



Evaluación de un residuo de la combustión de carbón como reemplazo parcial de arena en la producción de ladrillos cerámicos

Evaluation of a coal combustion waste as a partial replacement for sand in the production of ceramic bricks

José Fernando Benítez-Vivas ¹, Luisa Fernanda Mosquera-Idrobo ², Janneth Torres-Agredo ³

Fecha de Recepción: 12 de septiembre de 2022

Fecha de Aceptación: 27 de marzo de 2023

Cómo citar: Benítez-Vivas, J.F., Mosquera-Idrobo, L.F. y Torres-Agredo, J. (2023). Evaluación de un residuo de la combustión de carbón como reemplazo parcial de arena en la producción de ladrillos cerámicos. *Tecnura*, 27(78), 103-122. <https://doi.org/10.14483/22487638.19956>

ABSTRACT

Context: During the combustion of coal, large amounts of residues are generated, such as bottom ash. These have been investigated as a replacement for cement and as a substitute for sand to produce concrete. Also, this residue can be used for the manufacture of clay products.

Method: A physicochemical and mineralogical characterization of the bottom ash was carried out; furthermore, the toxicity of the residue was evaluated through the leaching test-Toxicity Characteristic Leaching Procedure and the ecotoxicity test-Daphnia pulex. Then, bricks were manufactured at the laboratory level with the addition of ash in 2%, 4%, 6% and 8% with respect to the amount of sand; the physical and mechanical properties were evaluated and environmental tests were carried out on the bricks.

Results: The results showed a reduction in compressive strength with increasing ash; however, the bricks that incorporated 4% ash obtained a resistance of 14.16 MPa, which met the minimum criteria of compressive strength of the Colombian standard for non-structural masonry. On the other hand, the applied leaching test showed that leachable metal concentrations were below environmental regulations.

Conclusions: These findings demonstrate the feasibility of using up to 4% coal bottom ash, as a replacement for sand in clay brick production. This will mitigate the problems associated with its removal.

Keywords: Coal, bottom ash, ecological bricks, mechanical properties.

¹Ingeniero químico, estudiante de Maestría en ingeniería ambiental de la Universidad Nacional de Colombia. Palmira, Colombia.

Email: jbenitezv@unal.edu.co

²Ingeniera ambiental de la Universidad Nacional de Colombia. Palmira, Colombia.

Email: lufmosqueraid@unal.edu.co

³Tecnóloga Química e Ing. de Materiales, Dra. en Ingeniería con énfasis en Ingeniería de Materiales, profesora titular de la Universidad Nacional de Colombia. Palmira, Colombia.

Email: jtorresa@unal.edu.co

RESUMEN

Contexto: Durante la combustión de carbón se generan grandes cantidades de residuos, como las cenizas de fondo; éstas se han investigado como reemplazo del cemento y como sustituto de la arena para la producción de concreto. Además, este residuo puede ser usado para la fabricación de productos de arcilla.

Método: En este estudio, se llevó a cabo una caracterización físico-química y mineralógica de las cenizas de fondo; además, se evaluó la toxicidad del residuo a través del test de lixiviación-Procedimiento de Lixiviación Característico de Toxicidad y del ensayo de ecotoxicidad-Daphnia pulex. Seguidamente, se fabricaron ladrillos a nivel de laboratorio con adición de cenizas en 2 %, 4 %, 6 % y 8 % con respecto a la cantidad de arena; se evaluaron propiedades físicas y mecánicas y, se realizaron ensayos ambientales a los ladrillos.

Resultados: Los resultados mostraron una reducción de la resistencia a la compresión con el aumento de cenizas; sin embargo, los ladrillos que incorporaron cenizas al 4 % obtuvieron una resistencia de 14,16 MPa el cual cumple con los criterios mínimos de resistencia a la compresión de acuerdo con la norma colombiana para mampostería no estructural. Por otra parte, el ensayo de lixiviación aplicado mostró que las concentraciones de metales lixiviables estaban por debajo de las regulaciones ambientales.

Conclusiones: Estos hallazgos demuestran la viabilidad de utilizar hasta un 4 % de cenizas de fondo de carbón como reemplazante de arena en la producción de ladrillos de arcilla. El cual permitirá mitigar los problemas asociados a su eliminación.

Palabras clave: Carbón, cenizas de fondo, ladrillos ecológicos, propiedades mecánicas.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se ha promovido el uso de energías renovables, sin embargo, la industria del carbón continúa siendo un sector importante del suministro de energía en el mundo (Rodríguez-Álvarez, R., González-Fonteboa, B., Seara-Paz, S., & Rey-Bouzón, E. J. (2021)), (Zhou, H., Bhattarai, R., Li, Y., Si, B., Dong, X., Wang, T., & Yao, Z. (2021)). Se estima que para el 2030, el 47 % del abastecimiento eléctrico mundial se generará de plantas térmicas a base de carbón (Ankur, N., & Singh, N. (2021)). Durante la combustión de carbón se generan grandes cantidades de residuos, como cenizas de fondo, cenizas volantes, escorias y materiales de la desulfuración de gases de combustión (Rodríguez-Álvarez, R., González-Fonteboa, B., Seara-Paz, S., & Rey-Bouzón, E. J. (2021)). Las cenizas de fondo (CFC), son partículas pesadas que caen al piso y representan entre el 15-25 % del total de las cenizas de carbón producidas (Ankur, N., & Singh, N. (2021)). Las CFC están compuestas principalmente por óxidos de sílice, aluminio, hierro y calcio, estas dos últimas en menor proporción; dicha composición puede variar dependiendo de la fuente de carbón. Su composición mineralógica consiste básicamente en cuarzo, mullita y en menores proporciones cristobalita, hematita y magnetita. También presenta

una gran cantidad de fases amorfas (Da Fonseca, B. S., Galhano, C., & Seixas, D. (2015)). La literatura además reporta un tamaño de partícula entre 63 micras a 10 mm (Singh, M. (2018)), (Hashemi, S. S. G., Mahmud, H. B., Ghuan, T. C., Chin, A. B., Kuenzel, C., & Ranjbar, N. (2019)). Debido a la presencia de metales pesados tales como arsénico, cromo, boro, vanadio y antimonio, las cenizas de carbón han sido consideradas por algunos autores como residuos peligrosos; además porque éstos pueden lixiviar y contaminar suelos y aguas (Sushil, S., & Batra, V. S. (2006)) y (Rai, U. N., Pandey, K., Sinha, S., Singh, A., Saxena, R., & Gupta, D. K. (2004)). En el estudio llevado a cabo por (Sushil, S., & Batra, V. S. (2006)), encontraron la presencia de metales tales como Cr, Pb, Mn, Zn, Cu, Ni y Co, tanto en cenizas volantes como en cenizas fondo. Sin embargo, los autores reportaron mayores concentraciones de estos metales en las cenizas volantes, lo cual lo atribuyen a la diferencia de masa que hay entre los metales; estos valores también pueden variar de una planta a otra y entre países. Por otra parte, (Hashemi, S. S. G., Mahmud, H. B., Ghuan, T. C., Chin, A. B., Kuenzel, C., & Ranjbar, N. (2019)), utilizaron el método de solidificación/estabilización para reducir la lixiviación de metales presentes en las CFC; para llevar a cabo el proceso realizaron mezclas de CFC con Cemento Portland (CEM I). Las cenizas evaluadas presentaban iones de Cd, Cu, Ni y Pb que sobrepasaban los estándares de toxicidad de Malasia. Los autores encontraron que todos los elementos se lograron inmovilizar con éxito, incluso cuando las mezclas presentaban un bajo contenido de cemento. Vale la pena mencionar, que los estudios de lixiviación de metales en las CFC son escasos, básicamente se han realizado estudios de lixiviación en las cenizas volantes de carbón. Por otra parte, en los últimos años se han investigado las CFC como reemplazo del cemento y como sustituto de la arena para la producción de concreto (Kim, H. K., & Lee, H. K. (2011)), (Aydin, E. (2016)), (Rafieizonooz, M., Mirza, J., Salim, M. R., Hussin, M. W., & Khankhaje, E. (2016)), (Singh, M., & Siddique, R. (2016)) y (Argiz, C., Moragues, A., & Menéndez, E. (2018)). También, desde el punto de vista teórico, de acuerdo con la composición química y mineralógica, este residuo puede ser usado para la fabricación de productos de arcilla (Da Fonseca, B. S., Galhano, C., & Seixas, D. (2015)). (Naganathan, S., Mohamed, A. Y. O., & Mustapha, K. N. (2015)) evaluaron el desempeño de ladrillos elaborados con cemento, cenizas volantes y cenizas de fondo de carbón. En los ladrillos obtenidos la resistencia a la compresión osciló entre 7,13 y 17,36 MPa, resistencias que se encuentran dentro de los límites para los ladrillos convencionales. También, se reportó que los ladrillos presentaron una durabilidad mayor comparada con los ladrillos de arci-

lla. Finalmente, concluyen que las cenizas volantes y cenizas de fondo presentan un gran potencial para ser utilizados como materia prima en la producción de ladrillos. Por su parte, ([Alhokabi, A. A., & Ing, D. S. \(2019\)](#)) investigaron el reemplazo parcial de arena por cenizas de fondo de carbón en la producción de ladrillos. Para el proceso de fabricación se estudió la sustitución del cemento portland ordinario por cenizas volantes en un 20 % y, reemplazos de arena del 5 %, 10 %, 15 % y 20 % por las CFC. Los resultados mostraron que la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión más alta se presentó para las mezclas que incorporaron cenizas de fondo al 5 %, pero fueron menores en comparación con la muestra control. Los autores mencionan que las cenizas de carbón pueden ser utilizadas en la elaboración materiales de construcción, para el remplazo de agregados naturales. Vale la pena mencionar, que la posibilidad de darles diversos usos a las cenizas de carbón a nivel industrial tiene una importante relevancia ambiental y económica, que se traduce en la disminución del uso de terrenos y costos de disposición, además que se impulsa la economía local ([Spadoni, M., Voltaggio, M., Sacchi, E., Sanam, R., Pujari, P. R., Padmakar, C., & Wate, S. R. \(2014\)](#)). Por lo tanto, el presente trabajo, tiene como objetivo estudiar y evaluar las cenizas de fondo de carbón (CFC) como materia prima para la fabricación de ladrillos de arcilla. Con esto se lograría no sólo su valorización, sino también la prevención de los impactos ambientales causados por su disposición final. Este estudio está orientado en el concepto de desarrollo sostenible, puesto que se pretende contribuir a las soluciones de los problemas de reducción de áridos naturales y reducción de tierras por disposición de residuos. El cual apunta al objetivo del desarrollo sostenible ([Naciones Unidas \(2015\)](#)): ODS 12 “Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles”, con el fin de lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales y, reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización.

2. METODOLOGÍA

Caracterización de las cenizas de fondo de carbón

Las cenizas de fondo de carbón (CFC), objeto de estudio, fueron suministradas por una industria colombiana. Se seleccionaron cuatro muestras, las cuales se denominaron CFC1, CFC2, CFC3 y CFC4. Las cenizas se tomaron en diferentes tiempos de producción. Se evaluó la composición química, mi-

neralógica y morfológica de las cenizas, mediante las técnicas de fluorescencia de rayos X, difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido (SEM), respectivamente. Así mismo, se determinó la distribución de tamaño de partícula por la técnica de granulometría láser y se evaluó la pérdida al fuego de las muestras. El análisis químico se determinó utilizando un espectrómetro de fluorescencia de rayos X MagisPro PW-2440 Philips (WDXRF) equipado con un tubo de Rodio, con una potencia máxima de 4 KW. El análisis semicuantitativo se realizó con el software SemiQ5, haciendo 11 barridos, con el fin de detectar todos los elementos presentes en la muestra, excluyendo H, C, Li, Be, B, N, O y los elementos transuránicos.

La composición mineralógica se obtuvo en un difractómetro de rayos X marca PANalytical, modelo EMPYREN, la muestra fue medida en una configuración óptica Bragg-Brentano con un detector de estado sólido de alta velocidad para la adquisición de datos, denominado PIXCEL.

La morfología de las cenizas se analizó por Microscopía electrónica de Barrido (SEM), utilizando un equipo marco JEOL (JSM 5910 LV), operada a un voltaje de aceleración de 20 Kv, las imágenes se obtuvieron a un aumento de 100. Además, se realizó el análisis de composición química utilizando un espectrómetro de dispersión de energía de rayos X (EDS).

Fabricación de ladrillos a nivel de laboratorio

Las materias primas utilizadas para la fabricación de ladrillos fueron arcilla, chamote (ladrillo molido), arena y ceniza de fondo; para esta última se seleccionó un solo tipo de ceniza (CFC3). En la Tabla 1, se muestra la proporción de la materia prima utilizada para la elaboración de los ladrillos adicionados con la ceniza como reemplazo de arena. Los ladrillos fueron fabricados a nivel de laboratorio (ver Figura 1). En el proceso de fabricación de ladrillos, las materias primas se mezclaron mecánicamente, la cantidad de agua añadida se ajustó hasta obtener una consistencia maleable; posteriormente, los ladrillos se secaron a temperatura ambiente por un día; después se ingresaron a un horno microondas a 190°C por 24 horas. Finalmente, los ladrillos pasaron por un horno túnel por 24 horas, a una temperatura de 850°C. Este último paso se realizó en el horno de la empresa que suministró el residuo para el presente estudio.

Tabla 1. Composición de la materia prima para la elaboración de los ladrillos.

Fuente: Autores.

Tipo de Ladrillo	Arcilla (%)	CFC3 (%)	Chamote (%)	Arena (%)
F0 (control)	75	0	12,5	12,5
F2	75	2	12,5	10,5
F4	75	4	12,5	8,5
F6	75	6	12,5	6,5
F8	75	8	12,5	5,5



Figura 1. Ladrillos fabricados con adición de cenizas de fondo

Fuente: Autores.

Se llevaron a cabo los ensayos de porosidad aparente, densidad aparente y gravedad específica de acuerdo con la norma ASTM C20: 2010. La resistencia a la compresión y absorción de agua se aplicó siguiendo los lineamientos de la NTC 4017:2015. También, se determinó la pérdida de peso y contracción lineal a las muestras de ladrillos.

Por último, considerando que posiblemente las cenizas estudiadas sean un residuo peligroso, se evaluó la toxicidad del residuo (CFC3) a través del test de lixiviación- Procedimiento de Lixiviación Característico de Toxicidad (TCLP por sus siglas en inglés) (EPA SW-846 Método 1311). Así mismo, a los ladrillos producidos a nivel de laboratorio se les realizaron los ensayos ambientales y el ensayo de

toxicidad aguda para *Daphnia Pulex* siguiendo el protocolo 6,3 del IDEAM (Resolución 002 de 2007); con el fin de verificar su condición de producto no peligroso.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características de las cenizas de fondo de carbón

En la Tabla 2, se presenta las características químicas de las cenizas de fondo de carbón; donde se observa que las CFC evaluadas tienen composiciones similares. El contenido de SiO_2 en las cenizas está entre 59,04 % y 63,12 %, siendo éste su componente principal; seguido de otros óxidos como Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SO_3 y CaO . Las CFC evaluadas presentan composiciones químicas similares a lo reportado por (Sutcu, M., Erdogmus, E., Gencel, O., Gholampour, A., Atan, E., & Ozbakkaloglu, T. (2019)), donde se evalúa las CFC como materia prima para la elaboración de ladrillos de arcilla. Además, la pérdida al fuego de las cenizas estuvo entre 13,28 % y 30,62 %; siendo CFC3 la que presentó el más alto porcentaje.

Por otra parte, es importante mencionar que las cenizas presentan en su composición metales como Cr, V, Ba, Pb que pueden lixiviar al ambiente (Sushil, S., & Batra, V. S. (2006)) y, por lo tanto, afectar su aprovechamiento como material de construcción. Por tal motivo, se realizaron ensayos de lixiviación y de ecotoxicidad al residuo; los cuales se presentarán más adelante.

Tabla 2. Composición química de las cenizas de fondo de carbón.

Fuente: Autores.

Características	CFC1	CFC2	CFC3	CFC4
SiO ₂	59,04	63,12	59,86	60,66
Al ₂ O ₃	22,00	24,15	24,24	24,98
Fe ₂ O ₃	8,64	4,76	7,16	6,30
SO ₃	3,80	1,58	2,76	2,19
CaO	1,77	1,85	1,39	1,42
TiO ₂	1,32	1,30	1,30	1,29
P ₂ O ₅	1,12	1,05	1,01	1,04
K ₂ O	0,92	0,82	1,11	0,94
Na ₂ O	0,41	0,47	0,38	0,39
MgO	0,35	0,39	0,33	0,32
Cr	0,18	0,02	0,03	0,06
Ba	0,13	0,15	0,15	0,15
MnO	0,03	0,02	0,01	0,01
V	0,02	0,03	0,02	0,02
Cu	0,01	0,02	0,02	94 ppm
Pb	0,01	97 ppm	-	0,01
Zn	76 ppm	51 ppm	46 ppm	55 ppm
Se	-	28 ppm	-	-
Sr	0,11	0,10	0,12	0,11
Ce	0,06	0,09	0,04	0,04
Y	81 ppm	57 ppm	60 ppm	54 ppm
Pérdida al fuego (%)	22,81	16,65	30,62	13,28

En la Figura 2, se presenta el difractograma de rayos X para la muestra CFC3. Se observa que la ceniza tiene una estructura parcialmente amorfa, debido al levantamiento de la línea base; además,

presenta fases cristalinas como Cuarzo (SiO_2), Hematita (Fe_2O_3) y Anatasa (TiO_2). La cuantificación de las fases cristalinas y fase amorfa de las cenizas se presentan en la Tabla 3; donde se observa que el principal constituyente de las cenizas es el cuarzo (58,7%), seguido de la fase amorfa (23,2%). Debido a esto, la ceniza de fondo del estudio se puede considerar como un material desgrasante, debido al alto contenido de Cuarzo (Afanador García, N., Ibarra Jaime, A. C., & López Durán, C. A. (2013)). Estos resultados son consistentes con la composición química de las cenizas (ver Tabla 2).

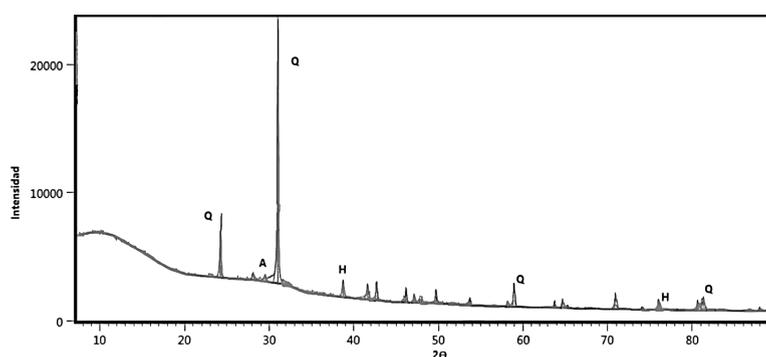


Figura 2. Difractograma de CFC3. Q-Cuarzo; H-Hematita; A-Anatasa.

Fuente: Autores.

Tabla 3. Cuantificación de las fases cristalina y fase amorfa de las cenizas de fondo.

Fuente: Autores.

Fases	Fórmula química	CFC3 (%)
Cuarzo	SiO_2	58,7
Hematita	Fe_2O_3	15,9
Anatasa	TiO_2	2,2
Amorfos	-	23,2

Teniendo en cuenta los anteriores resultados, se puede afirmar que las cenizas de fondo de carbón estudiadas presentan un gran potencial para ser aprovechadas como materia prima secundaria en la fabricación de ladrillos de arcilla, debido a su composición química y mineralógica (Torres, J., Mosquera, L. F., Paz, P., and Díaz, M. F. (2021)).

En cuanto a las características físicas, la distribución de tamaño de partícula se muestra en la Figura 3.

La ceniza presentó un tamaño de partícula medio de 166 μm . Por otra parte, es importante mencionar que la arena utilizada para este estudio presentó un tamaño de partícula de aproximadamente 200 μm .

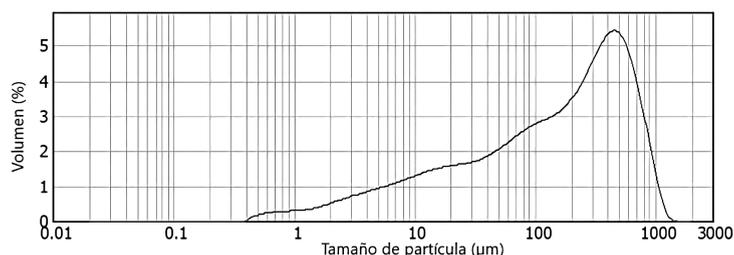


Figura 3. Distribución de tamaño de partícula de CFC3.

Fuente: Autores.

En la Figura 4, se presenta la morfología de la muestra CFC3. Se observan partículas angulares irregulares de diferentes tamaños, lo que confirma la distribución de partícula (Figura 3); además, las CFC presentan algunas partículas porosas. Por otra parte, el análisis EDS muestra que las cenizas presentan SiO_2 como componente principal, seguido de Al_2O_3 . Estos resultados ratifican lo obtenido en el análisis de FRX y DRX.

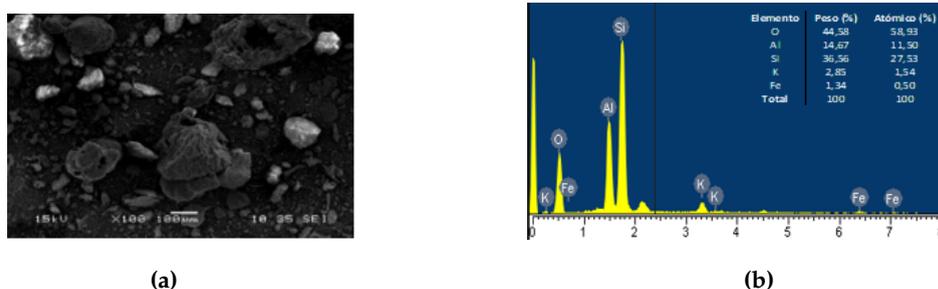


Figura 4. (a) Imagen SEM y (b) patrón EDS de CFC3

Fuente: Autores.

Evaluación de los ladrillos cerámicos

En la Tabla 4, se presentan los resultados de absorción de agua, porosidad aparente, densidad aparente, gravedad específica aparente y pérdida de peso de los ladrillos fabricados con CFC y del ladrillo control.

La durabilidad de los ladrillos depende en gran medida de la absorción de agua; donde una alta

absorción de agua puede generar grietas en los cuerpos cerámicos y, por lo tanto, disminuir su durabilidad (Hasan, M. R., Siddika, A., Akanda, M. P. A., & Islam, M. R. (2021)). La absorción de agua en las muestras de ladrillos presentó un ligero incremento con el aumento en la proporción de las cenizas. Los ladrillos que incorporaron CFC3 al 8 % presentaron la absorción más alta, con un porcentaje del 22,6 %, en comparación con los ladrillos control (16,77 %); lo que resultó en un aumento de aproximadamente del 35 %. Estudios de otros autores, reportan un aumento en la absorción de agua de ladrillos de arcilla que incorporan residuos (Sutcu, M., Erdogmus, E., Gencel, O., Gholampour, A., Atan, E., & Ozbakkaloglu, T. (2019)).

Así mismo, la porosidad es un parámetro importante para determinar la calidad y el rendimiento de los ladrillos (Hasan, M. R., Siddika, A., Akanda, M. P. A., & Islam, M. R. (2021)). Como se observa en la Tabla 4, la porosidad aparente de las muestras de ladrillos aumentó con la adición de cenizas. Esto es consistente con estudios anteriores que reportaron un aumento de la porosidad aparente de ladrillos con la adición de residuos (Tjaronge, M. W., & Caronge, M. A. (2021)). La porosidad más alta se presentó para el ladrillo F8 con un valor del 38,17 %, con relación a la muestra control que presentó una porosidad del 32,93 %. Por otro lado, la muestra de ladrillo F4 presentó una porosidad similar a la muestra control, con un valor del 33,76 %. El incremento de la porosidad aparente en las muestras de ladrillos con CFC puede estar relacionada con el alto porcentaje de pérdida al fuego de la ceniza CFC3, la cual fue del 30,62 % (Kazmi, S. M., Abbas, S., Saleem, M. A., Munir, M. J., & Khitab, A. (2016)).

La densidad aparente disminuyó con el aumento de cenizas en las muestras de ladrillos. La densidad disminuyó de 1,70 g/cm³ (ladrillo control) hasta un 1,51 g/cm³ (ladrillo F8), lo que representa una reducción del 11 %. Estas observaciones son similares a lo reportado por (Djamaluddin, A. R., Caronge, M. A., Tjaronge, M. W., & Irmawaty, R. (2020)). Por otra parte, la incorporación de cenizas generó una disminución en la gravedad específica de los ladrillos; excepto para los ladrillos F2; la gravedad específica más bajas se presentó para la muestra F8, con un valor de 2,44; comparada con la muestra control que obtuvo una gravedad específica de 2,54.

Por último, en la Tabla 4, se presenta la pérdida de peso de los ladrillos, durante el proceso de cocción. La adición de cenizas aumentó los valores de pérdida de peso de los ladrillos en comparación con la muestra control, siendo el máximo del 6,35 % para la muestra F8; lo que se puede atribuir al

alto valor de pérdida al fuego de CFC3.

Tabla 4. Propiedades de las muestras de ladrillos adicionados con CFC.

Fuente: Autores.

Tipo de ladrillo	Absorción de agua (%)	Porosidad aparente (%)	Densidad aparente (g/cm ³)	Gravedad específica aparente	Pérdida de peso (%)
F0	16,77	32,93	1,70	2,54	4,12
F2	20,91	36,68	1,61	2,54	5,02
F4	18,53	33,76	1,65	2,48	5,16
F6	21,61	37,83	1,53	2,47	5,35
F8	22,06	38,17	1,51	2,44	6,35

La contracción lineal de las muestras de ladrillos se presenta en la Figura 5; dicha contracción se genera por la pérdida de agua durante el proceso de combustión. Vale la pena mencionar que la contracción excesiva puede causar microgrietas dentro de los ladrillos (Hasan, M. R., Siddika, A., Akanda, M. P. A., & Islam, M. R. (2021)). Se observa que la contracción de los ladrillos disminuyó con el aumento de cenizas. La contracción lineal del ladrillo control fue del 7,4%; mientras que los ladrillos con cenizas se contrajeron hasta un 5,75%. Se establecen límites de contracción para ladrillos de buena calidad por debajo del 8% (Hasan, M. R., Siddika, A., Akanda, M. P. A., & Islam, M. R. (2021)), por lo que todos los ladrillos elaborados con cenizas cumplen con este parámetro. Estudios de otros autores, reportan que la contracción disminuye con la incorporación de residuos en ladrillos de arcilla (Tjaronge, M. W., & Caronge, M. A. (2021)) y (Hasan, M. R., Siddika, A., Akanda, M. P. A., & Islam, M. R. (2021)). Por otra parte, es importante mencionar que los ladrillos no presentaron deformaciones durante el proceso de cocción.

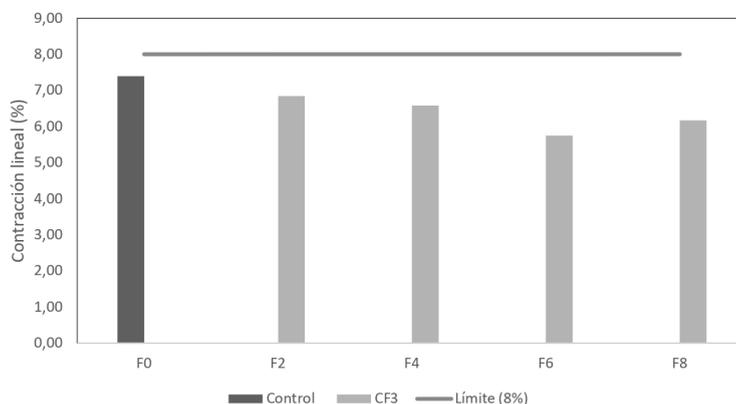


Figura 5. Contracción lineal de los ladrillos.

Fuente: Autores.

La propiedad más importante para determinar la calidad de los ladrillos es la resistencia a la compresión (Hasan, M. R., Siddika, A., Akanda, M. P. A., & Islam, M. R. (2021)). En la Figura 6, se muestra la resistencia a la compresión de los ladrillos; donde se observa que la resistencia disminuyó con la incorporación de cenizas. La muestra de ladrillo F4 (14,16 MPa) presentó una resistencia a la compresión similar a la muestra control (14,61 MPa), mientras que la muestra F8 (10,40 MPa) exhibió la resistencia a la compresión más baja en relación con la muestra control. La norma técnica colombiana NTC 4205-2:2019, para mampostería no estructural - ladrillos macizos, establece que la resistencia a la compresión promedio de 5 unidades debe ser mínimo de 14 MPa. Por lo tanto, los ladrillos que incorporaron CFC3 al 4 % cumplen con este requisito. La reducción de la resistencia a la compresión se ha reportado en otros estudios que incorporan residuos en la fabricación de ladrillos de arcilla (Tjaronge, M. W., & Caronge, M. A. (2021)).

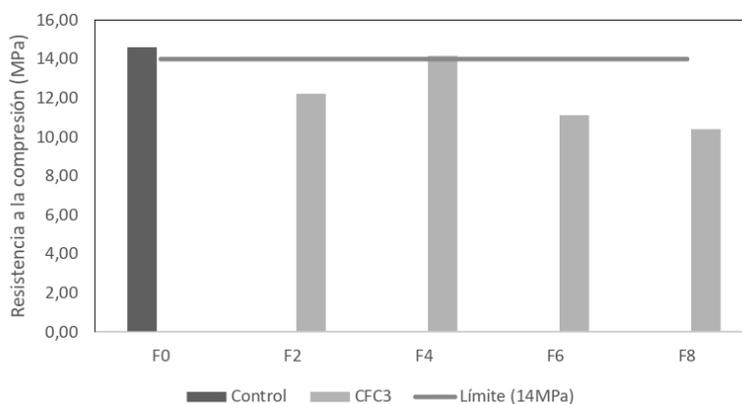


Figura 6. Resistencia a la compresión de los ladrillos .

Fuente: Autores.

Estos hallazgos indican que el reemplazo del 4% de arena con cenizas de fondo de carbón, se obtienen ladrillos que cumplen con los estándares establecido por la normatividad colombiana para la elaboración de ladrillos de arcilla para mampostería no estructural.

Caracterización ambiental

Durante la combustión de carbón, metales como Cd, Pb, Cr, Pb, Co presentes en el carbón se distribuyen en las cenizas volantes y cenizas de fondo (Saha, D., Roychowdhury, T., Chatterjee, D., & Joseph, A. (2022)). La concentración de estos metales depende de las condiciones de combustión, propiedades físicas y químicas del metal; la eficiencia del proceso de recolección también afecta la concentración de estos metales en las cenizas (Singh, M. (2018)). La liberación de estos metales pueden ser una fuente potencial de contaminación de aguas superficiales y subterráneas (Saha, D., Roychowdhury, T., Chatterjee, D., & Joseph, A. (2022)).

En la Tabla 5, se presentan los resultados obtenidos de la prueba de lixiviación- Procedimiento de Lixiviación Característico de Toxicidad (TCLP) para la ceniza CFC3 y la muestra de ladrillo F4. Se seleccionó el ladrillo F4, dado que, éste presentó la mejor resistencia a la compresión según la norma colombiana para mampostería no estructural. De acuerdo a los resultados, se encontró que los metales lixiviables evaluados se encuentran por debajo de lo establecido en el Decreto 4741 de 2005 (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2005)), para residuos peligrosos. Según lo anterior, las cenizas de fondo de carbón del presente estudio pueden ser consideradas como un resi-

duo no peligroso.

Tabla 5. Lixiviación de metales para CFC3 y ladrillo F4.

Fuente: Autores.

TCLP (mg/L)	CFC3	Ladrillo F4	Nivel máximo permisible (mg/L)*
As	0,0412	0,00396	5
Ba	<0,5	<0,5	100
Cd	<0,01	<0,01	1
Cr	<0,1	<0,1	5
Hg	<0,001	<0,001	0,2
Ag	<0,05	<0,05	5
Pb	<0,1	<0,1	5
Se	<0,0025	<0,0025	1
Zn	0,0645	<0,05	-

*Límite máximo establecido en la legislación colombiana para residuos peligrosos.

En el ladrillo, la lixiviación de metales también fue menor que las concentraciones límites. Se observa que la lixiviación de metales como As y Zn en el ladrillo fue inferior comparado con la lixiviación de las cenizas. Se puede decir que se presentó una inmovilización de estos metales en el material cerámico. Es importante mencionar que el porcentaje de reemplazo de cenizas en las muestras de ladrillos es relativamente bajo. Estos resultados coinciden con lo reportado por ([Sutcu, M., Erdogmus, E., Gencel, O., Gholampour, A., Atan, E., & Ozbakkaloglu, T. \(2019\)](#)), donde evaluaron la lixiviación de metales como As, Ba, Cd, Cr, Cu, Pb en ladrillos que incorporaban cenizas de fondo de carbón, encontrando que las concentraciones de lixiviación de los ladrillos estaban por debajo de las concentraciones límites establecido por la EPA para residuos peligrosos. Por otra parte, el ensayo de toxicidad aguda para *Daphnia Pulex* de los ladrillos F4 presentó un porcentaje de inmovilización del 25 %, el cual indica un bajo efecto tóxico en los organismos de prueba. Finalmente, estos resultados demuestran que la producción de ladrillos con CFC es seguro.

De acuerdo con los resultados obtenidos, las cenizas de fondo de carbón se pueden utilizar como

materia prima secundaria en la producción de ladrillos de arcilla; cumpliendo con las normas colombianas para la elaboración de ladrillos de arcilla para mampostería no estructural. Por otra parte, los ensayos ambientales realizados a los ladrillos indican que son un producto no peligroso. El aprovechamiento de residuos como las cenizas de fondo en materiales de construcción, permitirá reducir la cantidad de áridos naturales y mitigar los problemas asociados a la a su disposición final. Finalmente, se recomienda continuar con el estudio de tal manera que se pueda escalar a nivel industrial.

4. CONCLUSIONES

Del presente estudio realizado a nivel de laboratorio, sobre el reemplazo parcial de arena por cenizas de fondo en la fabricación de ladrillos, se concluye que:

Las cenizas de fondo de carbón se componen principalmente de óxidos de sílice, aluminio y en menor proporción hierro. En cuanto a su composición mineralógica, las cenizas presentan un alto contenido de cuarzo y amorfos.

Con la evaluación del desempeño de los ladrillos, se encontró que la absorción de agua y la porosidad aparente aumentaron con la incorporación de cenizas. Mientras que, la densidad aparente de las muestras de ladrillos disminuyó.

Los ladrillos que incorporaron cenizas al 4 % presentaron una resistencia a la compresión de 14,16 MPa, los cuales se pueden utilizar para mampostería no estructural de acuerdo con la norma técnica colombiana.

Los ensayos ambientales indican que las cenizas de fondo de carbón y los ladrillos con CFC son productos no peligrosos. Los resultados mostraron una inmovilización de los metales en la matriz cerámica.

Estos hallazgos demuestran la viabilidad de utilizar hasta un 4 % de cenizas de fondo de carbón como reemplazante de arena en la producción de ladrillos de arcilla. El cual permitirá dar solución a los problemas de disposición de estos residuos y, además, reducirá la cantidad de áridos naturales utilizados para estos procesos.

FINANCIAMIENTO

Este estudio fue financiado por la Universidad Nacional de Colombia en el marco de la convocatoria "Proyectos para el fortalecimiento de la investigación y la innovación de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira 2019-2021"

REFERENCIAS

Afanador García, N., Ibarra Jaime, A. C., & López Durán, C. A. (2013). Caracterización de arcillas empleadas en pasta cerámica para la elaboración de ladrillos en la zona de Ocaña, Norte de Santander. *Epsilon*, 1(20), 101-119. <https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1178&context=ep>

Ankur, N., & Singh, N. (2021). Performance of cement mortars and concretes containing coal bottom ash: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, 111361. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111361>

Alhokabi, A. A., & Ing, D. S. (2019). Study on the mechanical properties of bottom ash as a partial sand replacement in a non-load bearing fly ash bricks. *Saudi Journal of Civil Engineering*, 3(3), 59-66. <https://saudi-journals.com/journal-details/sjce/20/146>

Argiz, C., Moragues, A., & Menéndez, E. (2018). Use of ground coal bottom ash as cement constituent in concretes exposed to chloride environments. *Journal of Cleaner Production*, 170, 25-33. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.117>

Aydin, E. (2016). Novel coal bottom ash waste composites for sustainable construction. *Construction and Building Materials*, 124, 582-588. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.142>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2005). Decreto 4741, Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral. Bogotá: Diario Oficial, Colombia.

Djamaluddin, A. R., Caronge, M. A., Tjaronge, M. W., & Irmawaty, R. (2020). Fired clay bricks incorporating palm oil fuel ash as a sustainable building material: an industrial-scale experiment", *International Journal of Sustainable Engineering*, 14(4), 852-864. <https://doi.org/10.1080/19397038.2020.1821403>

Da Fonseca, B. S., Galhano, C., & Seixas, D. (2015). Technical feasibility of reusing coal combustion by-products from a thermoelectric power plant in the manufacture of fired clay bricks. *Applied Clay Science*, 104, 189-195. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.11.030>

Hasan, M. R., Siddika, A., Akanda, M. P. A., & Islam, M. R. (2021). Effects of waste glass addition on the physical and mechanical properties of brick. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(1), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00401-z>

Hashemi, S. S. G., Mahmud, H. B., Ghuan, T. C., Chin, A. B., Kuenzel, C., & Ranjbar, N. (2019). Safe disposal of coal bottom ash by solidification and stabilization techniques. *Construction and Building Materials*, 197, pp. 705-715. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.123>

Kim, H. K., & Lee, H. K. (2011). Use of power plant bottom ash as fine and coarse aggregates in high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 25(2), 1115-1122. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.065>

Kazmi, S. M., Abbas, S., Saleem, M. A., Munir, M. J., & Khitab, A. (2016). Manufacturing of sustainable clay bricks: Utilization of waste sugarcane bagasse and rice husk ashes", *Construction and building materials*, vol. 120, p. 29-41. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.084>

Naganathan, S., Mohamed, A. Y. O., & Mustapha, K. N. (2015). Performance of bricks made using fly ash and bottom ash. *Construction and Building Materials*, 96, 576-580. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.068>

Naciones Unidas (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Resolución aprobada por la Asamblea General el 25 de septiembre de 2015, A/70/L.1. Nueva York.

Rai, U. N., Pandey, K., Sinha, S., Singh, A., Saxena, R., & Gupta, D. K. (2004). Revegetating fly ash landfills with *Prosopis juliflora* L.: impact of different amendments and Rhizobium inoculation. *Environment International*, 30(3), 293-300. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(03\)00179-X](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(03)00179-X)

Rafieizonooz, M., Mirza, J., Salim, M. R., Hussin, M. W., & Khankhaje, E. (2016). Investigation of coal bottom ash and fly ash in concrete as replacement for sand and cement. *Construction and Building Materials*, 116, 15-24. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.080>

Rodríguez-Álvaro, R., González-Fonteboa, B., Seara-Paz, S., & Rey-Bouzón, E. J. (2021). Masonry mortars, precast concrete and masonry units using coal bottom ash as a partial replacement for conventional aggregates. *Construction and Building Materials*, 283, 122737. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122737>

Saha, D., Roychowdhury, T., Chatterjee, D., & Joseph, A. (2022). Cd, Cr, Co, Pb, and Cu metals in surface and groundwater adjacent to a thermal power plant in eastern India. *Environmental Earth Sciences*, 81(1), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-10148-0>

Singh, M., & Siddique, R. (2016). Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on workability and strength properties of concrete. *Journal of cleaner production*, 112, 620-630. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.001>

Singh, M. (2018). Logistics and information technology: A coordination perspective. *Journal of Business Logistics*, 18(1), 141-156.

Sushil, S., & Batra, V. S. (2006). Analysis of fly ash heavy metal content and disposal in three thermal power plants in India. *Fuel*, 85(17-18), 2676-2679. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.04.031>

Sutcu, M., Erdogmus, E., Gencil, O., Gholampour, A., Atan, E., & Ozbakkaloglu, T. (2019). Recycling of bottom ash and fly ash wastes in eco-friendly clay brick production. *Journal of Cleaner Production*, 233, 753-764. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.017>

Spadoni, M., Voltaggio, M., Sacchi, E., Sanam, R., Pujari, P. R., Padmakar, C., & Wate, S. R. (2014). Impact of the disposal and re-use of fly ash on water quality: the case of the Koradi and Kha-

perkheda thermal power plants (Maharashtra, India). *Science of the Total Environment*, 479, 159-170. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.01.111>

Tjaronge, M. W., & Caronge, M. A. (2021). Physico-mechanical and thermal performances of eco-friendly fired clay bricks incorporating palm oil fuel ash. *Materialia*, 101130. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101130>

Torres, J., Mosquera, L. F., Paz, P., and Díaz, M. F. (2021). Evaluation of Coal Bottom Ash for clay brick manufacturing: a preliminary study", *Revista UIS Ingenierías*, vol. 20, no. 4, p. 161-170.

Zhou, H., Bhattarai, R., Li, Y., Si, B., Dong, X., Wang, T., & Yao, Z. (2021). Towards sustainable coal industry: Turning coal bottom ash into wealth. *Science of The Total Environment*, 149985.

