviación estándar
PMA1			
Repetición 1	19.00		
Repetición 2	18.50		
Repetición 3	17.86	18.73	0.59
Repetición 4	19.44		
Repetición 5	18.85		
PMA2			
Repetición 1	17.66	18.16	1.42
Repetición 2	19.65		
Repetición 3	18.70		
Repetición 4	15.97		
Repetición 5	18.85		

ladrillos presentaron valores de 18.16 y 18.76 % para las muestras con 15 y 12 % de cemento, respectivamente. Dichos valores cumplen con la norma mexicana NMX-C-441-ONNCCE-2013 (ONNCCE 2013b) para ladrillos no estructurales, que establece valores de 25 % de absorción máxima. Asimismo, cumple con la norma ASTM C62-12 (ASTM 2012) para ladrillos con intemperismo de grado medio (22 %) y con intemperismo de grado bajo, aunque para estos últimos no se indica un valor. Asimismo, cumple con la norma SCT N-CMT-2-01-002-02 (SCT 2002) para ladrillos prensados de grado B y C, la cual establece una absorción máxima de 20 y 23 %, respectivamente. Sin embargo, la norma mexicana NMX-C-404-ONNCCE-2012 (ONNCCE 2012) sólo contempla como elementos estructurales al tabique recocido o extruido

y bloques de concreto, de manera que los ladrillos fabricados en el presente trabajo no entran en ninguna de las categorías establecidas por la norma. Por lo tanto, podemos establecer que en comparación con los materiales contemplados por la norma, nuestros materiales presentan mejores resultados que los de ladrillos recocidos o extruidos (absorción de 23 y 19 %, respectivamente), pero no superan a los bloques de concreto (absorción máxima de 12 %).

Resistencia mecánica

En la **figura 4** se presentan los promedios de resistencia en compresión para ladrillos curados a 7, 14 y 28 días de las dos mezclas estudiadas, las cuales fueron ensayados conforme a la norma mexicana NMX-C-036-ONNCCE-2013 (ONNCCE 2013c). Se puede apreciar que, para 7 y 14 días, la resistencia a la compresión fue prácticamente igual en cada mezcla, alcanzando valores de 84.9 y 91.6 kg/cm² para las composiciones del ladrillo con 12 % de cemento (PMA1) y ladrillos con 15 % de cemento (PMA2), respectivamente. Sin embargo, a los 28 días se puede apreciar que la resistencia mejoró en ambas mezclas, alcanzando valores de 131.7 y 153.2 kg/cm², para PMA1 y PMA2, respectivamente. Si se comparan estos valores con las normas vigentes en diversos lugares, podemos establecer que los ladrillos cumplen con la resistencia promedio mínima para ladrillos estructurales y no estructurales que establecen las normas mexicanas NMX-C-404-ONNCCE-2012 (ONNCCE 2012) y NMX-C-441-ONNCCE-2013 (ONNCCE 2013a), que son de 110 y 40 kg/cm², respectivamente; además, cumplen con la norma americana ASTM C62-12 (ASTM 2012) para ladrillos con intemperismo de grado bajo (103 kg/cm²), y con la norma N-CMT-2-01-002-02 (SCT 2002) para

ladillos prensados grado A, B y C (140, 80 y 60 kg/cm² respectivamente). Asimismo, todos los ladrillos producidos tienen resistencias superiores a los 50 kg/cm² establecidos en la norma española UNE 41410 (UNE 2008) para bloques de tierra compactada (BTC). Por otra parte, los ladrillos fabricados presentaron resistencias superiores a las reportadas por Flores et al. (2013), González-García y Lizárraga-Mendiola (2015) y Ponce-Peña et al. (2016), para ladrillos de arcilla recocida obtenidos en diferentes regiones de México.

Dimensiones de los elementos

El promedio de las dimensiones de los elementos fue de 23.95 × 12.17 × 5.83 cm para tabiques con 12 % de cemento y de 24.20 × 12.22 × 5.92 cm para tabiques con 15 % de cemento. En el **cuadro VI** se muestran las dimensiones obtenidas para cada ladrillo. En general, todos los elementos cumplieron con las características señaladas en la norma mexicana NMX-C-038-ONNCCE-2013 (ONNCCE 2013d), ya que las piezas no presentaron variaciones significativas en sus dimensiones, pandeo ni mala escuadria.

Caracterización estructural, microestructural y mineralógica

Los resultados de la IRTF para el mármol de desecho y las mezclas PMA1 y PMA2 curadas a 28 días se muestran en la **figura 5**. Todas las muestras presentan en 1460 y 1810 cm⁻¹ las bandas características de las vibraciones de estiramiento de los enlaces C-O correspondientes al radical carbonato; asimismo, se presentan picos agudos en 875 y 712 cm⁻¹, los cuales se pueden atribuir a los enlaces Mg-O, confirmando la presencia de magnesio en las muestras de acuerdo con lo reportado por Khan et al. (2020). Entre 450 y 520 cm⁻¹ se presentan bandas

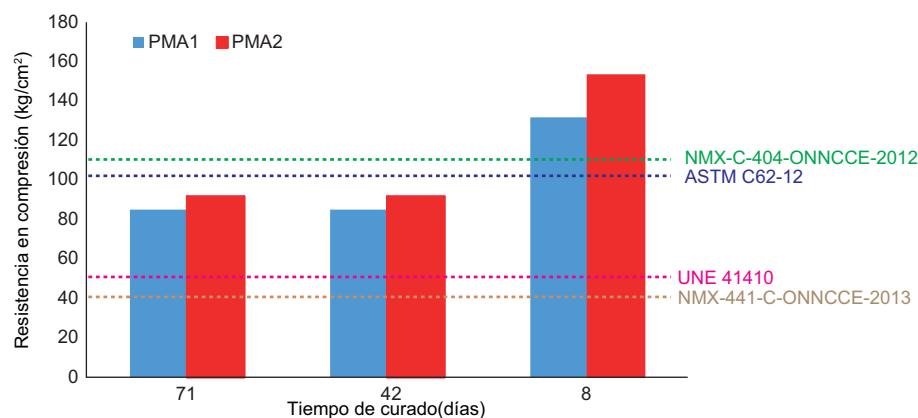


Fig. 4. Resistencia mecánica promedio de los ladrillos con 12 % de cemento (PMA1) y ladrillos con 15 % de cemento (PMA2), con tiempo de curado de 7, 14 y 28 días.

CUADRO VI. DIMENSIONES DE LOS LADRILLOS CON 12 % DE CEMENTO (PMA1) Y LADRILLOS CON 15 % DE CEMENTO (PMA2).

Número de muestra	PMA1*			PMA2*		
	Largo	Ancho	Altura	Largo	Ancho	Altura
1	24.00	12.20	5.70	24.20	12.00	5.80
2	23.90	12.20	5.80	24.00	12.30	6.20
3	24.00	12.20	5.85	24.00	12.30	6.05
4	24.00	12.20	5.70	23.80	12.20	6.00
5	23.90	12.30	5.80	24.30	12.30	5.75
6	23.90	12.10	6.20	23.70	12.10	6.00
7	24.00	12.10	5.90	24.00	12.30	5.82
8	24.00	12.20	5.70	24.30	12.20	6.25
9	23.80	12.20	5.80	23.90	12.20	5.70
10	24.00	12.00	5.85	24.00	12.30	5.70
Promedio	23.95	12.17	5.83	24.20	12.22	5.92

* Dimensiones en cm.

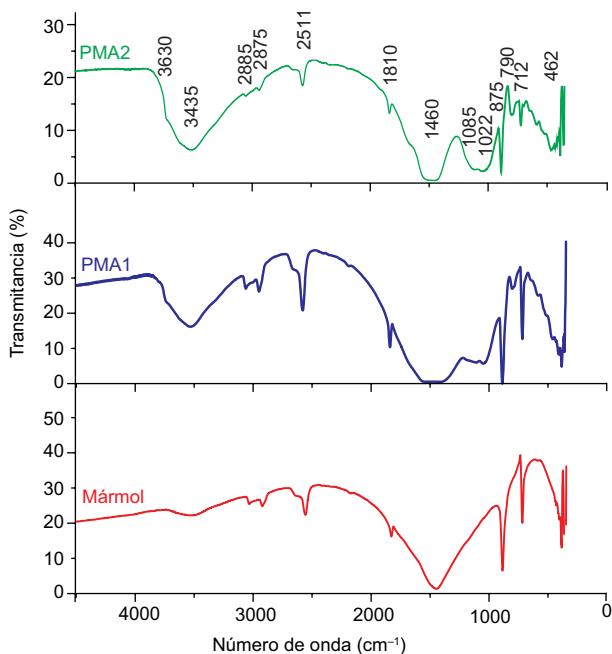


Fig. 5. Resultados de espectroscopía de infrarrojo de los ladrillos con 12 % de cemento (PMA1), ladrillos con 15 % de cemento (PMA2) y el mármol utilizado.

atribuidas a las vibraciones de flexión dentro y fuera de plano de los enlaces Si-O, lo cual reafirma la presencia de pequeñas cantidades de mineral de sílice (José et al. 2020). Además, dichas bandas son más anchas en las mezclas PMA1 y PMA2, lo cual indica mayor presencia de sílice debido al aporte adicional proveniente del cemento. A 1022 y 1085 cm^{-1} se

aprecian dos bandas para ambas mezclas (ausentes en la muestra de mármol) que muestran la presencia de vibraciones de estiramiento asimétricas de los enlaces Si-O, indicativas de la polimerización de unidades silicato (SiO_4) cuando el cemento es hidratado, en concordancia con lo encontrado por José et al. (2020). En 3435 cm^{-1} se presenta una banda ancha correspondiente a la vibración de estiramiento de los enlaces O-H de las moléculas de agua en las muestras; dicha banda es más intensa en las mezclas investigadas en comparación con la del mármol empleado debido a la pasta de cemento hidratado usada como estabilizante. A 3630 cm^{-1} se observa una pequeña banda presente sólo en las mezclas PMA1 y PMA2, asociada a los enlaces O-H del Ca(OH)_2 derivado de las reacciones de hidratación del cemento.

La microestructura de los ladrillos se muestra en las **figuras 6 y 7**, las cuales presentan el mapeo elemental (los colores fueron elegidos al azar, con la intención de resaltar la distribución de cada elemento en la muestra). Los elementos mapeados fueron Ca, C, Si, Al y O, ya que por la composición de las materias primas son los que se encuentran en mayor proporción. Asimismo, se realizaron análisis por EDS a cada muestra. Se aprecia que las mezclas quedaron bien compactadas con pocos huecos y con los componentes integrados de manera homogénea. En los mapeos se aprecia que los elementos Si y Al, provenientes principalmente del cemento Portland, están bien distribuidos en las mezclas, lo que asegura propiedades mecánicas homogéneas. En el análisis EDS de la mezcla PMA2 se incluyeron los elementos Mg, Fe y S, se puede apreciar que el porcentaje de masa es bajo y corresponde a

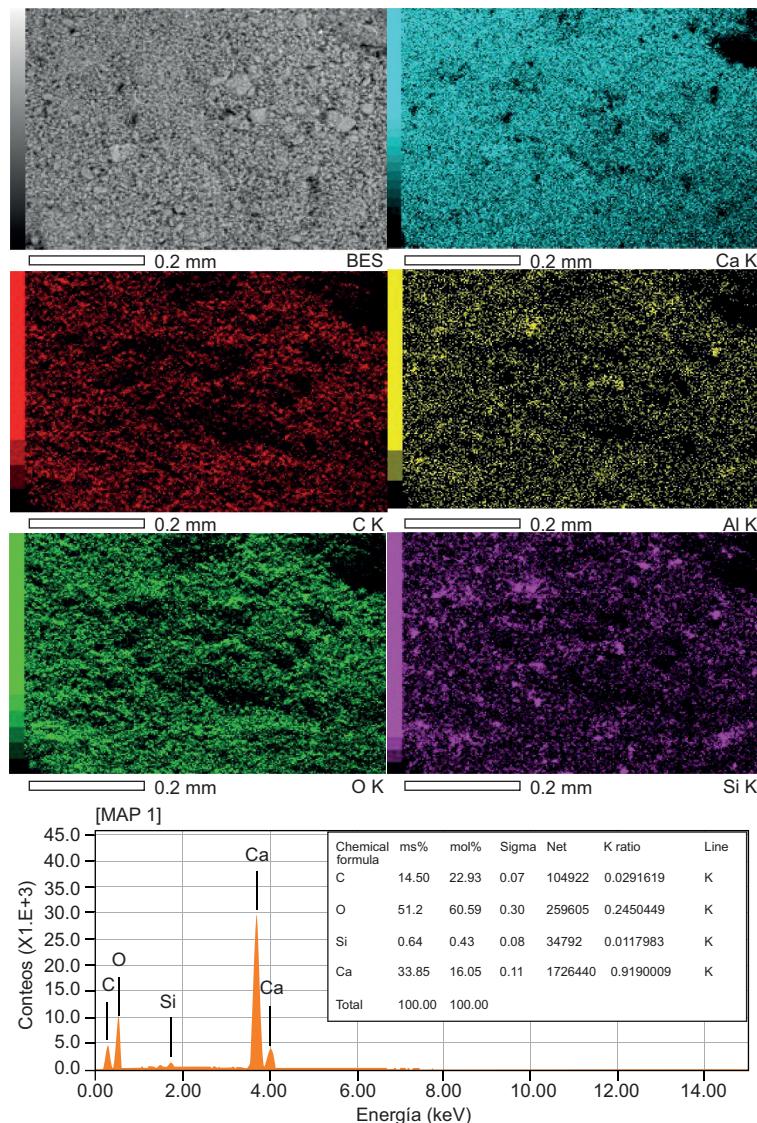


Fig. 6. Microestructura y mapeo elemental (MAP1) de los ladrillos con 12 % de cemento (PMA1).

0.21, 0.42 y 0.14, respectivamente. Dichos elementos están presentes en ambas mezclas: el magnesio como parte de la composición del mármol, principalmente, el hierro como parte del cemento y el azufre presente en el sulfato de calcio (yeso) que se adiciona al cemento durante su envasado.

En la **figura 8** se presentan los patrones de difracción de la muestra de mármol y de las mezclas PMA1 y PMA2. La principal fase identificada en el mármol fue la calcita rica en magnesio con número de carta 43-0697 y con fórmula química $(\text{Ca}, \text{Mg})\text{CO}_3$. Además, en las mezclas PMA1 y PMA2 se puede apreciar una pequeña joroba entre los 25 y 35

20 ($^{\circ}$) que se puede deber a la formación de C-S-H producto de la hidratación del cemento portland, de acuerdo con lo reportado por Ji et al. (2021). También se pueden apreciar dos pequeños picos a 31.5 y 32.6 20 ($^{\circ}$), los cuales pueden atribuirse a la fase de C_2S que no reaccionó. Los productos de hidratación tales como el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y la ettringita, no pudieron detectarse por medio de DRX, aunque sí están presentes los grupos funcionales en los espectros de la IRTF. La presencia de fases sin reaccionar del cemento Portland permitirá que las muestras sigan adquiriendo resistencia mecánica con el paso del tiempo si se tienen las condiciones de humedad adecuadas.

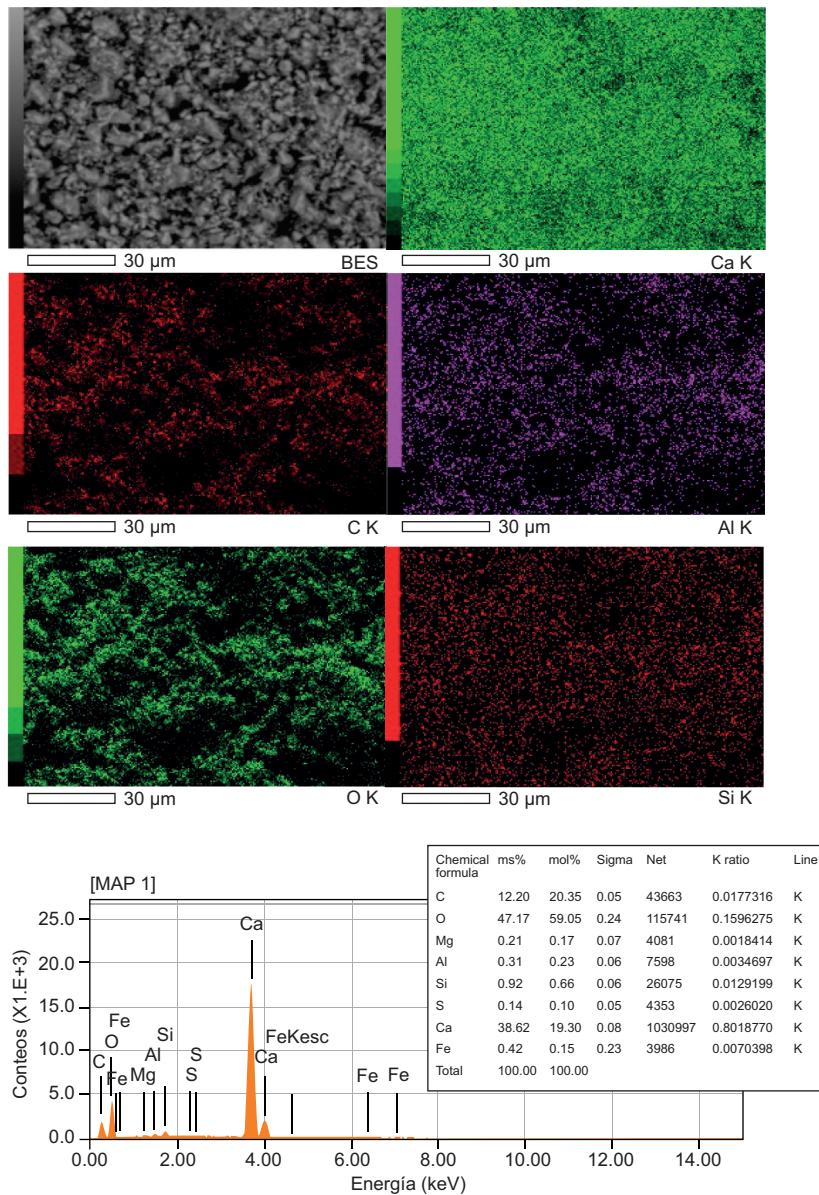


Fig. 7. Microestructura y mapeo elemental (MAP1) de los ladrillos con 15 % de cemento (PMA2).

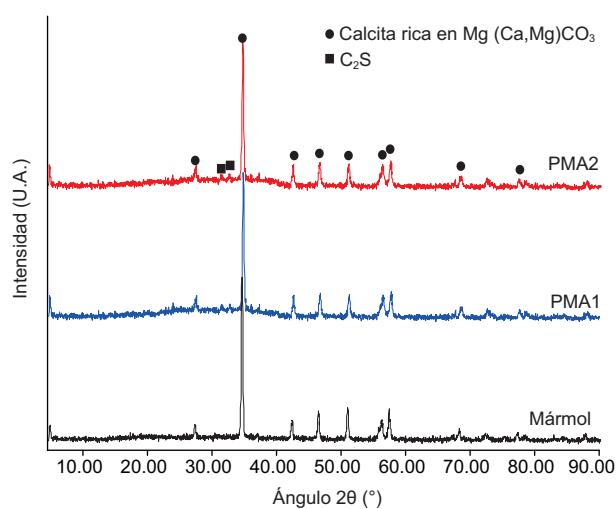


Fig. 8. Patrones de difracción de rayos X de la muestra de mármol utilizado y de los ladrillos con 12 % de cemento (PMA1) y ladrillos con 15 % de cemento (PMA2).

CONCLUSIONES

Como puede observarse en los resultados obtenidos, es posible utilizar el polvo de mármol como insumo principal para la fabricación de tabiques homogéneos con baja porosidad y buenas propiedades físicas y mecánicas. Es importante señalar que los ladrillos con 12 y 15 % de cemento y curados por 28 días, cumplen con la resistencia mecánica establecida por la norma mexicana NMX-C-404-ONNCCE-2012 (ONNCCE 2012) para utilizarse como elementos estructurales; sin embargo, no cumplen con los valores de absorción de humedad, por lo cual se recomienda experimentar con un porcentaje mayor de cemento. Asimismo, los ladrillos cumplen con los valores de la norma mexicana NMX-C-441-ONNCCE-2013 (ONNCCE 2013) y la norma maericana ASTM C62-12 (ASTM 2012) para ladrillos no estructurales con intemperismo de grados medio y bajo.

El uso de mármol de desecho para la elaboración de tabiques puede ser promisorio para contribuir a la reducción de contaminantes industriales con el consiguiente impacto positivo en el ambiente. Se recomienda continuar con la investigación experimentando principalmente con otros porcentajes de cemento y polvo de mármol. Asimismo, una vez que se tengan los ladrillos, se propone realizar las pruebas de resistencia a la compresión en muretes y adherencia con mortero.

REFERENCIAS

- André A., de Brito J., Rosa A. y Pedro D. (2014). Durability performance of concrete incorporating coarse aggregates from marble industry waste. *Journal of Cleaner Production* 65, 389-396. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.037>
- ASTM (2012). ASTM C62-12. Standard specification for building brick (Solid masonry units made from clay or shale). American Standard Test Materials, West Conshoshocken, PA, EUA, 4 pp.
- Crespo C. (1998). Obtención de muestras de suelos. En: Mecánica de suelos y cimentaciones. Limusa, Monterrey, México, 29-40.
- Flores V., Sánchez-Tizapa S., Arroyo R. y Barragán R. (2013). Propiedades mecánicas de la mampostería de tabique rojo recocido utilizado en Chilpancingo, Guerrero, México. *Informes de la Construcción* 65 (531), 387-395. <https://doi.org/10.3989/ic.12.084>
- González-García E. y Lizárraga-Mendiola L. (2015). Evaluación de las propiedades físico mecánicas de ladrillos de arcilla recocida, elaborados con incorporación de residuos agrícolas, caso Chiapas, México. *Revista Académica de la Facultad de Ingeniería* 19 (2), 91-101.
- Hebhoub H., Aoun H., Belachia M., Houari H. y Ghorbel E. (2011). Use of waste marble aggregates in concrete. *Construction Building Materials* 25 (3), 1167-1171. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.037>
- Ji X., Ji D., Yang Z., Wang G., Huang X., Ma S. y Li W. (2021) Study on the phase composition and structure of hardened cement paste during heat treatment. *Construction and Building Materials* 310, 125267. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125267>
- José A., Nivitha M.R., Murali K.J. y Robinson R.G. (2020). Characterization of cement stabilized pond ash using FTIR spectroscopy. *Construction and Building Materials* 263 (6), 120136. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120136>
- Khan A., Patidar R. y Pappu A. (2020). Marble waste characterization and reinforcement in low density polyethylene composites via injection moulding: Towards improved mechanical strength and thermal conductivity. *Construction and Building Materials* 269, 121229. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020>
- ONNCCE (2012). Norma Mexicana NMX-C-404-ONNCCE-2012. Industria de la construcción-Mampostería-Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural-Especificaciones y métodos de ensayo. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México, 17 pp.
- ONNCCE (2013a). Norma Mexicana NMX-C-037-ONNCCE-2013. Industria de la Construcción-Mampostería-Determinación de la absorción total y la absorción inicial de agua en bloques, tabiques o ladrillos y tabicones-Método de ensayo. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México, 9 pp.
- ONNCCE (2013b). Norma Mexicana NMX-C-441-ONNCCE-2013. Industria de la Construcción-Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso no estructural-Especificaciones. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México, 10 pp.
- ONNCCE (2013c). Norma Mexicana NMX-C-036-ONNCCE-2013. Industria de la Construcción-Mampostería-Resistencia a la compresión de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones y adoquines-Método de ensayo. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, México, 9 pp.
- ONNCCE (2013d). Norma Mexicana NMX-C-038-ONNCCE-2013. Industria de la Construcción-Mampostería-Determinación de las dimensiones de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones-Método de ensayo. Organismo

- Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México, 7 pp.
- Ponce-Peña P., González-Lozano M.A., Rodríguez Pulido A., Lara-Castro R.H., Quiñones-Jurado Z.V., Pérez-Medina J.C., Poisot-Vázquez M.E. y Villavicencio-Torres A. (2016). Effect of crushed glass cullet sizes on physical and mechanical properties of red clay bricks. *Advances in Materials Science and Engineering* 2016, 2842969. <https://doi.org/10.1155/2016/2842969>
- Ruiz-Sánchez A., Sánchez-Polo M. y Rozalen M. (2019). Waste marble dust: An interesting residue to produce cement. *Construction and Building Materials* 224 (16), 99-108. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.031>
- SCT (2002). N-CMT-2-01-002/02. Características de los materiales. Materiales para estructuras. Materiales para mampostería, bloques de cemento, tabiques y tabiques. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, 6 pp.
- Shalul M. y Sekar A. (2009). Properties of green concrete containing quarry rock dust and marble sludge powder as fine aggregate. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences* 4 (4), 83-89.
- Shelke V.M., Pawde P.Y. y Shrivastava R.R. (2012). Effect of powder marble with and without silica fume in mechanical properties of concrete. *Journal of Mechanical and Civil Engineering* 1 (1), 40-45. <https://doi.org/10.9790/1684-0114045>
- UNE (2008). UNE 41410. Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques, Definiciones, especificaciones y métodos de ensaye. Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, España, 26 pp.
- Uygunoglu T., Topçu I.B. y Çelik A.G. (2014). Use of waste marble and recycled aggregates in self-compacting concrete for environmental sustainability. *Journal of Cleaner Production* 84 (1), 691-700. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.019>
- Valdez P., Barragán B., Girbes I., Shuttleworth N. y Cockburn A. (2011). Uso de residuos de la industria del mármol como filler para la producción de hormigones autocompactantes. *Materiales de Construcción* 61 (301), 61-76. <https://doi.org/10.3989/mc.2010.55109>