



Ladrillos cerámicos sustentables y avanzados para la construcción del futuro

*Edgar Moreno Bernal¹, Marina Vlasova²

¹ Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM. Circuito Exterior S/N Circuito de la, Investigación Científica, CU, 04510 Ciudad de México, CDMX

² Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, UAEM. Avenida Universidad 1001, Chamilpa, 62209 Cuernavaca, Morelos, México
eddmorber@gmail.com

Introducción

El incremento de la población en todo el mundo ha llevado a un aumento en la demanda de viviendas y edificios, lo que a su vez ha propiciado la búsqueda de materiales de construcción avanzados que permitan construir muros de carga y muros divisores en edificios modernos. Los ladrillos cerámicos convencionales son muy populares debido a su bajo costo en el mercado, pero tienen un impacto ambiental que no se encuentra controlado al momento de ser producidos. El combustible empleado para la fabricación de estos materiales puede ser aserrín, madera, aceite quemado, llantas, basura, entre otros, lo cual genera emisiones de gases de efecto de invernadero. Por lo tanto, es necesario buscar otras formas de producir estos materiales de manera sostenible, utilizando técnicas y materiales más ecológicos.

En la fabricación de los ladrillos cerámicos es importante que estos cumplan con las normativas y estándares de seguridad estructural establecidos por las autoridades

locales y nacionales correspondientes. Si las empresas que fabrican estos materiales no cumplen con estas normativas, pueden poner en riesgo la seguridad estructural de las construcciones en las que se utilicen sus productos. Esto puede llegar a tener consecuencias graves: daños a la propiedad, lesiones o incluso la pérdida de vidas humanas. Por eso, es importante señalar que las empresas dedicadas a la fabricación de ladrillos cerámicos artesanales trabajen en extensa colaboración con las autoridades correspondientes (municipales, estatales y federales) con la finalidad de asegurarse que sus productos cumplan con los estándares requeridos en términos de seguridad estructural (por ejemplo, las normas: NMX-C-ONNCCE-2013, NMX-C-024-ONNCCE-2012 y NMX-C-038-ONNCCE-2013).

La ciencia y tecnología de los materiales avanzados resulta útil para analizar y mejorar las propiedades mecánicas, térmicas, acústicas y eléctricas de los ladrillos cerámicos. A partir del estudio estructural del material, y la relación de estas carac-

terísticas con sus propiedades finales, es posible lograr que los productos cerámicos más eficientes, seguros y cómodos para los usuarios finales. Un claro ejemplo de ello es la creación de ladrillos cerámicos inteligentes que puedan transmitir y recibir información a través de señales eléctricas.

La idea de utilizar los ladrillos cerámicos como sensores estructurales para monitorear el estado de los edificios es muy interesante y prometedora. Este tipo de tecnología resultaría muy útil para detectar posibles problemas estructurales en los edificios, como grietas o fracturas, y tomar medidas preventivas antes de que ocurran daños mayores. Otro ejemplo puede ser para el caso del control de temperatura. El uso de ladrillos cerámicos como resistencias térmicas puede ser muy útil en zonas con temperaturas extremas, ya que permitiría mantener un ambiente cálido y confortable dentro de los recintos, sin necesidad de recurrir a otros sistemas de enfriamiento o calefacción. Por otro lado, el uso de ladrillos cerámicos como material aislante puede ser muy útil para proteger los recintos contra los campos electrostáticos y drenar las cargas eléctricas a través de los muros electro conductivos, lo que podría mejorar la seguridad eléctrica de los edificios.

Con base a los requerimientos actuales, la producción de las cerámicas debe centrarse en el desarrollo de una tecnología de ahorro de energía y recursos para proporcionar una reducción sustancial de los costos de producción de ladrillos y los costos de construcción y transporte en general [1-3]. La integración de desechos de origen orgánico e inorgánico en el proceso tecnológico en su fabricación [4-11], puede

ser una opción interesante para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de la producción de materiales cerámicos reciclados.

Un ejemplo resulta de utilizar desechos inorgánicos como el poliestireno expandido (EPS), vidrio, plásticos y otros residuos de origen industrial, no biológicos que pueden ser incorporados en la matriz cerámica para mejorar sus propiedades físico-químicas. Esta operación reduciría la dependencia de los recursos fósiles y evitaría que la ecología del medio ambiente se deteriora sustancialmente debido a la actividad vital humana [12].

Los ladrillos cerámicos porosos tienen propiedades de aislamiento térmico y acústico debido a la presencia de poros en su composición. Además, la reducción en su peso de un 35 % frente al ladrillo convencional facilita el transporte y la manipulación en la construcción. La presencia de poros en las seis superficies geométricas del ladrillo cerámico también puede mejorar la adherencia del repellado que se aplique en sus superficies, lo que resulta en una mayor durabilidad del repellado adherido.

Uno de los métodos para obtener cerámicos porosos es la introducción de compuestos inorgánicos de EPS en la masa de arcilla a sinterizar. Estos compuestos pueden actuar como un agente aditivo durante la combustión inicial, generando poros en la masa arcilla [13-15].

Los poros en la cerámica porosa suelen tener un tamaño que va desde alrededor de ~ 3mm hasta ~ 1mm y pueden tener, la mayoría de las veces, una forma de ranura [16]. Sin embargo, es importante destacar que el tamaño y la forma de los poros puede

variar mediante técnicas de procesamiento específico. Por ello es posible utilizar partículas esféricas de poliestireno expandido (EPS) para generar poros de forma esférica en la cerámica porosa.

Durante el proceso de sinterización, el EPS se descompone y se evapora, lo que da lugar a la formación de poros esféricos en la cerámica [17]. Este método puede utilizarse para generar poros grandes y uniformes, y también puede controlarse la cantidad de EPS utilizada para ajustar el tamaño y la distribución de los poros. Sin embargo, resulta importante tener en cuenta que la introducción de EPS puede tener un impacto negativo en la resistencia mecánica y la estabilidad de la cerámica, por lo que es necesario encontrar un equilibrio entre la cantidad de EPS utilizado y las propiedades deseadas de la cerámica porosa.

La problemática de procesar los residuos de embalaje de EPS se vuelve cada vez más urgente en vista del aumento del volumen de los desechos de este material que contamina el medio ambiente. Hoy en día, existen métodos de reciclaje limitados para el procesamiento del EPS de embalaje. Un ejemplo es la molienda de desechos de este tipo y, después, la introducción como relleno en block de hormigón [18, 19]. Otro caso es la fusión de los desechos de EPS con la trituración del producto, convirtiéndolo en polvo, y posteriormente agregando el polvo en la matriz cerámica a utilizar para usarla como aditivo en el proceso tecnológico siguiente; despolimerización de residuos de EPS [20, 21]. Prácticamente todos los tipos de procesamiento de EPS resultan ser costosos desde el punto de vista económico, lo que retrasa su procesamiento a gran escala.

Método de elaboración de cerámicos porosos

Este es el método para realizar cerámicos porosos, reutilizando desechos de embalaje de EPS, botellas de vidrio y como matriz principal la arcilla roja.

Se requieren partículas de vidrio con un tamaño de 0.125 mm, por lo tanto, las botellas de vidrio se trituran en una prensa hidráulica. Los fragmentos de vidrio triturados son introducidos a un molino planetario para pulverizarlo, luego se tamiza el polvo escogiendo el tamaño de partícula deseado. En el caso del EPS los desechos de embalaje son triturados por fricción en una superficie rugosa logrando trazas de forma esférica que ya tiene el aglomerado desde su fabricación, se escoge el aglomerado con un tamaño de partícula esférica de entre 1 a 3 mm o del tamaño deseado.

El siguiente paso es la homogenización de los materiales introduciendo los materiales en el molino planetario durante 20 min. a 200 rpm. A la mezcla obtenida se le agrega agua para obtener una masa plástica, la cual se introduce en moldes. Las muestras se secan a la intemperie a temperatura ambiente, donde no les de la luz directa del sol durante dos días, para poder introducir las al interior de los hornos de cocción. El proceso de sinterización se realizó en ambiente al aire (tipo I) y con deficiencia de oxígeno (tipo II), a una temperatura máxima de 1000 °C y un tiempo de 8.5 horas. En el proceso de sinterización de los especímenes tipo I, la velocidad de aumento de la temperatura es de 50 °C/min. Se percibió la emisión de sustancias tóxicas derivadas de la degradación térmica del EPS, las cuales ocurren en el rango de temperatura entre 350-500 °C. Para el proceso de sinterización de los

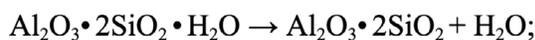
especímenes tipo II, usando las mismas condiciones, las muestras están completamente confinadas, minimizando así las emisiones de sustancias tóxicas.

Análisis Estructural

Las cerámicas sinterizadas están compuestas por silimanita, cristobalita y cuarzo (Fig. 1). Los picos de difracción correspondientes a estas fases se encuentran en un halo ancho, lo que indica la presencia de una fase amorfa o vítrea. Además, la cantidad de cada fase en la cerámica depende de la composición de las mezclas iniciales de arcilla-vidrio. Se observa que cuanto mayor sea el contenido de arcilla en las mezclas iniciales, mayor será el contenido de silimanita en la cerámica. Por otro lado, cuanto mayor es la cantidad de vidrio introducido en las mezclas iniciales, mayor será la intensidad del halo registrado en los patrones de difracción de rayos X.

El contenido de cuarzo y cristobalita en la cerámica también está influenciado por diferentes factores. Por un lado, depende de la descomposición del mineral de arcilla, que se produce a diferentes temperaturas, por ejemplo:

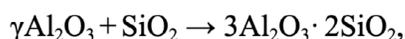
A 550 °C:



A 850 °C:



A 900 °C:



También la falta de homogeneidad de la composición de la arcilla roja que, junto con la montmorillonita y la caolinita, contiene

cuarzo y cristobalita en forma de inclusiones de arena [22, 23]. Es debido a esto que el contenido de cuarzo varía en la composición de la cerámica: la participación del cuarzo en la formación de la fase vítrea de la nueva composición (como lo demuestra un cambio en el máximo del halo en 2θ) y la transición de una parte de SiO_2 (cuarzo) en SiO_2 (cristobalita).

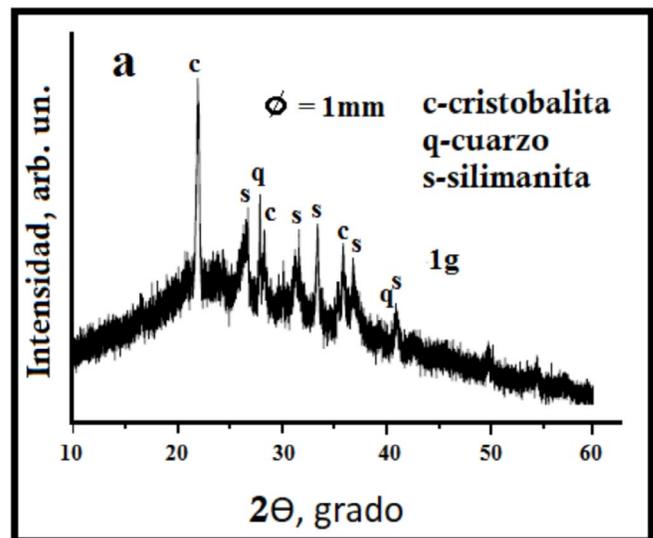


Figura 1. Patrón de difracción de rayos X de arcilla roja y vidrio sinterizados

Durante la sinterización en ausencia de oxígeno no se observó la liberación de gases de termodescomposición del EPS en el horno. Después de la sinterización en condiciones de deficiencia de oxígeno se detectó la presencia de una fase de carbono amorfo en los patrones de difracción de rayos X de las cerámicas [13], que se caracterizan por un halo con un máximo de $2\theta \sim 26\text{-}27^\circ$ (Fig. 2a). En las cerámicas sintetizadas en el aire, se observó un halo con un máximo en $2\theta \sim 22^\circ$, debido a la presencia de la fase vítrea [24, 25] (ver Fig. 2b). En las cerámicas carbonizadas, se registró una línea estrecha en $2\theta = 26.5^\circ$, que se asigna a micropérlas de carbono grafitizadas [26]. También se detectó un pico de baja intensidad en $2\theta = 44^\circ$, lo que sugiere la formación de una

forma específica de carbono, es decir, las bombillas de carbono [24, 25]. El pico a $2\theta = 23.77^\circ$, que se asigna a forsterita (Mg_2SiO_4 o $(Mg_{1.81}Fe_{0.18}Ni_{0.01})\Sigma = 2Si_{1.00O_4}$), indica la interacción entre el vidrio y los componentes de arcilla que contienen óxidos metálicos, incluyendo óxidos de hierro y magnesio.

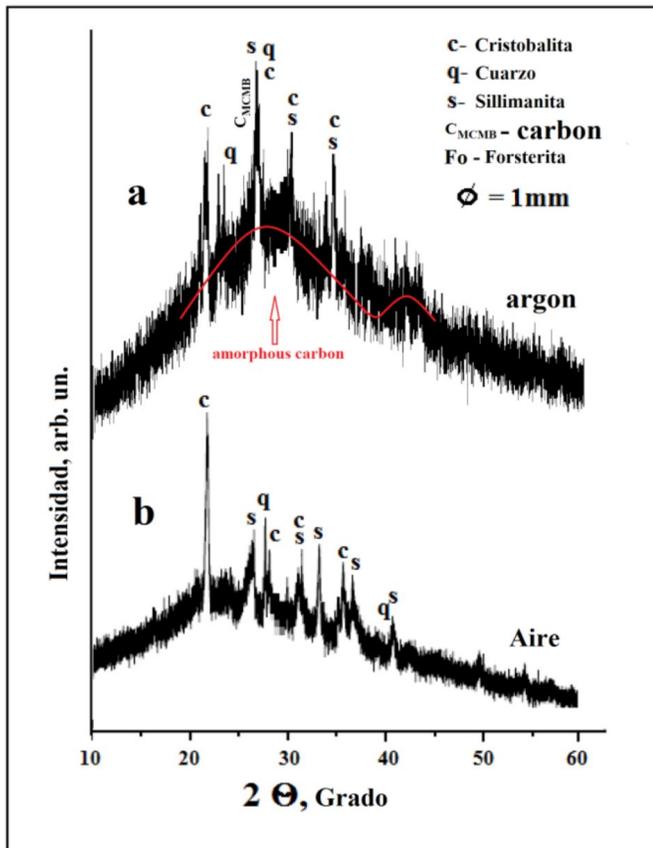


Figura 2. Patrones de difracción de rayos X de las cerámicas obtenidas a partir del 50 % en peso arcilla + 50 % peso de vidrio + 1 g de mezcla de EPS en atmósfera al vacío (a) y aire (b) en $T_{sint} = 1000^\circ C$ para $t_{sint} = 8.5 h$. $d_{EPS} = 1mm$

Caracterización microestructural y morfológica

Durante la fractura de cerámica con cualquier contenido de EPS introducido en las composiciones iniciales se observan lugares de combustión de partículas esféricas de EPS (Figs. 3a, c, d). El tamaño de los poros formados se correlaciona con el diámetro de las partículas esféricas introducidas.

Poros finos de diferente tamaño y forma (Figuras 3b, c) perforan toda la cerámica. En las paredes de poros grandes, poros más finos, que indican los lugares de liberación de productos de combustión gaseosos de EPS, están presentes. El microanálisis local en diferentes lugares mostró la presencia de elementos que son característicos de los lugares de localización de sílice (Figuras 3b, b', lugar 1), silicato de aluminio (Figuras 3b, b', lugar 3) y vidrio (Figuras 3 b, b', lugar 2).

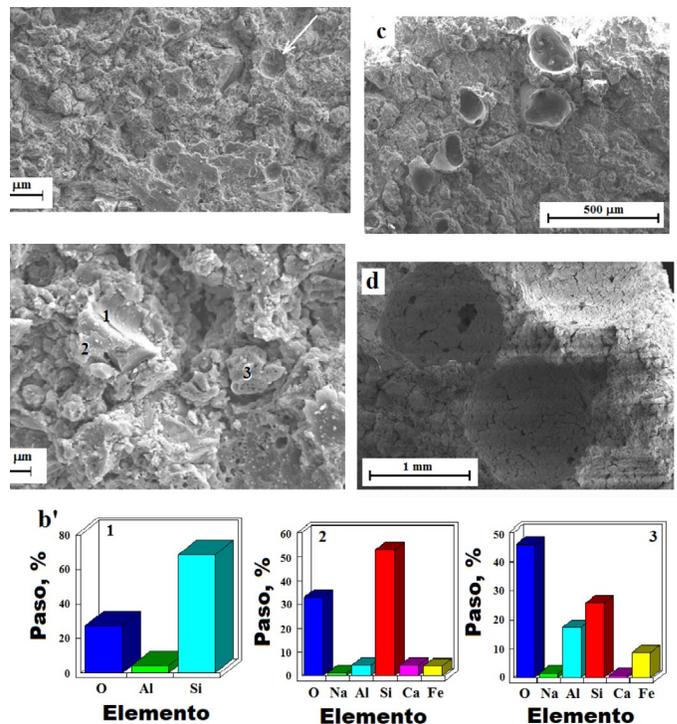


Figura 3. Micrografías de una fractura de la cerámica porosa a diferentes aumentos (a – c) y microanálisis local de elementos (b') en los lugares indicados en (b).

Propiedades mecánicas

El análisis de las propiedades mecánicas de las muestras reveló que la resistencia a la compresión aumenta en las muestras que se preparan a partir de mezclas con un contenido de vidrio de alrededor del 50 % en peso (Fig. 4), lo cual coincide con lo reportado en bibliografía [13]. En cambio, cuando se incrementa el contenido de EPS y, por lo tanto, el número de poros en la

cerámica, la resistencia a la compresión (F_{compr}) disminuye (Figura 4b, curvas 1, 2). Estos cambios son más notorios cuando se usan partículas de EPS de mayor diámetro ($d \sim 3 \text{ mm}$). Al utilizar partículas de EPS de menor diámetro ($d \sim 1 \text{ mm}$), se puede sintetizar cerámica con F_{compr} constante, siempre y cuando el contenido de EPS se mantenga dentro de ciertos límites (Fig. 4a).

De acuerdo con los requerimientos estándar, se pueden utilizar cerámicas con F_{compr} de alrededor de 80 kg/cm^2 para el trabajo de albañilería de paredes estructurales, mientras que cerámicas con F_{compr} de alrededor de $70\text{-}40 \text{ kg/cm}^2$ se pueden utilizar para el trabajo de albañilería de paredes interiores de separación.

Propiedades térmicas

Los resultados obtenidos del estudio sobre la disminución de la temperatura durante el paso de un flujo de calor a través de un espécimen poroso indican que la temperatura disminuye en $50 \text{ }^\circ\text{C}$ en todas las muestras a una distancia de 7.6 cm de la fuente de calentamiento, lo que clasifica el material sinterizado como cerámicos termoaislantes. La conductividad y la difusividad térmicas de los ladrillos varían según la composición del espécimen cerámico y su porosidad. A medida que aumenta la porosidad de la cerámica, debido a un aumento en el contenido de EPS, se produce una disminución eficiente de la temperatura de calentamiento de la muestra. Sin embargo, con un gran contenido de vidrio, se observa una tendencia inversa. Además, al aumentar los contenidos de EPS y vidrio en las mezclas iniciales y el diámetro de las partículas de EPS, se intensifica el calentamiento de la cerámica. En conclusión, para lograr buenas propiedades de aislamiento

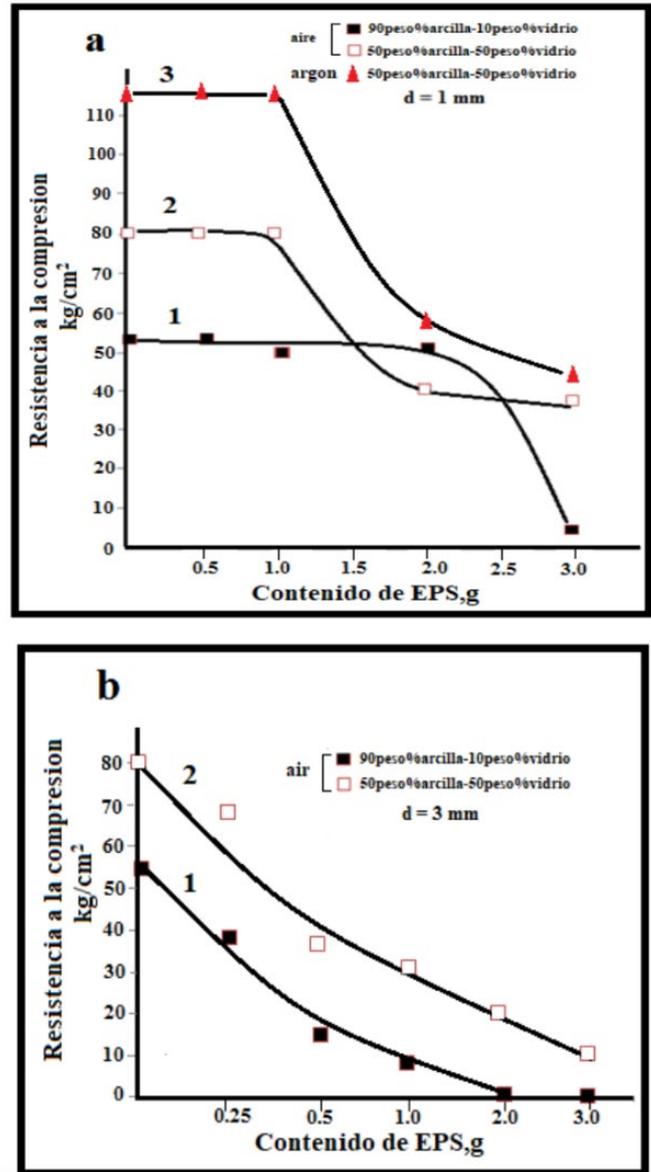


Figura 4. Cambio en la resistencia a la compresión de muestras de cerámica con cambio en el contenido de EPS y vidrio en las mezclas iniciales y el diámetro de las partículas de EPS. En (a), el diámetro de EPS es de 1 mm . En (b), el diámetro de EPS es de 3 mm .

térmico en las cerámicas, se recomienda utilizar partículas de EPS con $d = 1 \text{ mm}$ e introducir al menos 50% en peso de vidrio.

Propiedades acústicas

Los materiales porosos exhiben una mayor absorción de sonido que los materiales densos. En las cerámicas sintetizadas se reducen las vibraciones predominante-

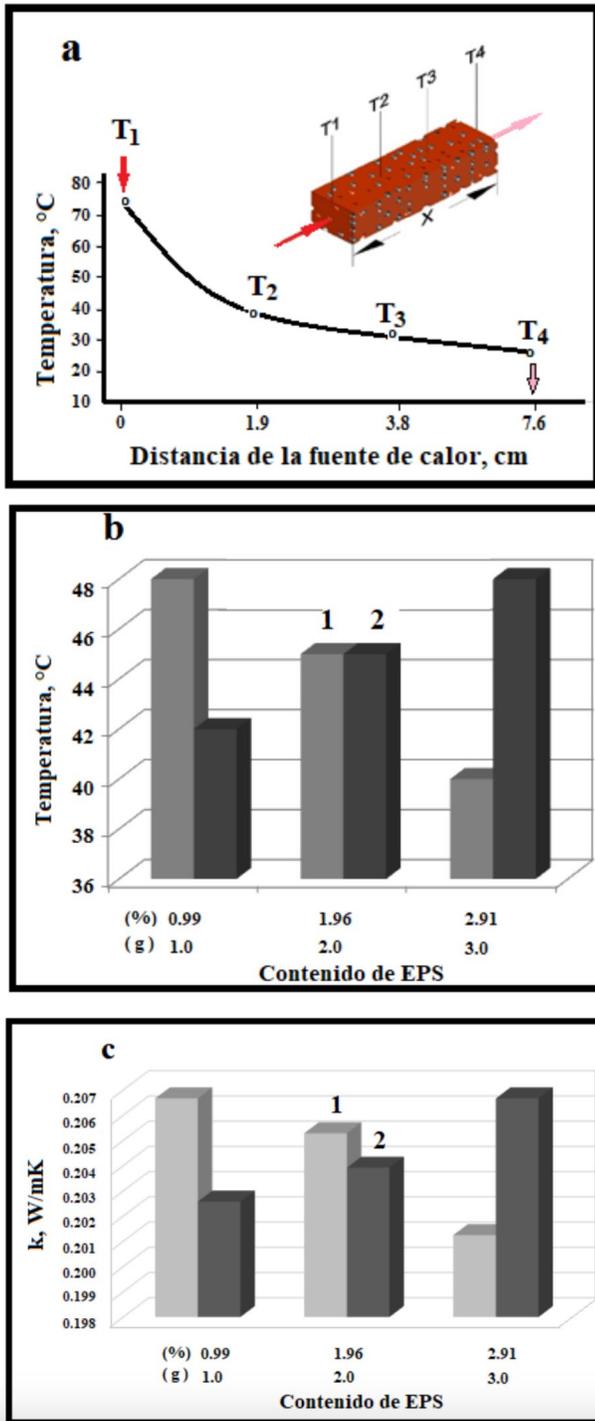


Figura 5. Carácter generalizado del cambio de la temperatura en las cerámicas porosas (a) temperatura de muestras de diferente composición a una distancia de 7.6 cm de la fuente de calentamiento (b) y el coeficiente de conductividad térmica (c) (1) para 90 % en peso arcilla + 10 % en peso de mezclas de vidrio; (2) por 50 % en peso arcilla + 50 % en peso de mezclas de vidrio. El diámetro de las partículas de EPS es de 1 mm. El tiempo de calentamiento es de 60 min.

mente de alta frecuencia. En el caso de utilizar mezclas con un gran contenido de la fase de vidrio y un diámetro de poro más pequeño, la absorción de las vibraciones de sonido a $f = 15000$ Hz se intensifica (ver Fig. 6). Los valores medios del coeficiente de absorción del sonido (α) durante el paso del sonido a través de una pared con un espesor de 2,3 cm se presentan en la Tabla I.

En la Tabla I se puede observar que los valores de α aumentan a medida que aumenta la porosidad del material y el diámetro de los poros. El contenido de la fase de vidrio en el material cerámico también influye en la absorción del sonido. Hay que tener en cuenta que, para ladrillos estándar, $\alpha \sim (0.04-0.07)$, que es mucho más pequeño que α en los ladrillos porosos. Por lo tanto, la cerámica sintetizada ha mejorado las propiedades de absorción de sonido.

Propiedades de electro conductoras de ladrillos carbonizados

En resumen, la introducción de vidrio que contiene iones de metales alcalinos en la arcilla durante la fabricación de cerámicas

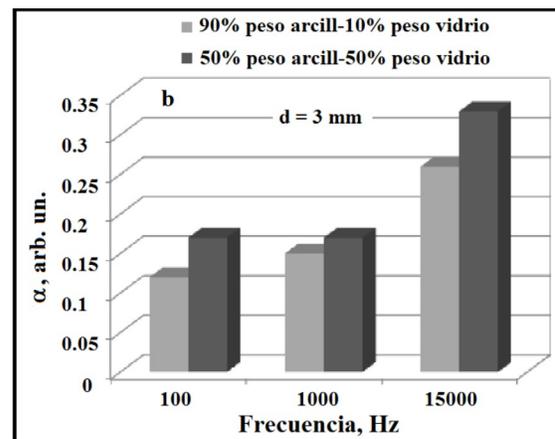


Figura 6. Cambio en el coeficiente de absorción del sonido (a) en muestras de diferentes composiciones con diferentes diámetros de poros. La cantidad de EPS en la mezcla es de 1 g.

Tipo de ceramicos	D _{poros} , mm	Peso, g	α (Valor promedio)
90% peso arcilla + 10% peso vidrio	1	1.0	0.122
		2.0	0.137
		3.0	0.140
	3	0.3	0.134
		0.5	0.150
		1.0	0.170
50% peso arcilla + 50% peso vidrio	1	1.0	0.173
		2.0	0.182
		3.0	0.188
	3	0.3	0.139
		0.5	0.149
		1.0	0.162

Tabla I. Valores medidos del coeficiente de absorción acústica en cerámicas porosas

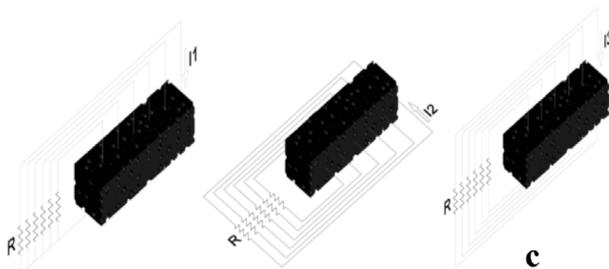
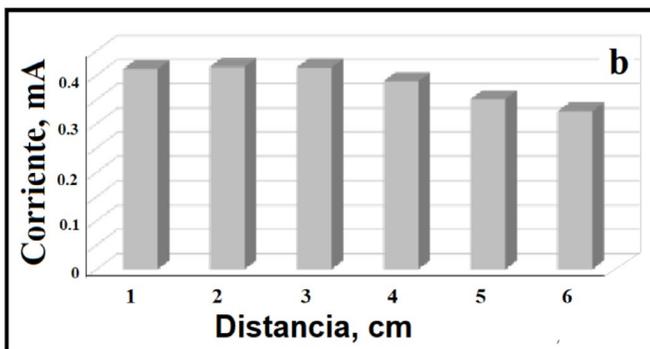
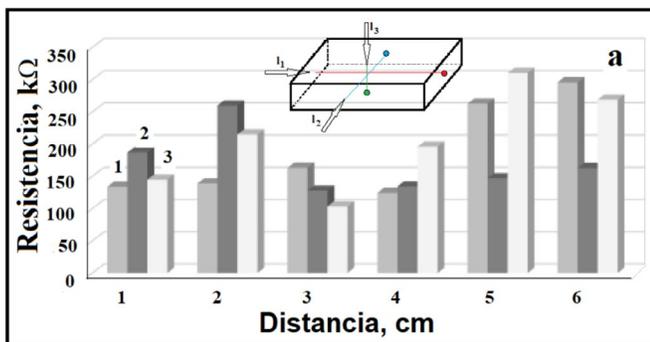


Figura 7. Cambio en la conductividad eléctrica (a) en lugares locales de cerámica carbonizada con un diámetro de poro $d \sim 1$ mm y en la corriente (b) en la dirección I1 (consulte el esquema de medición en la Fig. 7 a), (c) dirección de las mediciones de resistencia en I1, I2 e I3

porosas puede aumentar su conductividad eléctrica. Además, la presencia de componentes de carbono electro-conductores en la cerámica carbonizada puede contribuir a su conductividad eléctrica. En la investigación realizada se encontró que las cerámicas porosas con un diámetro de poro de ~ 1 mm presentan resistencias de alto valor en la dirección I1, mientras que en las direcciones I2 y I3 (ver figura 7 c) hay una dispersión en los valores de resistencia debido a la especificidad del paso de la corriente a través del sistema de canales cerámicos entre los poros. En consecuencia, sería posible ajustar la conductividad eléctrica de las cerámicas porosas al variar el contenido y el tamaño de las partículas de EPS en las mezclas iniciales.

Referencias

- V. Hocenski, Z. Hocenski, S. Vasilic, IEEE Intern. Conf. Industrial Technol (2006).
- A.P. Parra Parra, M. Vlasova, P. A. Márquez Aguilar, T. Tomila, Sci. Sinter. 49, 207-224 (2017). <https://doi.org/10.2298/SOS1703207P>.
- M. Vlasova, P. A. Márquez Aguilar, V. González Molina, A. Trujillo Estrada, M. Kakazey, Sci. Sinter. 50, 275-289 (2018). <https://doi.org/10.2298/SOS1803275V>.
- Advances in Ceramics - Characterization, Raw Materials, Processing, Properties, Degradation and Heating. 2011. Ed. C. Sikalidis, Published by InTech Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia. ISBN 978-953-307-504-4.
- A. G. Liew, A. Idris, C. H. K. Wong, A. A. Samad, M. Johari, M. M. Noor, A. M. Bakri, Waste Manage. 22, 226-233 (2004). doi:10.1177/0734242X04044989.
- A. Acosta, I. Iglesias, M. Aineto, M. Romero, J. Ma. Rincon, Waste Manage. 22, 887-889 (2002). doi:10.1016/S0956-053X(02)00075-2.
- V. Ducman, T. Kopar, Material Technology (MTAEC9) 41(6), 289-293 (2007). ISSN 1580-2949.
- A. A. Shakir, A. A. Mohammed, International Journal of Advances in Applied Sciences (IJAAS) 2(3), 145-156 (2013). ISSN: 2252-8814.
- L. Zhang, Constr. Build. Mater. 47, 643-655 (2013). doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.043.
- M. V. Vasić, L. L. Pezo, J. D. Zdravković, M. Vrebalov, Z. Radojević, Sci. Sinter. 50, 487-500 (2018).

11. N. Tangboriboon, S. Moonsri, A. Netthip, W. Sangwan, A. Sirivat, *Sci. Sinter.* 51, (2019).
12. A. Subrahmanayam, K. V. S. G. Muralikrishna, *International Journal of Science and Research (IJSR)* 7(4), 1453-1460 (2018). Paper ID: ART20181931 doi: 10.21275/ART20181931.
13. M. Vlasova, A. Parra Parra, P.A. Márquez Aguilar, A. Trujillo Estrada, V. González Molina, M. Kakazey, T. Tomila, V. Gómez-Vidales, *Waste Manage.* 71, 320-333 (2018). doi: 10.1016/j.wasman.2017.10.051.
14. M. S. Mohammed, I. A. Abd El-Shafey, R. M., Osman, I. Khattab, *Polym. Composite* 35 (1) 174-179 (2014). <https://doi.org/10.1002/pc.22647>.
15. L. Barbieri, F. Andreola, I. Lancellotti, R. Taurino, *Waste Manage.* 33 (11), 2307-2315 (2013). doi: 10.1016/j.wasman.2013.03.014.
16. M. Vlasova, A. Parra Parra, P. A. Marquez Aguilar, M. Kakazey, *Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation (JASES)* 6 (2), 165-179 (2011).
17. S. Veisheh, A. A. Yousefi, *Iranian Polymer J.* 12(4), 323-329 (2003).
19. S. L. Chandra Berntsson, *Lightweight Aggregate Concrete. Science, Technology and Applications*, Noyes Publications, USA, New York, 2003.
20. D. S. Babu, G. K. Babu, W. Tiong-Huan, *Cement Concrete Comp.* 28 (6), 520-527 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.02.018>
21. K. Colton, C. Harmer, B. Isom, W. F. Shughart II, *Plastic Pollution Bans vs. Recycling Solutions*, Independent Institute Briefing.
22. S. Derrick, *Green Manufacturing Initiative, Polystyrene Recycling*, Sept. 14th, 2010, Western Michigan University, College of Engineering and Applied Sciences Manufacturing Research Center, 2010. <https://wmich.edu/mfe/mrc/greenmanufacturing/pdf/Polystyrene%20Recycling.pdf>
23. Von Hermann Salmang, *Die physikalischen und chemischen Grundlagen der Keramik*, RuMoRGB, Berlin, 1954.
24. Y. Bomeni Isaac, L.W.A. Sylvain, F. Ngapgue, V.K. Kabe-yene, N. Fagel, *Sci. Sinter.* 51(1), 57-70 (2019).
25. C. Portet, G. Yushin, Y. Gogotsi, *Carbon*, 45 (13), 2511-2518 (2007). doi: 10.1016/j.carbon.2007.08.024
26. J. Bartelmess, S. Giordani, *Beilstein J. Nanotech.*, 5 (1), 1980-1998 (2014). doi:10.3762/bjnano.5.207
27. M. Zeiger, N. Jackel, V.N. Mochalin, V. Presser, *J. Mater. Chem. A.* 4, 3172-3196 (2016). doi: 10.1039/c5ta08295a