



Industrial Data

ISSN: 1560-9146

ISSN: 1810-9993

industrialdata@unmsm.edu.pe

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Perú

Ballesteros Giraldo, Cristian David; Serrano Guzmán, María Fernanda; Pérez Ruiz, Diego Darío
Respuesta termográfica de bloques de concreto para uso no estructural preparados con ceniza industrial

Industrial Data, vol. 22, núm. 2, 2019, Julio-
Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Perú

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81662532002>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org
UAEM

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Respuesta termográfica de bloques de concreto para uso no estructural preparados con ceniza industrial

CRISTIAN DAVID BALLESTEROS GIRALDO ¹

MARÍA FERNANDA SERRANO GUZMÁN ²

DIEGO DARÍO PÉREZ RUIZ ³

RECIBIDO: 30/08/2018 ACEPTADO: 25/04/2019

RESUMEN

La ceniza es un residuo proveniente de diferentes actividades comerciales. En el caso de la industria del papel, este resto que proviene de la combustión del carbón empleado en el proceso productivo representa un problema en su disposición. Esa es la razón por la cual se ha evaluado su aprovechamiento en la producción de bloques de concreto. Este estudio tiene como objetivo comparar la respuesta termográfica de bloques de concreto para aplicaciones no estructurales que han sido preparados con esta ceniza y manufacturados de forma industrial. Adicionalmente, se compara el comportamiento mecánico de los bloques cuando se sustituye porcentualmente la ceniza por el cemento. Asimismo, se hicieron sustituciones del 10, 20, 30 y 40% de ceniza por cemento en bloques preparados según control de calidad de una fábrica de bloques. Ensayos especializados, tales como la difracción de rayos X y la microscopía, demostraron la ausencia de sustancias tóxicas en la ceniza. El estudio reveló que la capacidad de absorción térmica aumenta a medida que aumenta la cantidad de ceniza.

Palabras-claves: Bloques; ceniza; residuos industriales; aislamiento térmico; resistencia.

INTRODUCCIÓN

La construcción es un sector económico que dinamiza diferentes sectores productivos y también exige el consumo de diferentes materias primas, equipo y recurso humano (Cámara Colombiana de la Construcción y Coordenada Urbana, 2014). En general, esta industria genera importantes ingresos, pero también produce muchos residuos. No obstante, otras industrias, como las de fabricación de papel, también generan residuos, tipo ceniza, cuya producción puede alcanzar hasta dos toneladas por mes (Vidal, 2016). El exceso de producción de residuos y los inconvenientes causados por la falta de espacio para la disposición de los mismos, así como la necesidad de mantener un consumo sostenible de las materias primas, ha incentivado estudios en los cuales se evalúa el efecto de la adición de residuos industriales, como la ceniza, en la producción de cemento o concreto. Por esta razón, la ceniza que proviene de diversas fuentes como la incineración de la cáscara de arroz, la desorción térmica de los provenientes del proceso de extracción de hidrocarburos, la incineración de combustibles, de centrales térmicas, entre otras, ha sido evaluada para darle otro uso, obteniéndose variados resultados.

Por ejemplo, la cáscara de arroz en proporciones de 5 a 20% arrojó mezclas de concreto con baja permeabilidad por la reducción de los poros, situación que mejora la resistencia de estas mezclas al ataque de agentes agresivos (Azevedo *et al.*, 2001). Posteriormente, en un estudio de Giaccio *et al.* (2007) se empleó la sustitución del 10% de cemento por ceniza y se obtuvieron mezclas de concreto de alta resistencia (80 MPa) con un buen comportamiento de absorción superficial. Otros estudios reportan que dosificaciones del 20% de ceniza volante y del 20% de ceniza proveniente del arroz, luego de 56 días de curado, permiten desarrollar concretos con resistencias de hasta 130 MPa

¹ Magíster en Ingeniería Civil por la Pontificia Universidad Javeriana (Cali, Colombia). Actualmente, es consultor independiente.

E-mail: davidballesteros1@hotmail.com

² Doctora en Ingeniería Civil de la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez, Puerto Rico. Actualmente, es profesora de Ingeniería Civil en la Pontificia Universidad Javeriana de Cali, Colombia.

E-mail: maria.serrano@javerianacali.edu.co

Orcid: <http://orcid.org/0000-0002-7366-6597>

³ Doctor en Ingeniería Civil de la Universidad de Texas en Arlington, Estados Unidos. Actualmente, es profesor de Ingeniería Civil en la Pontificia Universidad Javeriana de Cali, Colombia. E-mail: ddperez@javerianacali.edu.co

(Le y Ludwig, 2016). En el caso de la ceniza proveniente de procesos de desorción térmica de lodos de locaciones petroleras, puede acelerar el tiempo de fraguado inicial cuando es añadida en porcentajes menores a 15%, aunque se aprecia una reducción de la resistencia a la compresión hasta de 12% con relación a las mezclas testigo (Serrano *et al.*, 2013). Por otro lado, con la ceniza proveniente de la incineración de combustibles se han producido mezclas con resistencias a compresión hasta de 125 MPa cuando se adiciona en porcentajes del 25 y 55% (Xu *et al.*, 2003). Con las cenizas volcánicas añadidas en porcentajes del 50%, las mezclas han presentado una resistencia a compresión en promedio de 15 MPa (Hossain y Lachemi, 2010). Finalmente, en cuanto a la ceniza producto de la combustión de carbón pulverizado en plantas de energía, cuando es añadida como sustitución del 10% del cemento, produce comportamientos eficaces en la mejora de las propiedades mecánicas del concreto (Asi y Abdullah, 2005), pudiendo alcanzar en algunos casos resistencias de hasta 51 MPa (Nuruddin *et al.*, 2011), además que se mejora la durabilidad del concreto expuesto a medios salinos (Chousidis *et al.*, 2015).

Como bien afirman Topcu *et al.* (2008), los orígenes de la ceniza son variados, así como los usos en la producción de mortero y concreto (Teixeira *et al.*, 2016) para la fabricación de bloques de concreto para uso no estructural como gres porcelánico (Delgado *et al.*, 2015), en concretos y morteros modificados (Serrano *et al.*, 2012; Serrano *et al.*, 2013), así como también como material empleado en soluciones de geotecnia y suelos y en otros usos de tipo agrícola (Slim *et al.*, 2016) o en andenes (Bouzoubaâ *et al.*, 2011). Asimismo, como la ceniza es empleada como sustitución del cemento, las mezclas producidas son más económicas y, en la mayoría de estudios realizados, han demostrado aumento de la resistencia y la durabilidad de las mezclas, llegando a recomendarse su uso en concretos de alto desempeño (Bui *et al.*, 2005).

En este contexto, el objetivo de este trabajo es presentar la respuesta termográfica al incluir un residuo de la industria del papel en la fabricación de bloques de concreto conforme al sistema productivo de una empresa colombiana y evaluar la respuesta mecánica a compresión de los bloques producidos frente a los estándares de dicha empresa. Este tipo de mampuesto abre el espacio para una alianza entre los productores de bloques y de papel por cuanto los resultados de esta investigación indican que la adición de ceniza no afectó la resistencia a compresión del bloque producido y mejoró su respuesta a los cambios de temperatura.

METODOLOGÍA

El análisis de la respuesta térmica de bloques se hizo en dos etapas: se inició con el análisis de la ceniza suministrada por la fábrica de papel y se finalizó con el análisis de la respuesta térmica de los bloques.

Caracterización microscópica de la ceniza

Se utilizó un microscopio electrónico de barrido JEOL modelo JSM 6490 LV y se revisaron los cambios de composición química a través de las imágenes mediante un voltaje de aceleración de 15 kV. Adicionalmente, se efectuaron microanálisis químicos de las muestras sobre varios puntos o áreas de inspección. Para ello, se utilizó una sonda EDS de Oxford Instrument Modelo INCA PentaFETx3.

Ensayo difracción de rayos X

Para los análisis con rayos X, se empleó un equipo de alta resolución (X'Pert-MRD PANalytical) y los datos fueron analizados empleando el software Xpert Data. La caracterización de la muestra se realizó comparando las reflexiones obtenidas con las reportadas en la base de datos PDF2-Release-2009 International Centre for Diffraction Data (ICDD) para materiales puros y policristalinos.

Procedimiento para la fabricación de los bloques estudiados

Cada fabricante de bloques emplea una dosificación particular para la preparación de estos. Dicha dosificación puede variar entre empresas productoras de bloques, señala Fernandes (2015), por cuanto los materiales se acondicionan en una misma línea de producción, según las condiciones del material, estado de la maquinaria y otros factores que afectan la calidad de las piezas (Buitrago, 2015). Por ello, en esta investigación se utilizó un procedimiento industrializado para la producción de treinta bloques típicos del Valle del Cauca (Colombia), dosificación a la cual se le hicieron ajustes para preparar bloques con sustituciones del 10, 20, 30 y 40% de cemento por ceniza, según las proporciones indicadas en la tabla 1. Adicionalmente, se realizó el ensayo de granulometría para agregados finos siguiendo la norma ASTM C-136.

Las etapas de producción de los bloques estudiados se resumen así:

- Se revisó el estado de la maquinaria y de las materias primas.
- Se estableció la textura requerida para bloques de uso no estructural.

- Se revisó la cohesión de la mezcla para garantizar que el bloque permaneciera íntegro durante su fabricación.
- Se compactó el bloque y se verificó si tenía consistencia dura (con la prueba del «dedo duro») y si, al verterle agua en la superficie, esta no pasaba libremente a través del material. Se almacenaron los bloques en el cuarto de curado.
- Se llevó a cabo el control de calidad de los bloques según las normas técnicas de calidad del Instituto Colombiano de Normas Técnicas NTC 4205-1, 4205-2 y 4205-3, con el fin de determinar el peso, la absorción total, la densidad, el volumen neto y el área neta.
- Se procedió a realizar el ensayo de compresión de las unidades secas, teniendo en cuenta la dirección en que estarían puestos en servicio los bloques; en este caso, con los huecos verticales (norma NTC-ISO 7500-1 para clase 1).

Pruebas termográficas

La cámara termográfica debe mantenerse a la misma distancia focal (0,70 m), perpendicular a la cara del espécimen monitoreada y conservando la misma altura del trípode (0,30 m). Esta cámara resalta las variaciones de temperatura y los puntos calientes en

tiempo real y permite combinar la imagen de luz visible con una imagen térmica procedente del objeto de estudio (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid y la Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, 2011). Se evaluó la respuesta de temperatura de los bloques previamente expuestos tres días a radiación solar. Adicionalmente, con un sensor de temperatura y humedad se tomaron lecturas de estos parámetros con el fin de incorporar estos datos para la calibración y procesamiento de datos con la cámara.

RESULTADOS

La arena y el polvillo de cantera presentaron un módulo de finura de 2,43 y 2,78, respectivamente, por lo que ambos materiales se pueden clasificar como arena con alta presencia de finos. En cuanto a la ceniza, el ensayo realizado con el microscopio electrónico de barrido permitió identificar su composición química (ver tabla 2), según resultados obtenidos en los siete puntos señalados en la figura 1, que muestra el detalle microscópico de la ceniza con magnificación de la superficie de cincuenta veces. Los resultados de la composición química indican la presencia de carbono, oxígeno y silicio, con valores promedio de concentración de 48.2, 24.5 y 11.9%, respectivamente, lo que sugiere que la ceniza podría ser utilizada en la producción de concreto.

Tabla 1. Matriz experimental.

Bloque	Cemento kg	Polvillo m ³	Arena m ³	Agua l	Aditivo cc	Ceniza kg
Testigo	50	0,231	0,099	18,00	200	0,00
Sustitución 10%	45	0,231	0,099	20,00	200	5,00
Sustitución 20%	40	0,231	0,099	22,00	200	10,00
Sustitución 30%	35	0,231	0,099	25,50	200	15,00
Sustitución 40%	30	0,231	0,099	25,50	200	20,00

Fuente: basado de Ballesteros (2016).

Tabla 2. Composición química de la ceniza (cantidades en porcentaje).

Espectro	C	O	Na	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
1	11,64	36,75	2,87	19,96	23,27			2,23	3,29
2	85,81	11,01		1,57	1,62				
3	63,55	19,20		3,09	11,85		2,31		
4	25,73	39,15	1,72	3,92	28,33	1,14			
5	15,48	16,96		5,31	8,84		0,88		52,53
6	76,96	18,34		2,39	2,31				
7	58,20	30,20		4,70	6,90				
Promedio	48,20	24,52	2,30	5,85	11,87	1,14	1,60	2,23	27,91
Desviación estándar	30,20	10,80	0,80	6,40	10,30	N. A.	1,00	N. A.	34,80
Coeficiente de variación	62,70	44,00	34,80	109,40	86,80	N. A.	62,50	N. A.	124,70

Fuente: basado de Ballesteros (2016).

Los resultados del análisis por difracción de rayos X muestran las fases (códigos 98-010-7202 y 98-008-0148) presentes en el material (ver figuras 2 y 3) identificadas en la base de datos consultada como óxido de silicio en estructura cristalográfica hexagonal y óxido de silicio de aluminio en estructura cristalográfica ortorrómbico, respectivamente. Estos resultados sugirieron la posibilidad de usar esta ceniza en la fabricación de bloques.

Con relación a la absorción y densidad de los bloques de concreto, según la Norma Técnica Colombiana NTC 4076, los bloques con ceniza cumplieron lo establecido para concretos con densidades de 2000 kg/m^3 o más, que deben tener un porcentaje de absorción total no superior al 12% (ver tabla 3).

Los especímenes sin ceniza, así como los especímenes con las diferentes adiciones, presentaron

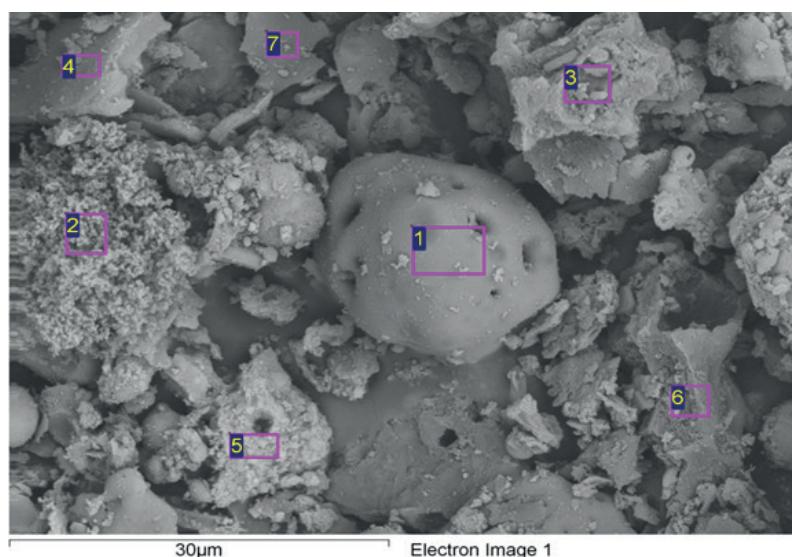


Figura 1. Detalle microscópico de la ceniza.

Fuente: Informe del Laboratorio de Difracción de Rayos X de la Universidad del Valle, tomado de Ballesteros (2016).

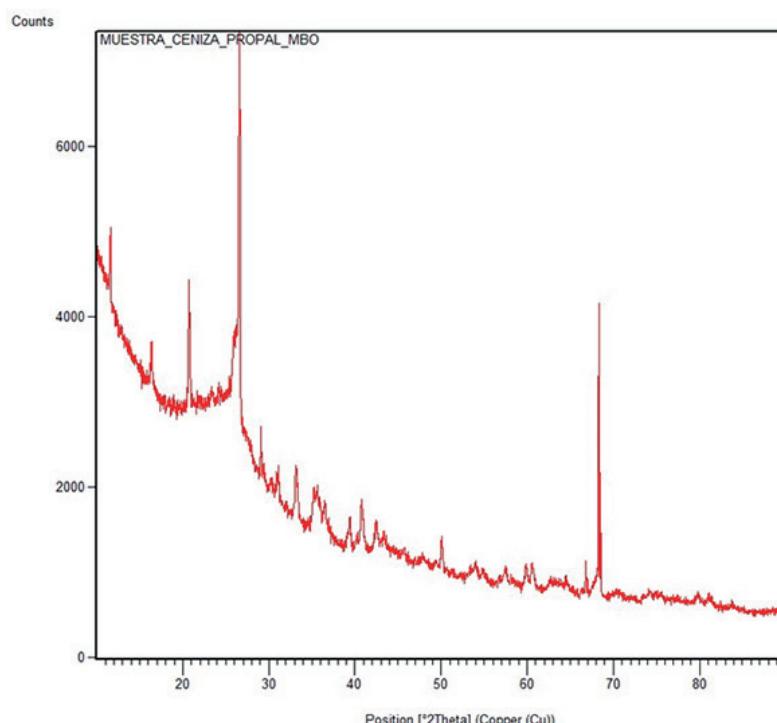


Figura 2. Difractograma de la muestra de ceniza.

Fuente: Informe del Laboratorio de Difracción de Rayos X de la Universidad del Valle, tomado de Ballesteros (2016).

a los 28 días resistencias mayores o iguales a 10 MPa, que es el valor de la resistencia de los bloques para uso no estructural que se ofrecen en el mercado (ver figura 4).

En general, la resistencia mecánica de los bloques preparados superó la resistencia mecánica de los bloques ofrecidos normalmente en el mercado (tabla 4).

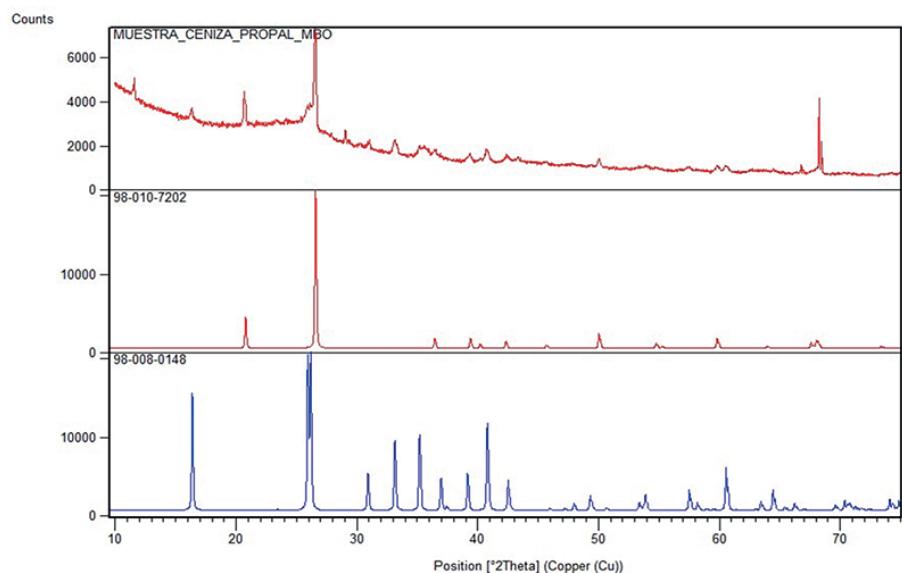


Figura 3. Difractograma y fases de la muestra de ceniza

Fuente: Informe del Laboratorio de Difracción de Rayos X de la Universidad del Valle, tomado de Ballesteros (2016).

Tabla 3. Absorción total y densidad de los especímenes.

Propiedad	Testigo	10% ceniza	20% ceniza	30% ceniza	40% ceniza
Absorción de agua (%)	6,7%	7,64%	8,94%	8,18%	9,30%
Densidad (kg/m ³)	2,211	2,156	2,107	2,088	2,080

Fuente: basado de Ballesteros (2016).

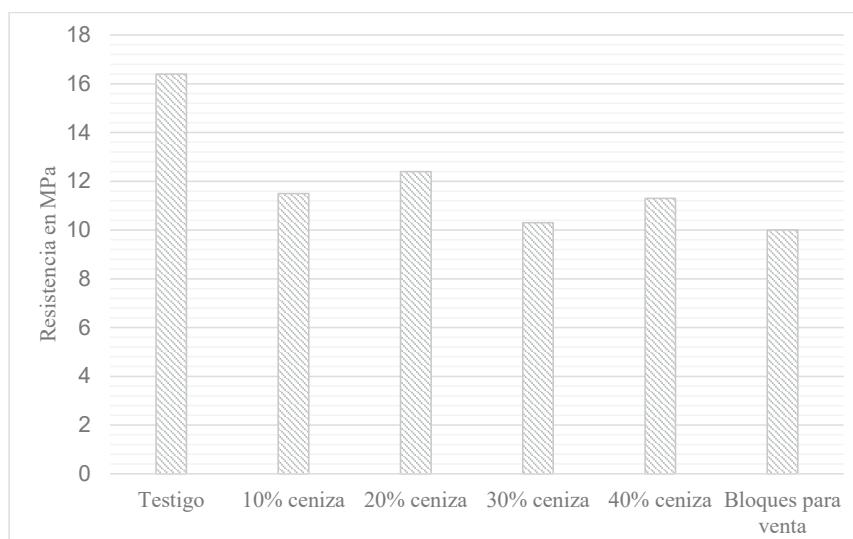


Figura 4. Resistencias promedio a compresión de los bloques.

Fuente: basado de Ballesteros (2016).

Tabla 4. Resultados de resistencia a compresión.

Espécimen	MPa	Desviación estándar	Varianza
Testigo	16,4	2,4	5,8
10% ceniza	11,5	2,4	5,6
20% ceniza	12,4	1,4	1,9
30% ceniza	10,3	1,6	2,4
40% ceniza	11,3	1,6	2,5

Fuente: basado de Ballesteros (2016).

El comportamiento mecánico de los bloques modificados ensayados demostró que puede usarse la ceniza como reemplazo del cemento 40%, por cuanto en todos los casos la resistencia del bloque fue superior a la resistencia del bloque estándar.

Al instante de la captura termográfica, la temperatura fue de 37,5 °C, con una humedad del 52%. En general, la respuesta térmica de los bloques reveló que todos tuvieron la capacidad de absorber calor y que, en la medida en que se incrementó la proporción de ceniza, la capacidad de absorción también aumentó. Sin embargo, los huecos propios de la estructura de los bloques favorecen el paso del aire lo que hace que se concentre la temperatura hacia el centro del espécimen y, finalmente, logra que ocurra un descenso de temperatura hacia la parte superior donde nuevamente se presenta circulación de aire, como se observa en la respuesta térmica de los bloques (ver figuras 5a a 5e). Para el caso del bloque testigo (sin ceniza, figura 5a), en el área demarcada (Ar1) se observa que la temperatura varía entre 37,6 y 42 °C, mientras que en la zona central del bloque se mantiene una temperatura de 39,2 °C. El piso de arcilla vitrificada se encuentra a una temperatura promedio de 40,7 °C; mientras que la zona sobre la cual se proyecta la sombra del bloque muestra los valores más bajos de temperatura (34,3 °C).

En cuanto al bloque con adición del 10% de ceniza (ver figura 5b), este presentó una variación de temperatura entre 36,9 y 46,2 °C, con un valor de temperatura para la zona central del bloque de 41,3 °C. El piso en arcilla vitrificada, al momento de la toma de las imágenes, se encontraba a 41 °C de temperatura, mientras que la zona bajo la sombra estaba a 34,3 °C. Al igual que en el caso del testigo, existe una circulación de aire causada por la ubicación del espécimen sobre el bloque de apoyo; aun así, la temperatura aumentó aproximadamente 1 °C frente a la temperatura del testigo (ver figura 5b).

Con relación al bloque con 20% de sustitución de ceniza, la temperatura registrada osciló entre 38,1 y 46,2 °C, con una temperatura al centro de 41,6

°C (figura 5c). Por su parte, los bloques fabricados con 30% de sustitución con ceniza muestran temperaturas que varían entre 37,7 y 45,9 °C, con una temperatura al centro de 42,3 °C.

Finalmente, en el bloque preparado con 40% de ceniza, las temperaturas oscilaron entre 37,9 y 46,8 °C, con una temperatura al centro de 42,8 °C (figura 5e), 3,6 °C por encima del valor reportado en el bloque testigo, mostrando una tendencia ascendente, lo que sugiere que la adición de ceniza reduce la capacidad de refracción del concreto aumentando las temperaturas.

De las figuras 6a a 6e se puede observar la variación térmica de los mampuestos y la máxima temperatura promedio hacia el centro, situación que se puede resumir de la siguiente forma:

- 39,8 °C en los bloques testigos (figura 6a).
- 41,6 °C en bloques preparados con 10% de ceniza (figura 6b).
- 42,2 °C en aquellos bloques con 20% de ceniza (figura 6c).
- 41,8 °C en los que fueron preparados con 30% de ceniza (figura 6d).
- 42,4 °C en los bloques en cuya fabricación se sustituyó el 40% de cemento por ceniza (figura 6e).

En este estudio se tomaron los valores de temperatura de bloques individuales; sin embargo, es importante tener presente que el comportamiento termográfico se debe hacer en un muro de manera que sea posible estimar la radiación térmica absorbida por unidad de tiempo y unidad de superficie para definir, a nivel constructivo, si se requiere el uso de aislantes térmicos en aquellas zonas en donde se concentra la temperatura en el muro. Con esta base, se recomienda continuar los estudios experimentales para corroborar el comportamiento térmico identificado en los bloques, analizando el fenómeno en muros o muretes. Con relación a la adición de la ceniza proveniente de la combustión del carbón en el proceso de producción del papel los resultados de las pruebas a compresión confirman que esta ceniza podría ser empleada para la fabricación de bloques de concreto, incluso en sustituciones hasta del 40% de ceniza por cemento, tal y como lo sugieren otros estudios como el de Bouzoubaâ *et al.* (2011). Otros niveles de sustitución de cemento por cenizas también son atractivos (Asi y Abdullah, 2005; Topcu *et al.*, 2008; Nuruddin *et al.*, 2011; Chousidis *et al.*, 2015; Rebeiz y Craft, 2002).

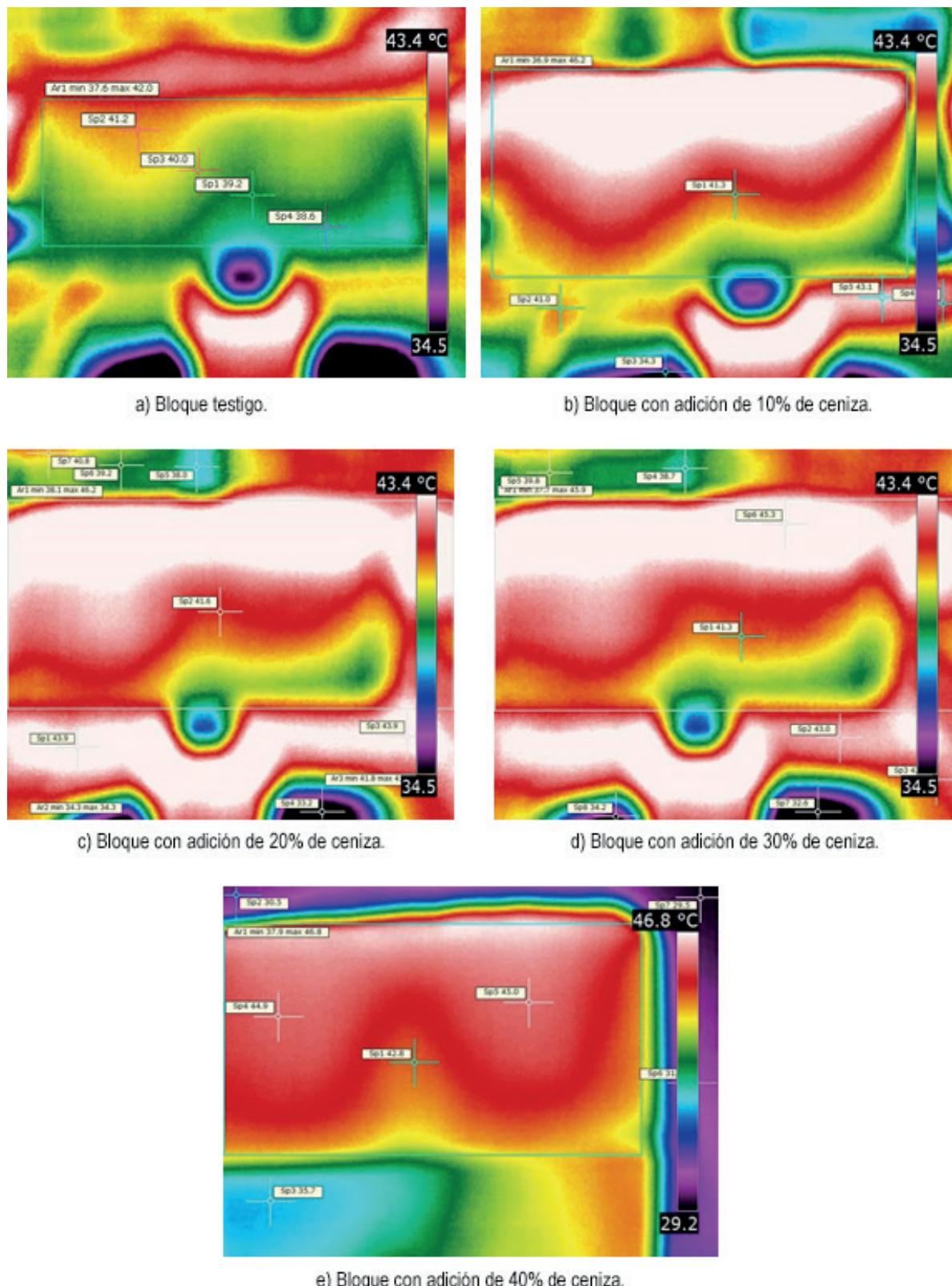
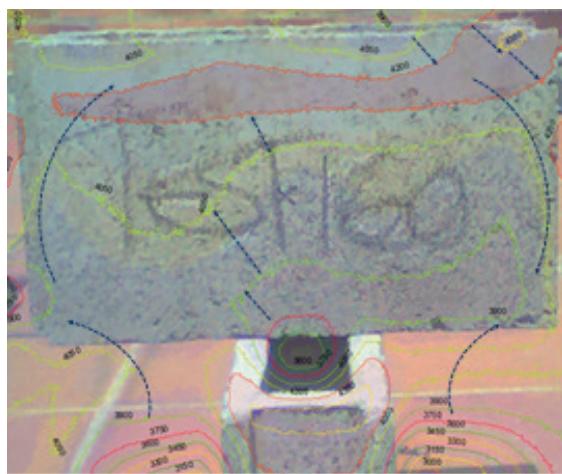
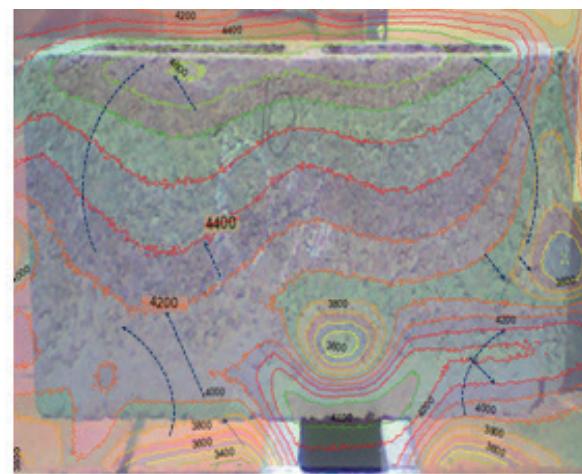


Figura 5. Variaciones de temperatura para diferentes adiciones de ceniza.

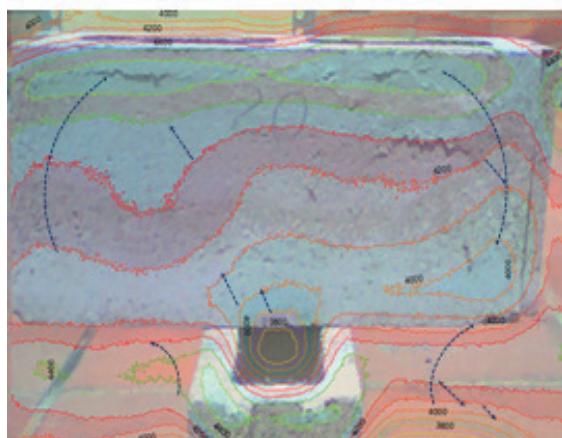
Fuente: basado de Ballesteros (2016).



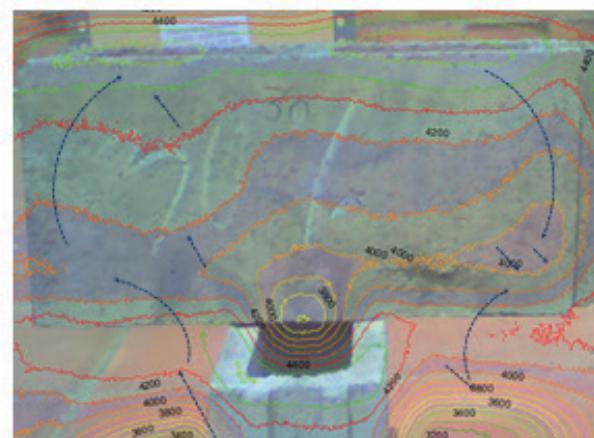
a) Máx. temperatura hacia el centro 40,5 °C.



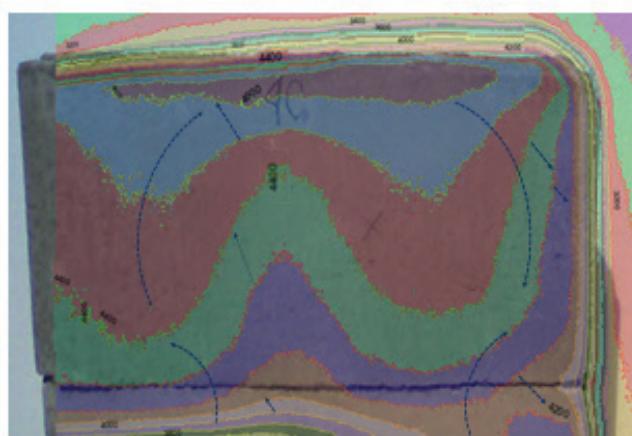
b) Máx. temperatura hacia el centro 44 °C.



c) Máx. temperatura hacia el centro 42 °C.



d) Máx. temperatura hacia el centro 42 °C.



e) Máx. temperatura hacia el centro 44 °C.

Figura 6. Representación de curvas de temperatura para diferentes adiciones de ceniza.

Fuente: basado de Ballesteros (2016).

CONCLUSIONES

El progreso de la economía exige, en ocasiones, un consumo acelerado de recursos y materias primas, con el consecuente problema ambiental de la generación de residuos industriales. En este contexto, existe la posibilidad de hacer alianzas entre las empresas privadas, universidades y centros de investigación de modo que se estudien soluciones a problemas productivos relacionados con el medio ambiente y la fabricación de nuevos materiales. Por ejemplo, en este estudio se vinculó a una empresa productora de papel con una productora de bloques de concreto para estudiar la factibilidad de fabricar bloques de concreto adicionados con ceniza para uso no estructural. Se observó que los bloques de concreto pueden ser preparados con sustituciones hasta del 40% de ceniza sin afectar la resistencia que se ofrece al mercado en los bloques convencionales. Los estudios termográficos realizados en los bloques adicionados con cenizas industriales sugieren, de manera preliminar, que este material constructivo puede ser empleado para absorber el calor, lo que deberá corroborarse con investigaciones futuras.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración de la empresa Blokes S. A. y de la empresa Propal, así como de los estudiantes Juan Pablo Sánchez y Alejandro Torres de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana Cali.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Asi, I. y Abdullah, A. (2005). Effect of Jordanian oil shale fly ash on asphalt mixes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(5), 553-559.
- [2] Azevedo, A. A.; Martins, M. C. y Dal Molin, D. C. (2001). A study of the penetration of chloride in rice-husk ash concrete. *International Concrete*, 202, 379-396.
- [3] Ballesteros, C. D. (2016). *Ecobloques para aplicaciones no estructurales en el sector de la construcción*. (Trabajo de maestría). Pontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia. Recuperado de <http://vitela.javerianacali.edu.co/handle/11522/7312>.
- [4] Bouzoubaâ, N.; Bilodeau, A.; Fournier, B.; Hooton, R. D.; Gagné, R. y Jolin, M. (2011). Deicing salt scaling resistance of concrete incorporating fly ash and (or) silica fume: laboratory and field sidewalk test data. *The Canadian Journal of Civil Engineering*, 38, 373-382. Recuperado de <https://www.nrcresearchpress.com/doi/full/10.1139/L08-067>.
- [5] Bui, D.; Hu, J. y Stroeven, P. (2005). Particle size effect on the strength of rice husk ash blended gap-graded portland cement concrete. *Cement and Concrete Composites*, 27(3), 357-366.
- [6] Buitrago, R. (2015). *Comunicación personal en la planta de producción de Blokes S. A.* Cali, Colombia: s. e.
- [7] Cámara Colombiana de la Construcción (2014). *Tendencias de la construcción: economía y coyuntura sectorial*. Informe de investigación: Características del mercado laboral en el sector de la construcción. Bogotá, Colombia: Coordenada Urbana.
- [8] Chousidis, N.; Rakanta, E.; Ioannou, I. y Batis, G. (2015). Mechanical properties and durability performance of reinforced concrete containing fly ash. *Construction and Building Materials*, 101, 810-817.
- [9] Delgado, J.; Martínez, J. P.; Guzmán, A.; Delvasto, S.; Amigó, V. y Sánchez, E. (2015). Reemplazo del cuarzo por ceniza de tamo de arroz en la manufactura de gres porcelánico. *Revista EIA*, 12(23), 41-50. Recuperado de <https://revistas.eia.edu.co/index.php/reveia/article/view/719/671>.
- [10] Guía de la termografía infrarroja. Aplicaciones en ahorro y eficiencia energética (2011). Madrid, España: Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid / Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. Recuperado de: <http://www.madrid.org/bvirtual/BVCM015258.pdf>.
- [11] Fernandes, I. (2015). *Blocos e Pavers: produção e controle de qualidade*. Sexta edición. São Paulo, Brasil: Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais Ltda.
- [12] Giacco, G.; Rodríguez, G. y Zerbino, R. (2007). Failure mechanism of normal and high-strength concrete with rice-husk ash. *Cement Concrete Composites*, 29(7), 566-574.
- [13] Hossain, K. M. A. y Lachemi, M. (2010). Fresh, mechanical, and durability characteristics of self-consolidating concrete incorporating volcanic ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(7), 651-657.
- [14] Le, H. T. y Ludwig, H. M. (2016). Effect of rice husk ash and other mineral admixtures on

- properties of self-compacting high performance concrete. *Materials and Design*, 89, 156–166. Recuperado de <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-64262915-e181-3efd-ab26-310bf86be35d>.
- [15] Nuruddin, M. F.; Demie, S. y Shaf, N. (2011). Effect of mix composition on workability and compressive strength of self-compacting geopolymers concrete. *The Canadian Journal of Civil Engineering*, 38(11), 1196-1203.
- [16] Rebeiz, K. y Craft, A. (2002). Polymer concrete using coal fly ash, *Journal of Energy Engineering*, 128(3), 62-73.
- [17] Serrano, M. F.; Pérez, D. D.; Barajas, C. y Oquendo, D. (2012). Beneficios del uso de agregados no convencionales en mezclas de concreto. *Cemento y Hormigón*, (951), 46-51.
- [18] Serrano, M. F.; Pérez, D. D.; Sarmiento, C. O. y Grammes, F. (2013). Evaluación de las propiedades mecánicas de morteros modificados con cenizas provenientes de la desorción térmica de aguas de la industria petrolera. *Cemento y Hormigón*, (956), 10-14.
- [19] Slim, G.; Morales M.; Alrumaidhin, L.; Bridgman, P.; Gloor, J.; Hoff, S. y Odem, W. (2016). Optimization of polymer-amended fly ash and paper pulp millings mixture for alternative landfill liner. *Procedia Engineering*, 145, 312-318.
- [20] Teixeira, E. R.; Mateus, R.; Camoes, A. F.; Bragança, L. y Branco, F. (2016). Comparative environmental life-cycle analysis of concretes using biomass and coal fly ashes as partial cement replacement material. *Journal of Cleaner Production*, 112(4), 2221-2230.
- [21] Topcu, I. B.; Toprak, M. U. y Akdag, D. (2008). Determination of optimal microwave curing cycle for fly ash mortars. *The Canadian Journal of Civil Engineering*, 35(4), 349-357.
- [22] Vidal, H. (2016). *Comunicación personal*. Cali, Colombia.
- [23] Xu, Y.; Wong, Y. L.; Poon, C. S. y Anson, M. (2003). Influence of PFA on cracking of concrete and cement paste after exposure to high temperatures. *Cement and Concrete Research*, 33(12), 2009-2016.