

EFFECTO DE LA ADICIÓN DE DESECHOS INDUSTRIALES EN LA DURABILIDAD DE LADRILLOS EXPUESTOS A Na_2SO_4

EFFECT OF THE ADDITION OF INDUSTRIAL WASTE ON THE DURABILITY OF BRICKS EXPOSED TO Na_2SO_4

Autores: Víctor Guillermo Jiménez Quero¹

<https://orcid.org/0000-0002-1248-1820>

Margarito Ortiz Guzmán¹

<https://orcid.org/0000-0002-9891-8172>

Patricia Magaly Gallegos Acevedo²

<https://orcid.org/0000-0003-0253-5589>

Institución: ¹Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca, México

²Universidad Tecnológica de la Mixteca, Instituto de Minería, México

Correo electrónico: vg.jimenezquero@gmail.com

margarito_og@yahoo.com

gallegos@mixteco.utm.mx

RESUMEN

Dos grupos de ladrillos elaborados con arcilla y desechos industriales, cocidos a 900°C y a 1000°C se sumergieron en una solución de Na_2SO_4 para evaluar su durabilidad (ASTM C1012). Para la elaboración del primer grupo de ladrillos se utilizó 70 % de arcilla (Ar) más 20 % de ceniza de bagazo de caña (Cbc) más 10 % de ceniza volante (Cv); para el segundo se utilizó 50 % de Ar más 40 % de Cbc más 10 % de Cv. Se elaboraron 60 ladrillos de 140 x 70 x 25 mm (incluyendo los controles), para su cocción se utilizó un horno de gas L.P. de tiro invertido, el tiempo de cocción fue 6.5 h. Cinco ladrillos por mezcla y por temperatura, sin exposición, se ensayaron a flexión (ASTM C67); a los ladrillos restantes se les tomaron sus dimensiones y se sumergieron en la solución de Na_2SO_4 durante 100 días. Al término de la exposición los ladrillos, se inspeccionaron visualmente, se registraron nuevamente sus dimensiones y se evaluaron a flexión. Los resultados indican que los ladrillos del primer grupo, elaborados con 70 % Ar+20 % Cbc+10 % Cv y cocidos a 1000°C, presentaron menor eflorescencia, 0.15 % de expansión y su módulo de ruptura sólo se redujo en 5.5 %. Adiciones de Cbc superiores a 20 % afectan la durabilidad de los ladrillos, independientemente de su temperatura de cocción.

Palabras clave: Arcilla, Desechos industriales, Material de construcción.

ABSTRACT

Two groups of bricks made with clay and industrial waste, fired at 900 °C and 1000 °C, were immersed in a Na₂SO₄ solution to evaluate their durability (ASTM C1012). For the elaboration of the first group of bricks, 70 % clay (Ar) plus 20 % sugar cane bagasse ash (Cbc) plus 10 % fly ash (Cv) were used; for the second, 50 % Ar plus 40 % Cbc plus 10 % Cv were used. 60 bricks of 140 x 70 x 25 mm (including controls) were made, for their firing a gas oven L.P. was used, the cooking time was 6.5 h. Five bricks per mix and per temperature, without exposure, were flexural tested (ASTM C67); the remaining bricks were dimensioned and immersed in the Na₂SO₄ solution for 100 days. At the end of the exposure, the bricks were visually inspected, their dimensions were again recorded and they were evaluated in flexion. The results indicate that the bricks of the first group, made with 70 % Ar + 20 % Cbc + 10 % Cv and fired at 1000 °C, presented less efflorescence, 0.15 % expansion and their modulus of rupture was only reduced by 5.5 %. Cbc additions greater than 20 % affect the durability of the bricks, regardless of their firing temperature.

Keywords: Clay, Construction material, Industrial waste.

INTRUDUCCIÓN

El origen de los ladrillos de arcilla cocida se remonta a unos 5500 años en la región de la antigua Mesopotamia, en el medio oriente (Chiera, 2015). Desde esa época hasta el presente, el proceso de fabricación del ladrillo artesanal ha variado muy poco; este proceso es muy empleado principalmente en países subdesarrollados debido a que es un proceso simple, sus materias primas son accesibles y de bajo costo, caso contrario en los países desarrollados que producen ladrillo industrial bajo estrictos controles de calidad y de cocción, empleando procesos mecanizados avanzados y hornos altamente eficientes (Technical Notes, 2006).

Los ladrillos de arcilla cocida son parte del grupo de materiales más empleados en la industria de la construcción. Edificar los muros de viviendas con ladrillos de arcilla cocida es un método muy recurrido en muchos países del mundo. Sin embargo, a causa de su alta demanda los bancos de arcilla se están agotando. Existen estudios que señalan que por cada 1,500 millones de ladrillos producidos más de 4,000 millones de toneladas de arcilla son extraídas y procesadas en más de 100,000 hornos de gran escala (Muñoz, V. *et al.*, 2016).

Recientemente algunos investigadores en diferentes países se han dedicado estudiar los efectos de la incorporación de residuos industriales, agrícolas y urbanos en la

elaboración de ladrillos alternativos. De esta manera pretenden contribuir a reducir la explotación de bancos de materiales cerámicos tradicionales, resolver problemas de almacenamiento de algunos residuos industriales, así como crear ladrillos resistentes y amigables con el ambiente (Kazmi, S. *et al.*, 2016a).

Otro aspecto muy importante a considerar es que, desde el punto de vista ingenieril, un ladrillo además de resistente debe ser durable. La durabilidad, según (Cooper, T. 2016), es la capacidad de un producto para realizar su función requerida durante un período prolongado en condiciones normales de uso sin gastos excesivos de mantenimiento o reparación. Cuando las estructuras hechas de ladrillos de arcilla son expuestas a ambientes agresivos se deterioran y reducen su capacidad para soportar cargas sísmicas durante su vida útil (Sýkora, M. *et al.*, 2018).

Existen diferentes causas por las cuales los ladrillos se deterioran. Espinosa, R. *et al.*, (2008), Rijniers L. *et al.*, (2005) y Buchwald, A. y Kaps, C. (2000) coincidieron en que la causa de la descomposición y su deterioro se debe a la influencia de la existencia y el movimiento del agua y la sal dañina. Espinosa R. *et al.*, (2008) notaron que una parte significativa del daño en los ladrillos se debe a las sales contenidas en los poros del material debido a las propiedades higroscópicas de las sales y soluciones. Zsembery, S. (2001) reveló que no toda la sal que existe en la humedad causará daño, incluso susceptible de ataque. Las sales más problemáticas son el sulfato de sodio y el cloruro de magnesio que en realidad atraen y absorben agua. La cristalización del sulfato de sodio y otras sales depende tanto de la humedad como de la temperatura. El sulfato de sodio cambia de sólido a líquido a 20 °C a medida que la humedad relativa aumenta al 75 % o más. Ocurre lo contrario cuando la humedad relativa desciende al 75 % y, por debajo del 10 %, cristaliza el sulfato de sodio (Van Hees, R. y Brocken, H. 2004).

Por lo anterior, es necesario estudiar el efecto de incorporar materiales alternativos a la matriz arcillosa a fin de elaborar ladrillos más durables ante el ataque de los diferentes agentes agresivos.

Algunos resultados de proyectos de investigación han demostrado que residuos industriales tales como la ceniza volante (CV) estudiada por Lingling, X. *et al.*, en 2005 y el humo de sílice (HS) estudiado por Baspinar, M.S. y Demir, I., en 2010, contienen agentes fundentes (feldespatos) que a altas temperaturas participan en la sinterización para incrementar la densidad de los ladrillos haciéndolos más resistentes y durables.

En México la industria azucarera produce grandes cantidades de CBC que generalmente es desechada en tiraderos a cielo abierto. Según Balakrishnan, M. y Batra, V.S. (2011) por cada Ton de caña de azúcar triturada se produce 0.6 % de ceniza.

Por otra parte, Weyant C., et al., (2014) reportaron que para el año 2014 en el mundo se produjeron alrededor de 1.5 trillones de ladrillos de arcilla cocida, de los cuales el 87 % se produjo en Asia. Sin embargo, en América Latina existe un número importante de productores. En el año 2013 la Red Ladrilleras registró un total de 40,642 productores, de los cuales 16,953 eran Mexicanos. Lo anterior demuestra que la demanda de este tipo de material es muy alta y que se requieren ladrillos resistentes y durables.

Por todo lo anterior, que el objetivo de este proyecto fue evaluar el efecto de la adición de desechos industriales: ceniza de bagazo de caña (Cbc) y ceniza volante (Cv) en la durabilidad de ladrillos expuestos a Na_2SO_4 .

MATERIALES Y MÉTODOS

La arcilla (**Ar**) empleada se obtuvo de un banco ubicado en una zona ladrillera de San Pablo Huitzo, Etlá, Oaxaca-México. Fue secada en horno durante 24 horas a 105°C , posteriormente se molió en un molino de bolas durante dos horas y se tamizó por la malla ASTM No. 100 ($150\ \mu\text{m}$) durante cinco minutos.

La ceniza de bagazo de caña (**Cbc**) fue colectada de un tiradero a cielo abierto propiedad del Ingenio Azucarero "Constancia" en Tezonapa, Veracruz-México; fue tamizada por la malla ASTM No. 200 ($75\ \mu\text{m}$) durante cinco minutos.

La ceniza volante (**Cv**) es un desecho que se produce en las plantas carboeléctricas por la combustión del carbón mineral. Este material se adquirió comercialmente. La marca de esta ceniza fue AdmixTech® y se empleó sin recibir ningún tratamiento. La composición química de los materiales se obtuvo mediante el uso de un espectrómetro de fluorescencia de rayos X (energía dispersa en masa) Epsilon 3XL®, Tabla 1.

Tabla 1.- Composición química de la arcilla y cenizas

Elemento/Compuesto	AR	CBC	CV
Óxido de Silicio (SiO_2)	61.16	56.37	64.12
Óxido de Aluminio (Al_2O_3)	18.25	14.61	20.01
Óxido de Hierro (Fe_2O_3)	2.94	5.04	5.42
Óxido de calcio (CaO)	3.89	2.6	4.00
Óxido de Magnesio (MgO)	1.10	1.43	0.63
Óxido de Sodio (Na_2O)	3.42	1.57	0.19

Óxido de Potasio (K ₂ O)	1.95	3.29	0.96
Óxido de Titanio (TiO ₂)	0.94	0.96	1.12
Pérdidas por Ignición (PI)	4.67	10.32	3.85
Suma: SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃	82.35	76.02	89.55

Las fases mineralógicas se evaluaron mediante difracción de rayo X utilizando un difractómetro Bruker AXS D8 Advance® con radiación Co Ka1 (1.5418 Å). Las fases minerales se identificaron utilizando el software Eva 2 versión 11.0.0.3. Las principales fases encontradas en la Ar fueron: montmorillonita-clorita, cuarzo y albita. En la Cbc se identificaron cuarzo y anorthita desordenada. En la Cv se encontraron cuarzo y mullita mayoritariamente.

Diseño de mezclas

Se diseñaron tres mezclas, una mezcla control y dos mezclas más en las cuales se reemplazó parte de la Ar por la combinación de Cbc+Cv, Tabla 2.

Tabla 2.- Proporcionamiento de los materiales para la elaboración de los ladrillos

Mezcla	Ar (%)	Cbc (%)	Cv (%)	Agua wt. (%)
Control (MC)	100	0	0	29
Ternaria 1 (MT1)	70	20	10	31
Ternaria 2 (MT2)	50	40	10	32

Elaboración de ladrillos

Se elaboraron 18 ladrillos por mezcla. Las dimensiones de los ladrillos fueron: 140 x 70 x 25 mm. La arcilla y los desechos industriales fueron mezclados en seco usando una mezcladora marca ELVEC® de 15 litros de capacidad durante 5 minutos, posteriormente, se adicionó agua y se mezcló por 12 minutos más, Figura 1.



Figura 1. Proceso de mezclado

a) Adición de materiales en polvo, b) Mezclado en seco, c) Adición de agua y d) Mezclado final

Para la elaboración de los ladrillos se utilizaron moldes de aluminio. Después de 48 horas los ladrillos fueron removidos de los moldes y se mantuvieron a temperatura

ambiente durante 20 días para que perdieran humedad lentamente y evitar la aparición de fisuras por contracción, Figura 2.



Figura 2. Proceso de elaboración de ladrillos a) Moldeo, b) Secado de ladrillos a temperatura ambiente

Después, un primer lote de ladrillos (elaborados con las tres mezclas) fue cocido a 900°C y un segundo lote (elaborado con las mismas mezclas) fue cocido a 1000°C, ambos durante 6.5 horas en un horno de gas L.P. de tiro invertido. El proceso de enfriamiento se realizó dentro del horno a velocidad normal de enfriamiento; finalmente se registraron las dimensiones de todos los ladrillos, Figura 3.



Figura 3. Proceso de cocción de ladrillos

a) Medición de ladrillos previo a su cocción, b) Colocación de ladrillos en el horno, c) Ladrillos cocidos y d) Medición de ladrillos después de su cocción

Se realizaron pruebas de porosidad aparente (ASTM C-373). Los ladrillos elaborados con las mezclas MC, MT1 y MT2 y cocidos a 900°C presentaron 31.7 %, 42.3 % y 51.1 % de porosidad respectivamente; los ladrillos elaborados con las mezclas MC, MT1 y MT2 y cocidos a 1000°C presentaron 30.2 %, 38.1 % y 48.6 % de porosidad respectivamente. Seis ladrillos de cada mezcla se emplearon para evaluar su resistencia a flexión (sin daño) y los otros nueve se sometieron a un ambiente agresivo simulado para evaluar su resistencia a flexión (ASTM C-67) posteriormente.

Métodos

Para simular el ambiente agresivo se preparó una solución de sulfato de sodio (Na_2SO_4). Por cada litro se emplearon 50 g de sulfato de sodio disuelto en 900 ml de agua bidestilada y 50 ml de agua deionizada. Los ladrillos se colocaron en un recipiente y se adicionó la solución. La proporción volumen de solución-volumen total

de ladrillos fue de 4.0 de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM C-1012. Los ladrillos permanecieron sumergidos durante 100 días, Figura 4.



Figura 4. Exposición de ladrillos al ambiente agresivo simulado.

a) Preparación de solución y b) Adición de la solución al contenedor

Evaluación del deterioro. - Al término del periodo de exposición los ladrillos fueron retirados del contenedor, se dejaron secar durante 10 días a temperatura ambiente. Posteriormente se limpiaron, se inspeccionaron visualmente para registrar daños Figura 5; se tomaron nuevamente sus dimensiones y se ensayaron para determinar su resistencia a flexión, Figura 6.



Figura 5. Preparación de ladrillos para pruebas.

a) Ladrillo con sulfato de sodio cristalizado y b) Limpieza de ladrillos

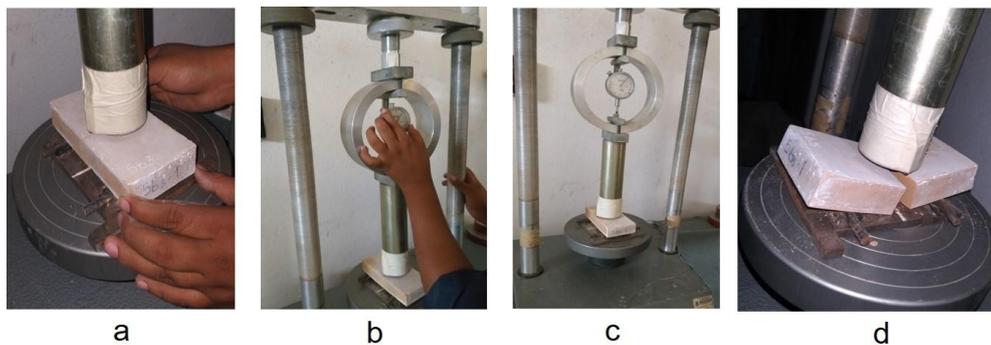


Figura 6. Prueba de resistencia flexión (Módulo de Ruptura) de ladrillos después de exposición a Na_2SO_4 . a) Colocación de ladrillo, b) ajuste del indicador, c) Aplicación de carga y c) Falla en ladrillo

RESULTADO Y DISCUSIÓN

En la Figura 7 se presentan los resultados de la inspección visual y en la Figura 8 los resultados de las pruebas de resistencia a flexión.

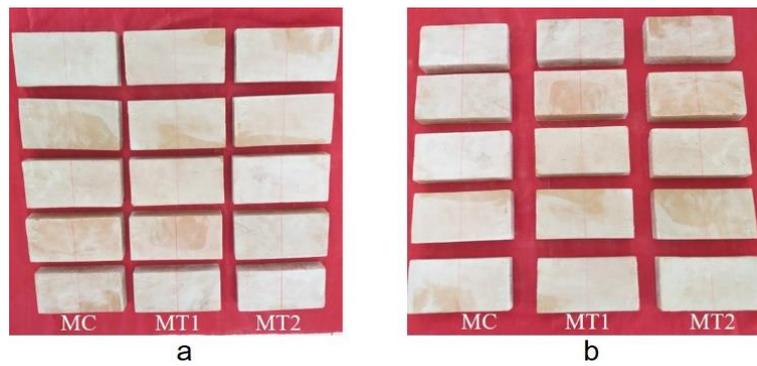


Figura 7. Resultados de la inspección visual

a) Ladrillos cocidos a 900°C y b) Ladrillos cocidos a 1000°C

Se observa que los ladrillos elaborados con la MC presentan una tonalidad más blanquiza y con pequeñas muestras de eflorescencia. El empleo de las cenizas en la elaboración de ladrillos resultó benéfico pues éstos mantuvieron una mejor apariencia que los ladrillos control. De acuerdo con (Kazmi, S. et al., 2016b) los óxidos de calcio y de hierro desempeñan un papel importante en la aparición de eflorescencia, sin embargo, las cantidades de éstos óxidos se reducen con la sustitución parcial de arcilla por las cenizas y, por lo tanto, se reduce también la eflorescencia. Los ladrillos elaborados con la mezcla MT2 sufrieron menos daño, pues no presentaron eflorescencia ni exfoliación y conservaron mejor su color. Por otra parte, los ladrillos de las tres mezclas sufrieron expansión, los porcentajes fueron 0.5, 0.30 y 0.45 % para los ladrillos elaborados de la MC, MT1 y MT2 respectivamente.

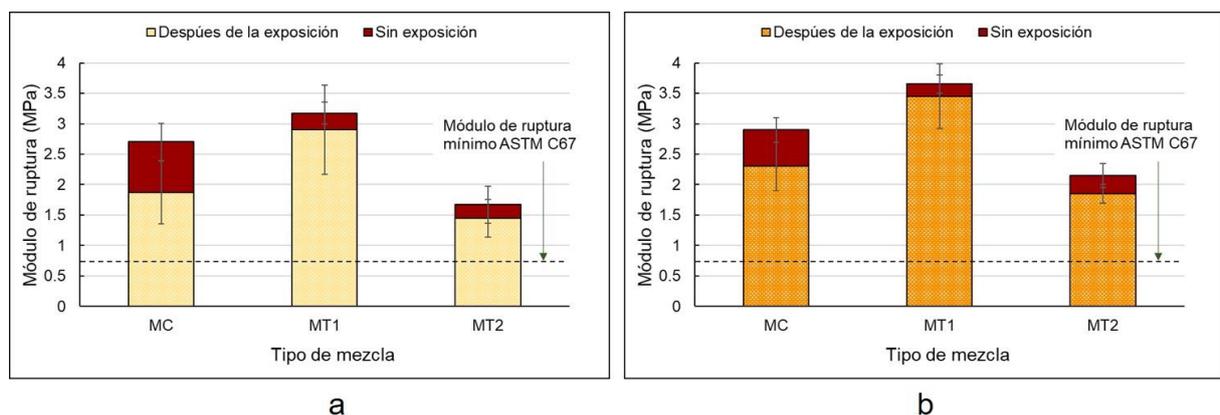


Figura 8. Resultados de la prueba de flexión

a) Ladrillos cocidos a 900°C y b) Ladrillos cocidos a 1000°C

Los resultados obtenidos en la prueba de resistencia a la flexión en ladrillos se expresan como el módulo de ruptura (MR). En la gráfica se observa que la exposición a sulfatos redujo el módulo de ruptura de todos los ladrillos; la comparación se realizó respecto a sus propios valores de resistencia obtenidos en condición sin exposición.

En el lote de ladrillos cocidos a 900°C, la mayor reducción fue del 30.8 % en los ladrillos elaborados con la MC y para las mezclas MT1 y MT2 fue de 8.5 % y 13.2 % respectivamente. Lo anterior puede explicarse porque como resultado de la inmersión, los cristales de sulfato (proceso de cristalización) llenan los poros de los ladrillos, generan presión interna y provocan micro-agrietamientos dando como consecuencia una reducción de su resistencia a flexión. (Naik, N., *et al*, 2014).

El incremento en el contenido de Cbc resultó perjudicial, ya que, de acuerdo con los resultados de la composición química, la Cbc tiene un alto contenido de pérdidas por ignición lo que puede ser considerado como una indicación de altos niveles de carbón sin quemar (Chandara, C. *et al.*, 2010) mismo que durante el proceso de cocción de los ladrillos se elimina y produce poros. Por lo anterior, es posible deducir que bajos valores de resistencia a flexión están asociados altos niveles de porosidad, lo que es respaldado por los resultados de las pruebas de porosidad aparente realizadas.

El incremento de temperatura de 900°C a 1000°C tuvo efectos benéficos en los ladrillos de todas las mezclas, los módulos de ruptura se incrementaron en los ladrillos sin exposición y las diferencias con respecto a los módulos de ruptura después de la exposición, fueron menores.

La sustitución de Cv por Ar resultó favorable ya que su análisis de DRX se identificó la existencia de mulita que es un mineral de alta dureza que contribuye a aumentar la resistencia de los cuerpos cerámicos. (Dana, K., *et al.* 2004) Los ladrillos elaborados con 70 % Ar+20 % Cbc+10 % Cv y cocidos a 1000°C presentaron menor eflorescencia, 0.15 % de expansión y su módulo de ruptura sólo se redujo en 5.5 %. Este efecto puede ser consecuencia del contenido de materiales fundentes en la Cbc y del alto contenido de sílice amorfo en el Cv que favoreció el desarrollo de mayores resistencias al formar mayores cantidades de fase líquida durante el proceso de sinterización. La sílice amorfa en la Cv también pudo prevenir las microfisuras en los ladrillos causadas por cambios en la estructura del cuarzo. Lo anterior puede respaldarse por lo que algunos investigadores han reportado al trabajar con arcilla y Cv, por ejemplo. (Cultrone, G. y Sebastián, E., 2009) afirman que la incorporación de Cv en materiales cerámicos reduce el volumen de poros más pequeños en la microestructura sinterizada de ladrillos de arcilla.

CONCLUSIONES

La sustitución de Ar por la combinación de Cbc+Cv resultó efectiva en el control de la eflorescencia causada por el sulfato de sodio. El incremento del 20 al 40 % en el uso

de la Cbc es perjudicial porque incrementa la porosidad aparente de los ladrillos, con lo que se genera mayor espacio para la cristalización de las sales de Na_2SO_4 y se tiene en consecuencia una mayor reducción de su resistencia a flexión, independientemente de la temperatura de cocción empleada. Los ladrillos elaborados con la mezcla MT1 (70 % Ar+20 % Cbc+10 % Cv) superaron la resistencia a flexión de los ladrillos elaborados con la MC (con y sin daño) cocidos tanto a 900°C como a 1000°C . Con la combinación de 70 % Ar+20 % Cbc+10 % Cv y cocidos a 1000°C se producen ladrillos ambientalmente amigables, resistentes a flexión y durables a la exposición de sulfato de sodio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALAKRISHNAN, M. y BATRA, V.S. (2011). Valorization of solid waste in sugar factories with possible applications in India: A review, *J. Environ. Manage.* Vol. 92, No. 11, pp. 2886–2891.
- BASPINAR, M. S. y DEMIR, I. (2010). Utilization potential of silica fume in fired clay bricks. *Waste Manage. Res.* No. 28, pp. 149–157.
- BUCHWALD, A. y KAPS, C. (2000). The Ion Mobility of Deteriorating Salts in Masonry Materials of Different Moisture Content, *Materials for Building and Structures. Euromat 99.* Vol. 6, pp. 157-162.
- CHANDARA, C. ... [et al.] (2010). The effect of unburned carbon in palm oil fuel ash on fluidity of cement pastes containing superplasticizer. *Construction and Building Materials.* No. 24, pp. 1590-1593.
- CHIERA, E. (2015). They wrote on clay. Cambridge, England: Cambridge University Press.
- COOPER, T. (2016). Beyond Recycling: The Longer Life Option. London: The New Economics Foundation.
- CULTRONE, G. y SEBASTIÁN, E. (2009). Fly ash addition in clayey materials to improve the quality of solid bricks. *Construction and Building Materials.* No. 23, pp. 1178-1184.
- DANA, K., SUKHEN, D. y SWAPAN K. (2004). Effect of substitution of fly ash for quartz in triaxial kaolin-quartz-feldspar system. *Journal of the European Ceramic Society.* No. 24, pp. 3169-3175.
- ESPINOSA, R. ... [et al.] (2008). Phase Change of Salts in Porous Materials: Crystallization, Hydration and Deliquescence. *Journal of Construction and Building Materials,* Vol. 22, pp. 1758-1773.

- KAZMI, S. ... [et al.] (2016a). Manufacturing of sustainable clay bricks: Utilization of waste sugarcane bagasse and rice husk ashes. *Construction and Building Materials*. No. 120, pp. 29-41.
- KAZMI, S. ... [et al.] (2016b). Exploratory study on the effect of waste rice husk and sugarcane bagasse ashes in burnt clay bricks. *Journal Building Engineering*. No. 7, pp. 372-378.
- LINGLING, X. ...[et al.] (2005). Study on fired bricks with replacing clay by fly ash in high volume ratio. *Construction and Building Materials*. No. 19, pp. 243–247.
- MUÑOZ, V. ... [et al.] (2016). Fired clay bricks made by adding wastes: Assessment of the impact on physical, mechanical and thermal properties. *Construction and Building Materials*. No.125, pp. 241–252.
- NAIK, N.; BAHADURE, B. y JEJURKAR, C. (2014). Strength and durability of fly ash, cement and gypsum bricks. *International Journal Computational Engineering Research*. Vol. 4, No. 5, pp. 1-4.
- RIJINIERS L. ...[et al.] (2005). Salt Crystallization as Damage Mechanism in Porous Building Materials – A Nuclear Magnetic Resonance Study, *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, Vol. 23, pp. 273-276.
- SÝKORA, M. ...[et al.] (2018). Assessment of compressive strength of historic masonry using non-destructive and destructive techniques. *Construction and Building Materials*. No. 193, pp. 196-210.
- TECHNICAL NOTES (2006). On Brick Construction, Industry Association, Reston, Virginia. 9.
- VAN HEES, R. P. J. y BROCKEN, H.J. P. (2004). Damage Development to Treated Brick Masonry in a Long-term Salt Crystallization Test. *Construction and Building Materials*. No.18, pp. 331-338.
- WEYANT, C. ...[et al.] (2014). Emissions from South Asian Brick Production. *Environmental Science & Technology*. No. 48, pp. 6477-6483.
- ZSEMBERY, S. (2001). Manual 2: The Properties of Clay Masonry Units, Clay Brick and Paver Institute (CBPI), Australia.