

DOI: <https://doi.org/10.18359/rcin.3495>



Aprovechamiento de escorias de fundición secundaria de plomo en ladrillos cerámicos

Jessica Santacruz-Torres^a ■ Janneth Torres-Agredo^b

Resumen: Las escorias de fundición secundaria de plomo son el subproducto del reciclaje del plomo contenido en las baterías usadas. Este residuo puede ser considerado un importante factor de contaminación del aire, suelo y agua cuando no es bien estabilizado. Este trabajo tuvo como objetivo evaluar la viabilidad técnica de la incorporación de tal residuo en la fabricación de ladrillos cerámicos, así como probar la inmovilización de algunos metales pesados contenidos en la escoria en los productos preparados. Los resultados mostraron la viabilidad de reemplazar el 15% de arcilla por escoria, con una mejora en la resistencia a la compresión de las piezas de ladrillos adicionados con este residuo, en comparación con los ladrillos sin adición. También se observó la inmovilización de plomo, arsénico y selenio en estos productos obtenidos.

Palabras clave: cerámicos; ladrillos; estabilización/solidificación; escoria de fundición secundaria de plomo; reciclaje.

Fecha de recepción: 31 de mayo de 2018 **Fecha de aprobación:** 9 de octubre de 2018

Cómo citar: J. Santacruz-Torres, J. Torres-Agredo, "Aprovechamiento de escorias de fundición secundaria de plomo en ladrillos cerámicos", *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, Vol. 29(1). pp. 7-18 <https://doi.org/10.18359/rcin.3495>

^a Universidad Nacional de Colombia, Colombia. e-mail: jsantacruz@unal.edu.co

^b Universidad Nacional de Colombia, Colombia. e-mail: jtorresa@unal.edu.co.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4094-8387>.

Using Secondary Lead Smelter Slag in Ceramic Bricks

Abstract: Secondary lead slag is a waste product obtained from the smelting of used lead battery, and it becomes a major air, soil, and water pollutant when not properly stabilized. Thus, this study assesses the technical feasibility of aggregating this waste to produce ceramic bricks and to test the immobilization of several heavy metals contained in the slag used for prepared products. The results revealed the feasibility of substituting 15% of the clay with slag, thereby reporting an improvement in the compressive strength of bricks in which this waste was aggregated, unlike regular bricks. Additionally, the study determined the immobilization of lead, arsenic, and selenium in these final products.

Keywords: Ceramic Bricks; Stabilization/Solidification; Secondary Lead Smelter Slag; Recycling.

Usando Escória de Fundição Secundária de Chumbo em Tijolos Cerâmicos

Resumo: As escórias de fundição secundária de chumbo são subprodutos da reciclagem de chumbo, contida em baterias usadas. Este resíduo pode ser considerado um importante fator de contaminação do ar, solo e água, quando não está devidamente estabilizado. Este trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade técnica da incorporação deste resíduo na fabricação de tijolos cerâmicos, assim como provar a imobilização de alguns metais pesados contidos na escória nos produtos preparados. Os resultados mostraram a viabilidade de substituir 15% da argila pela escória, com uma melhora na resistência à compressão dos tijolos, nas quais a escória foi adicionada. Também foi observada a imobilização de chumbo, arsênio e selênio nos produtos obtidos.

Palavras chave: Tijolos cerâmicos, Estabilização/Solidificação, Escórias de Fundição Secundária de Chumbo, Reciclagem

Introducción

El proceso pirometalúrgico de producción de plomo (Pb) puede ocurrir a través de la fundición de minerales de Pb de menas naturales (fundición primaria) o del reciclaje de residuos con Pb (fundición secundaria). La materia prima de las fundiciones secundarias de Pb son principalmente baterías de automóviles que llegan al final de su vida útil. Las baterías plomo-ácido (BPA) están compuestas de cuatro constituyentes principales: polipropileno (caja), ácido sulfúrico (electrolito), separadores (PP, PVC y celulosa) y componentes con contenido de Pb (conectores, polos, puentes, placas (rejillas y pasta) [1].

Los componentes metálicos mezclados con parte de los separadores son usualmente incorporados a hornos de fusión en conjunto con algunos agentes fundentes y escorificantes, con el fin de estimular las reacciones de óxido-reducción necesarias para la separación del plomo de las demás impurezas. Estas impurezas unidas a los aditivos incorporados constituyen un residuo especial denominado escoria. La composición de este residuo depende del tipo de chatarra utilizada, del control de variables de operación (temperatura, tiempo, atmósfera reductora, eficiencia del horno, etc.), de los aditivos utilizados, entre otros [2].

La generación de escorias no se puede evitar, debido a que estas provienen de la fundición de metales [2]. Así es que los procesos pirometalúrgicos por lo general producen grandes cantidades de escoria, que ha sido catalogada como uno de los principales subproductos de la industria metalúrgica [3, 4]. Ciertas investigaciones han demostrado que este residuo puede ser considerado como un importante factor contaminante del aire, del suelo y del agua, cuando el producto final no es bien estabilizado [4].

[5] evaluaron la reactividad de tres tipos de escorias de fundición secundarias de plomo (escoria fresca, escoria con cinco semanas de maduración y escoria expuesta a la intemperie por cinco años). Los resultados obtenidos mostraron que las escorias objeto de análisis pueden ser catalogadas como un residuo peligroso dependiendo

de las condiciones de exposición, pues algunas evidenciaron los criterios: H3-A (comportamiento exotérmico), H6 (toxicidad), H8 (corrosividad), H12 (producción de ácidos), H13 (lixiviable) y H14 (ecotóxico), señalados en el Décret n°2002-540 du 18 avril 2002 relatif à la classification des déchets [6]. Asimismo, la normativa ambiental vigente en Colombia [6] considera tales categorías como criterios para la clasificación de residuos de tipo peligroso.

Una valiosa alternativa que ha surgido para el tratamiento de residuos contaminantes es la técnica de estabilización/solidificación (E/S). Esta consiste en tratar y solidificar residuos tóxicos y peligrosos, en especial los que contienen metales pesados, y su éxito ha sido tal que se encuentra implementada en el sector industrial desde hace más de veinte años [8]. El fundamento de la E/S como proceso es la reducción de la reactividad química o de la solubilidad de los residuos por medio de un encapsulamiento físico o de la inducción de cambios químicos, con lo cual ha logrado que el producto final sea fácilmente manejable y con un mínimo riesgo ambiental asociado a la lixiviación de elementos peligrosos [9-10].

La reutilización de escorias metalúrgicas como materia prima para materiales de construcción ha sido ampliamente estudiada. Los trabajos realizados contemplan varias aplicaciones, entre ellas, su uso como árido para bases y sub-bases de carreteras [11], reemplazo de agregado fino y grueso en concreto [12-14], sustituto de agregados en carreteras asfálticas [15], desarrollo de refractarios [16], fabricación de geopolímeros [17-19] y para producción de materiales cerámicos [20-21], entre otros.

La industria cerámica (ladrillera) particularmente ha mostrado tener un gran potencial de absorber residuos industriales [22]. Sin embargo, la producción comercial de ladrillos a partir de materiales de desecho es todavía muy limitada. Entre sus posibles razones, se señalan los métodos para producir ladrillos de materiales de desecho, la eventual contaminación por los materiales de desecho utilizado, la ausencia de normas pertinentes y la lenta aceptación por la industria y el público de ladrillos basados en residuos [22].

Acorde con las anteriores consideraciones, surge la necesidad de realizar investigaciones que aúnen las características ambientales, que son incipientes y poco tratadas, a las características técnicas de los ladrillos fabricados con adición de residuos industriales.

El objetivo de este estudio fue evaluar la viabilidad de la utilización de una escoria de fundición secundaria de Pb producida en Colombia, a través de la medición de los principales parámetros físicos empleados en la industria, en combinación con la revisión de la estabilización de los componentes metálicos de mayor interés, en la matriz cerámica preparada.

Metodología

Para el desarrollo de este trabajo se empleó una escoria de fundición secundaria de plomo, que fue proporcionada por una industria colombiana. Este residuo corresponde a la escoria luego de ser sometida a una trituration primaria en molino de mandíbulas y a trituration secundaria en molino de martillos, tal como lo realiza la industria productora para reducir los bloques a partículas más pequeñas antes de su disposición en relleno. Con el fin de realizar la parte experimental, se seleccionaron cuatro muestras, que fueron denominadas E1, E2, E3 y E4. Cada muestra de escoria fue tomada de un búnker seleccionado al azar y correspondió a una muestra mixta homogeneizada.

Además, la escoria empleada para la elaboración de los ladrillos (escoria E4) se tamizó a través de un tamiz malla número 6 (3,35 mm) y se sometió a maduración durante quince días al aire libre para lograr la oxidación de sus componentes.

Las muestras fueron caracterizadas por fluorescencia de rayos X en un equipo MagixPro PW-2440 Philips equipado de un tubo de Rodio, con una potencia máxima de 4 kW; por difracción de rayos X utilizando un equipo PRO XPERT con lámpara de cobre; y por granulometría láser empleando un equipo granulómetro láser Mastersizer 2000 marca Malvern.

Se elaboraron ladrillos prototipo con dos porcentajes de reemplazo de arcilla por escoria (0% y 15%). Para cada porcentaje de reemplazo, se

elaboraron piezas a cuatro temperaturas de cocción (900, 950, 1000 y 1050°C); estas temperaturas fueron seleccionadas de acuerdo con las temperaturas que se manejan para la producción industrial de ladrillos. Se realizaron cuatro repeticiones por cada tratamiento para un total de 32 unidades experimentales. La arcilla empleada para la preparación de los prototipos cerámicos fue adquirida en una empresa ladrillera ubicada en el municipio de Santander de Quilichao, en el departamento del Cauca, con un contenido de arena entre el 38 y el 40%.

La preparación de los prototipos se realizó en una planta piloto a escala, que representa las etapas de un proceso de producción de una ladrillera convencional: homogeneización, humectación, amasado, extrusión, moldeo, secado y cocido. El proceso de secado se llevó a cabo en dos etapas: un primer secado a temperatura ambiente durante 24h y después un secado en estufa desde temperatura ambiente a una velocidad de 10°C/h hasta 110 °C. La cocción de las piezas se realizó en mufla de laboratorio, a una tasa de incremento de temperatura de 5°C/min hasta los 1000°C con 2,5 h de sostenimiento, para luego reducir la temperatura hasta los 100°C durante 4 h. En la figura 1, se muestran los ladrillos fabricados con adición de escoria y sin ella.

Las piezas fabricadas se probaron para contracción de cocido y secado siguiendo el procedimiento de [23]. La resistencia a la compresión y absorción



Figura 1. Ladrillos prototipo fabricados. *A la izquierda*, ladrillos sin adición de escoria. *A la derecha*, ladrillos con adición de escoria. Fuente: Elaboración propia.

de agua se aplicó de acuerdo con la NTC 4017 de 2005. Los ensayos se realizaron por triplicado.

El contenido total de plomo, arsénico y selenio se determinó a través de la técnica de fluorescencia de rayos X. La lixiviación de estos metales se evaluó a través del test de lixiviación característico de toxicidad (TCLP, por sus siglas en inglés) (EPA SW-846 Método 1311). Este último ensayo se realizó para la escoria y para los ladrillos prototipo preparados con adición de escoria o sin ella a 950°C.

Los resultados fueron analizados comparando los diferentes tratamientos entre sí, así como con las normas estándares de calidad de piezas cerámicas (NTC 4205 de 2004) y la legislación ambiental colombiana (Decreto 4741 de 2005) [25].

Resultados y discusión

Caracterización de la escoria

En la tabla 1, se presenta la composición química de tres muestras de escoria tomada en diferentes épocas. Se observa que las características de las tres muestras evaluadas son similares, que están compuestas, principalmente, por óxido férrico, óxido de sodio y azufre, que suman en conjunto alrededor del 85% en peso. Además, se observan cantidades apreciables de plomo y óxidos de silicio que, sumadas a los constituyentes anteriores, aparecen en un orden cercano al 96%.

Diversos autores han reportado características elementales de escorias de fundición de plomo. Las escorias analizadas por [24-26] provienen de hornos alimentados con carbonato de sodio como fundente, por lo que tienen altos contenidos de óxidos de sodio; estas escorias tienen características similares a las de la escoria evaluada en este trabajo, específicamente en el alto contenido de Na (10,845, 34,956 y 7,270%, respectivamente) y en general en sus elementos mayoritarios: Fe (28,586%, 2,224 y 39,643%), Pb (2,516, 13,572 y 8,912%) y Si (1,870, 10,036 y 4,674%).

En la figura 2, se presentan los difractogramas de rayos X para las muestras E1 y E2. Se observa un levantamiento de la línea base entre 10 y 35 (2 θ), lo que sugiere que el material tiene características amorfas. También se presentan algunas

Tabla 1. Composición química de la escoria de fundición secundaria de Pb

Elemento o compuesto	E1	E2	E3
	(% en peso)		
Fe ₂ O ₃	35 543	35 928	46 889
Na ₂ O	33 879	35 231	25 651
S	14 262	15 421	15 371
Pb	6119	5,061	2516
SiO ₂	6093	4,652	4753
Al ₂ O ₃	0,850	0,575	0,376
K ₂ O	0,695	0,182	0,059
Sn	0,684	0,572	0,864
CaO	0,533	0,510	0,538
Cl		0,425	1,252
Ba	0,271	0,324	0,312
MnO	0,269	0,224	0,259
MgO	0,241	0,160	0,081
Sb	0,183	0,195	0,12
P ₂ O ₅	0,123	0,113	0,244
Cu	0,116	0,102	0,256
Cr	0,105	0,146	0,188
As			0,062
Ce		0,061	0,042
TiO ₂		0,057	0,062
Zn	0,034	0,037	0,061
Br			0,021
Ni		*0,014	
Mo		*0,009	*0,015

* Valores informativos

Fuente: Elaboración propia.

fases cristalinas identificadas como erdita (Na-FeS₂:2H₂O), hidróxido formato de plomo (Pb(OH)(HCO₂)), sulfato de níquel hidratado (retgersita NiSO₄(H₂O)₆), óxido de hierro (wuestita FeO), carbonato de sodio (natrita Na₂CO₃), magnetita (Fe₃O₄) y sulfuro de plomo (galena PbS).

En la figura 3, se presenta la distribución de tamaño de partícula para la muestra E1, que mostró un tamaño promedio de 700,2 μ m (80% pasante 1315 μ m). De acuerdo con esto, se tomó la decisión de tamizar una muestra de escoria a través de un

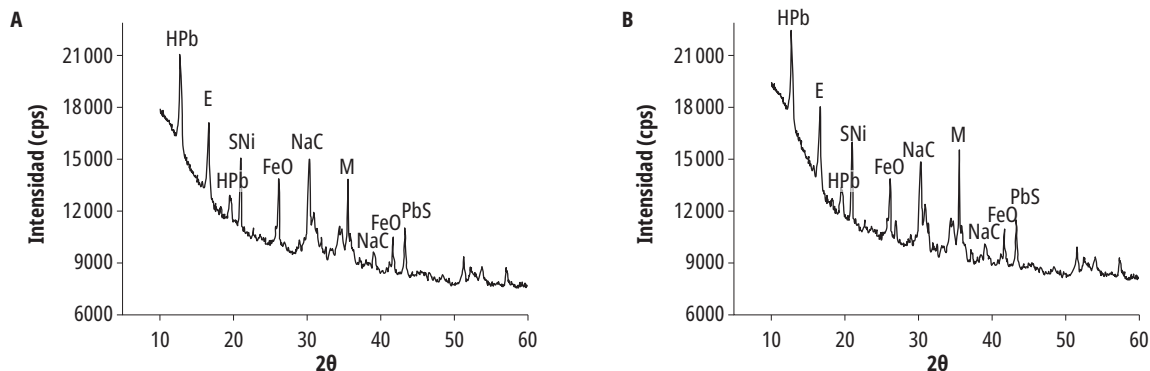


Figura 2. Difractograma de rayos X para la escoria a) E1 y b) E2. HPb: hidróxido formato de plomo; E: erdita; SNi: sulfato de níquel hidratado; FeO: óxido de hierro; NaC: carbonato de sodio; M: magnetita; PbS: galena. Fuente: Elaboración propia.

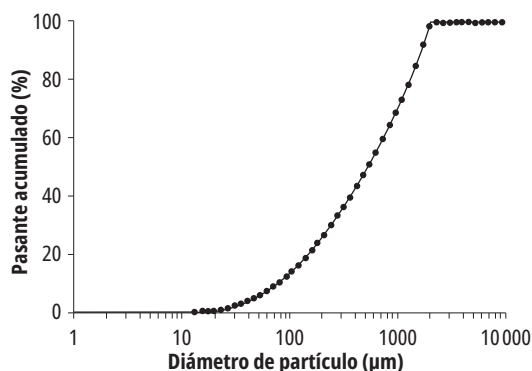


Figura 3. Distribución de tamaño de partícula de la escoria E1. Fuente: Elaboración propia.

tamiz malla número 6 (3,35 mm), muestra a la que se le dio el nombre de E4. Además, esta muestra fue sometida a oxidación al aire por 15 días.

Vale la pena anotar que el tamaño de partícula puede tener una fuerte influencia en el coeficiente de difusividad efectivo que se refleja en el secado y en la cantidad de oxígeno que interactúa en la oxidación del material, pues, cuando es más pequeña la partícula, aumenta su área de transferencia y mejora la interacción de los óxidos, lo que permite que el desarrollo del producto (ladrillos) sea más rápido y eficiente, aunque, si la partícula es demasiado pequeña, puede provocar otros problemas [27].

Análisis ambientales de la escoria

La tabla 2 presenta el contenido total de plomo, arsénico y selenio en la escoria E4, sometida a proceso de oxidación al aire.

Tabla 2. Metales totales por FRX para la muestra E4

Elemento	E4 (mg/kg)
Pb	32 000
As	386
Se	<8,00

Fuente: Elaboración propia.

La lixiviación de metales pesados es una de las características de gran importancia que se deben evaluar en la escoria que tenga un potencial de reutilización. Esto debido a que por las características intrínsecas del proceso este residuo puede contener cantidades apreciables de metales pesados; no obstante, actualmente se sabe que la movilidad de los metales pesados es la característica determinante para definir la peligrosidad de un elemento, sustancia, material o producto. Por esta razón, se realizaron ensayos de TCLP para las muestras E1, E2 y E4 (tabla 3).

Tabla 3. Lixiviación de metales en la escoria

Muestra	TCLP		
	Pb (ppm)	As (ppm)	Se (ppm)
E1	5,05	6,52	<0,29
E2	1,56	10,8	<0,01
E4	<0,5	1,43	<0,1
[6]	5	5	1

*Límite máximo de la legislación colombiana para clasificar un residuo como no peligroso.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran una lixiviación de Se y Pb dentro del límite permisible, excepto en la muestra E1m que revela una lixiviación de Pb apenas por encima del límite para clasificar un residuo como peligroso por toxicidad. En el caso del As, las muestras sin proceso de oxidación (E1 y E2) presentan lixiviación por encima de la estipulada en la norma, no obstante la muestra E4 obtuvo valores por debajo del límite normativo, lo que se podría atribuir a que los procesos de maduración de la escoria generan una estabilización del residuo, tal como lo demuestra [24] en su estudio de toxicidad de las escorias de fundición secundaria de Pb de Ferroaleaciones Españolas, S. A.

A pesar de que el As se encuentra en baja proporción en la escoria (<0,062%), la lixiviación de este elemento es considerable, por lo que se deduce que se encuentra en una forma altamente lixiviable. Algunos autores [28] concluyen que no hay una correlación clara entre el contenido total de arsénico en la muestra y el máximo lixiviable, pues dependerá de la naturaleza de la matriz y del grado de segregación del arsénico; cuanto mayor es la superficie de contacto, mayor es la cantidad de arsénico extraída. La lixiviación de As también es atribuida a la oxidación de sulfuros [28].

Evaluación de los ladrillos cerámicos prototipo

Dado que la escoria E4 (con menor tamaño de partícula) cumplió con la normativa ambiental de lixiviación de metales, esta fue seleccionada para la elaboración de los ladrillos cerámicos prototipo. Este residuo fue utilizado en un porcentaje del 15% de reemplazo con respecto a la arcilla.

La tabla 4 contiene los resultados de la evaluación de la contracción de secado de las piezas fabricadas sin escoria (PP) y con escoria (PE).

Tabla 4. Características de calidad de los prototipos cerámicos

Muestra	PP	PE
	(promedio de 4 unidades)	
*Contracción de secado (%)	4,49	3,90

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de contracción de secado para las piezas patrón (PP) y para las respectivas piezas con reemplazo de escoria (PE) presentan valores dentro de los rangos normales para este tipo de proceso (menores del 8%). La contracción de secado promedio fue menor en las piezas con el 15% de escoria (PE) respecto del patrón (PP), lo que garantiza la no deformación de las piezas en esta etapa de la producción de ladrillos.

Las contracciones de cocido normales para arcillas usadas en la fabricación de productos extruidos no deben superar el 1,5%, ya que se corre el riesgo de generar deformaciones en el producto final cuando las piezas son de gran tamaño. Este valor fue excedido por las piezas fabricadas con adición de escoria (PE) (figura 4), aunque también fue sobrepasado por las piezas sin reemplazo (PP) a las temperaturas más altas de cocción (1000 y 1050°C); sin embargo, en ningún caso, se produjo deformaciones en las piezas a ninguna de las temperaturas de ensayo evaluadas. Por lo anterior, se puede afirmar que un 15% de adición de escoria es viable para ser llevado a nivel industrial. Esta es una característica que debe ser controlada en el campo de la aplicación industrial.

En la figura 4, se observa también que la contracción de cocido tiene una relación directa con la temperatura y el porcentaje de adición, es decir, que a mayor temperatura mayor contracción de cocido. De la figura 4 también se puede analizar que, con las temperaturas de cocción menores (900 y 950°C), se pueden lograr contracciones del orden similares a las alcanzadas sin adición

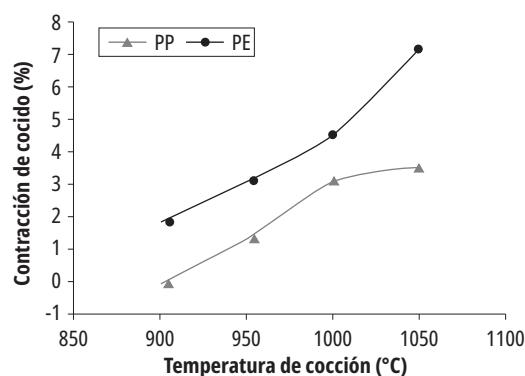


Figura 4. Contracción de cocido de los prototipos en relación con la temperatura de cocción. Fuente: Elaboración propia.

de escoria. Esto quiere decir que una forma de controlar el efecto en la contracción de secado por la adición de escoria es realizando la cocción de las piezas a temperaturas bajas (por debajo de 950 °C).

Una de las variables más importantes para evaluar los ladrillos cerámicos es la absorción de agua, ya que las normas del producto final están basadas en este parámetro y en su resistencia mecánica. En la figura 5, se presenta el comportamiento de la absorción de agua en relación con la temperatura de cocción de los prototipos.

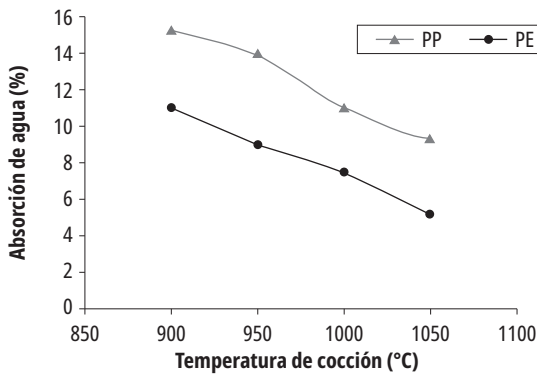


Figura 5. Absorción de agua de los prototipos en relación con la temperatura de cocción. Fuente: Elaboración propia.

La NTC 4205-1 de 2009 para mampostería estructural establece que los bloques deben tener una absorción de agua máxima, promedio de 5 piezas, del 13%, y se observa que tanto la PP como la PA cumplen a cabalidad con este requisito. Además, la mampostería no estructural exige resistencia a la compresión menores y absorción de agua máxima mayores que la mampostería estructural, por tanto, los ladrillos también cumplen con los requisitos para mampostería no estructural (NTC 4205-2 de 2009) y, por ende, para mampostería de fachada (NTC 4205-3 de 2009).

En la figura 5, se observa, además, que los ladrillos fabricados con adición de escoria cocidos a 900°C alcanzan la misma absorción de agua que los ladrillos fabricados sin adición de escoria cocidos a 1000°C. Lo anterior indica que la adición del 15% de escoria reduce de manera significativa el punto de fusión de la pasta y, por tanto, reduce la absorción de agua de la pieza final, por lo que

se podría reducir en 100°C la temperatura de cocción en hornos, lo que podría generar ahorros de aproximadamente del 10% en el consumo energético de los hornos de cocción.

En la figura 6, se presentan los resultados de la resistencia a la compresión, realizada por triplicado. Se observa que los ladrillos fabricados con adición de escoria cumplen con la resistencia a la compresión mínima establecida en la NTC 4205-1 para mampostería estructural (20 kgf/cm²) con perforación horizontal y, por ende, cumple con la NTC 4205-2 y la NTC 4205-3 (mampostería no estructural y de fachada). Además, se puede observar que a mayor temperatura mayor resistencia a la compresión y que la resistencia de los ladrillos adicionados con escoria es mayor para todas las temperaturas en relación con el patrón. Además, los datos ratifican que sería posible reducir la temperatura de cocción hasta casi los 950 °C, lo que genera una disminución del consumo de energía y alcanza valores de absorción de agua y resistencia a la compresión acorde con la norma técnica.

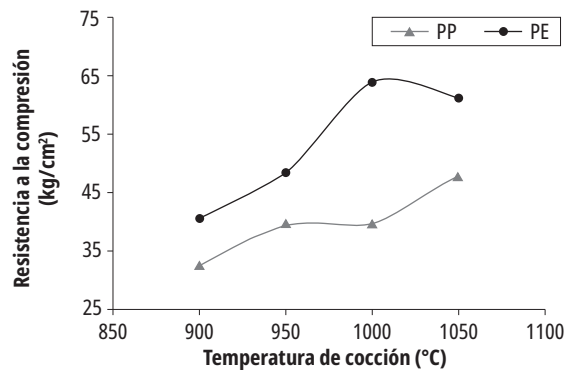


Figura 6. Resistencia a la compresión de los prototipos en relación con la temperatura de cocción. Fuente: Elaboración propia.

Evaluación de las características ambientales de ladrillos prototipo

Las piezas sin adición de escoria (PP) y con adición del 15% de escoria (PE) a diferentes temperaturas de cocción (900, 950, 1000 y 1050°C) fueron sometidas a medición de metales Pb, As y Se por FRX (tabla 5). También se examinó la lixiviación de

Tabla 5. Metales totales en E4, arcilla y prototipos

Muestra	Metales totales XRF (mg/kg)		
	Pb	AS	Se
Escoria (E4)	32 000	386	<8,00
Arcilla	16,22	29,78	<8,00
PP (950 °C)	66	23,41	<8,00
PE	900 °C	5039	<8,00
	950 °C	5642	<8,00
	1000 °C	5724	<8,00
	1050 °C	5934	<8,00

Nota: Los resultados corresponden a una sola muestra.

Fuente: Elaboración propia.

estos metales por la técnica de TCLP, con el fin de determinar si las piezas cerámicas fabricadas con adición de escoria generan algún impacto negativo en el ambiente.

Con respecto a los resultados de metales totales en la escoria (E4), se observa que la mayor concentración de metales pesados corresponde a la de Pb (32 000 mg/kg), debido a que el proceso de fundición en el horno no tiene una eficiencia del 100%; sin embargo, es una cantidad que se encuentra por debajo de otras escorias de fundición reportadas en la literatura [25, 30]. También se observan cantidades importantes de As (386 mg/kg). Las concentraciones de Pb y As en todas las piezas prototipo (PP y PE) son inferiores a las de la escoria utilizada para el reemplazo (E4).

En la tabla 6, se presentan los resultados de lixiviación de metales en la escoria (E4), la arcilla y las diferentes piezas cerámicas fabricadas (PP y PE). Para todos los casos, los valores de TCLP para los metales Pb, As y Se cumplen con la normativa ambiental vigente.

La lixiviación de plomo disminuye al aumentar la temperatura de cocción, hallazgo que concuerda con la afirmación de [31-32], quienes mencionan que la movilidad de contaminantes no solo depende del valor pH final, sino también de la temperatura de cocción y de la presencia de SiO₂ y CaCO₃, que puede aumentar la estabilidad química del producto y reducir la liberación de metal; el uso de temperaturas relativamente altas permite la

Tabla 6. Lixiviación de metales por TCLP para E4, arcilla, PP y PE

Muestra	TCLP (mg/L)		
	Pb	As	Se
E4	<0,5	1,43	<0,1
Arcilla	<0,5	<0,2	<0,1
PP (950 °C)	<0,5	<0,2	<0,1
PE	900 °C	2,0	<0,2
	950 °C	1,3	<0,2
	1000 °C	1,0	<0,2
	1050 °C	0,9	<0,2
Normativa TCLP (mg/L) [6]	5	5	1

Fuente: Elaboración propia.

fijación química debido a la descomposición de las especies fácilmente lixiviables como hidróxidos y la formación de óxidos más estables.

Los resultados de As lixiviados por TCLP en los prototipos fabricados también se encuentran por debajo del límite de detección, por lo que se presume un encapsulamiento de estos metales en el material, pese a que este elemento es uno de los metales pesados que presenta un comportamiento de lixiviación más móvil [33]; sin embargo, también hay que tener en cuenta que el porcentaje de reemplazo de escoria es bajo. En el caso del Pb, la lixiviación de este metal es mayor en todos los ladrillos adicionados con escoria (PE)

con respecto a la pasta sin adición (PP-950°C). Vale la pena mencionar que es importante hacer la evaluación de estos parámetros de lixiviación de elementos peligrosos, ya que, por ejemplo, en el plomo, es uno de los contaminantes más peligrosos que no es biodegradable y se puede acumular sobre los ecosistemas [34].

Los resultados de los ensayos reportados en este estudio mostraron la viabilidad técnica y ambiental de incorporar hasta un 15% de escoria en ladrillos estructurales de perforación horizontal. Se resalta el impacto ambiental positivo del aprovechamiento de un residuo industrial.

Conclusiones

La escoria de fundición secundaria de plomo objeto del presente estudio tiene contenidos importantes de óxidos de hierro, que le confieren al residuo un potencial colorante al ser incorporado en productos cerámicos. Otro componente en cantidades apreciables contenido en la escoria es el sodio, en forma de carbonatos y sulfatos, que genera en la escoria características fundentes que puede producir un efecto sinterizador durante la cocción de cerámicos fabricados con adición de este residuo.

Los ensayos demostraron la viabilidad técnica de incorporar hasta el 15% de escoria en pastas para la fabricación de ladrillos estructurales de perforación horizontal. La contracción de secado, absorción de agua y resistencia a la compresión se vieron mejoradas en los ladrillos preparados con escoria, en todas las temperaturas evaluadas (900 a 1050°C), en relación con los ladrillos control (sin adición de escoria). Pese a que la contracción de cocido en los ladrillos adicionados con el residuo aumentó con respecto a los controles, no se presentaron deformaciones que sugieran defectos por esta característica. La resistencia a la compresión aumentó con la temperatura de cocción, y además se redujo la absorción de agua.

Los resultados mostraron una fuerte inmovilización de plomo y arsénico en la matriz cerámica, por lo que se logró que la lixiviación de estos metales en las piezas cerámicas estuviera siempre por debajo de los límites establecidos por la legislación colombiana. Cabe destacar que la lixiviación de

plomo disminuye con el aumento de la temperatura de cocción.

El comportamiento de las propiedades evaluadas en función de la temperatura de cocción muestra que tienen características de calidad similares a la de los ladrillos sin escoria. Explotar este potencial generaría una reducción considerable en el consumo de combustible. Los resultados de los ensayos reportados en este estudio mostraron la viabilidad técnica y ambiental de incorporar hasta un 15% de escoria en ladrillos estructurales de perforación horizontal. Por tanto, se resalta el impacto ambiental positivo del aprovechamiento de un residuo industrial.

Referencias

- [1] H. Vest. (2002). *Fundamentos del reciclaje de acumuladores de plomo-ácido* [En línea]. Disponible en: <https://docplayer.es/14490135-Fundamentos-del-reciclaje-de-acumuladores-de-plomo-acido.html>
- [2] Consejo Nacional de Producción Más Limpia. (2011). *Guía de mejores técnicas disponibles para el manejo de escorias de metalúrgica en el sector de fundición* [En línea]. Disponible en: <http://www.cpl.cl/archivos/documentos/28.pdf>
- [3] M. Sánchez y M. Sudbury, "Physicochemical characterization of copper slag and alternatives of friendly environmental management", *Journal of Mining and Metallurgy B: Metallurgy*, vol. 49, no. 2, pp. 161-168, 2013. <https://doi.org/10.2298/JMMB120814011S>
- [4] M. Reuter, Y. Xiao y U. Boin. "Recycling and environmental issues of metallurgical slags and salt fluxes, Proc", en *VII International Conference on 'Molten slags fluxes and salts'*, Cape Town, South Africa, 2004, pp. 349-356.
- [5] A. Lassin, P. Piantone, A. Burnola, F. Bodénana, L. Chateau, C. Lerouge, C. Crouzet, D. Guyonnet y L. Bailly, "Reactivity of waste generated during lead recycling: an integrated study", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 139, no. 3, pp. 430-437, en., 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.02.055>
- [6] Décret n° 2002-540 du 18 avril 2002 relatif à la classification des déchets.
- [7] Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, *Decreto 4741 de 2005, 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.

- [8] A. Macías, S. Goñi, A. Guerrero y E. Fernandez, “Inmovilización/solidificación de residuos tóxicos y peligrosos en matrices de cemento”, *Materiales de Construcción*, vol. 49, no. 2, pp. 5-16, jun., 1999. <https://doi.org/10.3989/mc.1999.v49.i254.446>
- [9] J. R. Conner y S. L. Hieffner, “The history of stabilisation/solidification technology”, *Environmental Science Technology*, vol. 28, no. 4, pp. 325-396, jun. 2010. <https://doi.org/10.1080/10643389891254241>
- [10] F. P. Glasser, “Fundamental aspect of cement solidification and stabilization”, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 52, no. 2-3, pp. 151-170, abr., 1997. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(96\)01805-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(96)01805-5)
- [11] H. Motz y J. Geiseler, “Products of steel slags an opportunity to save natural resources”, *Waste Management*, vol. 21, no. 3, pp. 285-293, jun., 2001. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(00\)00102-1](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00102-1)
- [12] M. Knežević, M. Korać, Ž. Kamberović y M. Ristić, “Possibility of secondary lead slag stabiliation in concrete with presence of sected additives”, *Association of Metallurgical Engineers of Serbia*, vol. 16, no. 3, pp. 195-204, jun., 2010.
- [13] M. Penpolcharoen, “Utilization of secondary slag as construction material”, *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 6, pp. 1050-1055, jun., 2005. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.11.001>
- [14] N. Saikia, G. Cornelis, G. Mertens, J. Elsen, K. V. Balen, T. V. Gerven y G Vandecasteele, “Assessment of Pb-slag, MSWI bottom ash and boiler and fly ash for using as a fine aggregate in cement mortar”, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 154, no. 1-3, pp. 766-777, jun., 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.093>
- [15] H. F. Hassan y K. Al-Jabri, “Laboratory evaluation of hot-mix asphalt concrete containing copper slag aggregate”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 23, no. 6, pp. 879-885, jun., 2011. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000246](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000246)
- [16] I. Ponsot y E. Bernardo, “Self glazed glass ceramic foams from metallurgical slag and recycled glass”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 59, pp. 245-250, nov., 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.029>
- [17] T. Alex, A. Kalinkin, S. Nath, B. Gurevich, E. Kalinkina, V. Tyukavkina y S. Kumar, “Utilization of zinc slag through geopolymerization: influence of milling atmosphere”, *International Journal of Mineral Processing*, vol. 123, pp. 102-107, sept., 2013. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2013.06.001>
- [18] S. Onisei, Y. Pontikes, T. V. Gerven, G. N. Angelopoulos, T. Velea, V. Predica y P. Moldovan, “Synthesis of inorganic polymers using fly ash and primary lead slag”, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 205-206, pp. 101-110, febr., 2012. Doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.12.039
- [19] Y. Pontikes, L. Machiels, S. Onisei, L. Pandelaers, D. Geysen, P. T. Jones y B. Blanpain, “Slag with a high Al and Fe content as precursors for inorganic polymers”, *Applied Clay Science*, vol. 73, pp. 93-102, mzo., 2013. doi: 10.1016/j.clay.2012.09.020
- [20] O. Gencil, M. Sutcu, E. Erdogmus, V. Koc, V. Cay y M. Gok, “Properties of bricks with waste ferrochromium slag and zeolite”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 59, pp. 111-119, nov., 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.055>
- [21] N. Quijorna, G. San Miguel y A. Andrés, “Incorporation of Waelz slag into commercial ceramic bricks: a practical example of industrial ecology”, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 50, no. 9, pp. 5806-5814, mzo., 2011. DOI. 10.1021/ie102145h
- [22] L. Zhang, “Production of bricks from waste materials: a review”, *Construction and Building Materials*, vol. 47, pp. 643-655, oct., 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.043>
- [23] J. L. Amorós Albaro, *Manual para el control de la calidad de materias primas arcillosas*, 2.ª ed. Castellón: Instituto de Tecnología Cerámica, 2004.
- [24] B. Coya, E. Marañon y H. Sastre, “Ecotoxicity assessment of slag generated in the process of recycling lead from waste batteries”, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 29, no. 4, pp. 291-300, jun., 2000. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(00\)00054-9](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(00)00054-9)
- [25] Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (30 dic. 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.
- [26] M. Malki, P. Echegut, C. Bessada y I. Nuta, “Structure and properties of glasses obtained by recycling of secondary lead from acid battery plants”, *Glass Technology*, vol. 46, no. 4, pp. 305-310, ag., 2005.
- [27] S. Hreglich, R. Falcone, G. Nassetti y G. Gattelli, “Inertisation of slags from the treatment of end of life automotive batteries and their reuse in the production of heavy clay products with soundproofing properties”, *Glass Technology: European Journal of Glass Science and Technology Part A*, vol. 49, no. 6, pp. 313-316, dic., 2008.
- [28] L. A. Villareal Jiménez, “Uso de lodo de papel y arena sílica para la fabricación de ladrillos y tabla roca”, tesis de grado, Universidad de Las Américas, Puebla, México, 2004.

- [29] L. Moreno, A. de la Losa, M. Meléndez, M. L. Rodríguez y J. R. Quintana, “Influencia de las condiciones de pH y tamaño de grano en la capacidad de lixiviación de As en los materiales de la aureola metamórfica del skarn granítico de Carlés”, *Boletín Geológico y Minero*, vol. 117, no. 3, pp. 401-412, jul., 2006.
- [30] J. M. McArthur, P. Ravenscroft, S. Safiulla y M. F. Thirlwall, “Arsenic in groundwater: testing pollution mechanisms for sedimentary aquifers in Bangladesh”, *Water Resources Research*, vol. 37, no. 1, pp. 109-117, jun., 2001. <https://doi.org/10.1029/2000WR900270>
- [31] G. de Angelis, F. Medicib, M. R. Monterealia y L. Pietrelli, “Reuse of residues arising from lead batteries recycle: a feasibility study”, *Waste Management*, vol. 22, no. 8, pp. 925-930, dic., 2002. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(02\)00082-X](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(02)00082-X)
- [32] J. M. Magalhães, J. E. Silva, F. P. Castro y J. A. Labrincha, “Effect of experimental variables on the inertization of galvanic sludges in clay-based ceramics”, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 106, no. 2-3, pp. 139-147, en., 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2003.11.001>
- [33] N. Quijorna, A. Coza, A. Andresa y C. Cheeseman, “Recycling of Waelz slag and waste foundry sand in red clay bricks”, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 65, pp. 1-10, ag., 2012. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.05.004>
- [34] Naciones Unidas, “Conferencia de las Partes en el Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación Décima reunión Cartagena (Colombia), 17 a 21 de octubre de 2011” [En línea]. Disponible en: <http://www.basel.int/Portals/4/Basel%20Convention/docs/pub/techguid/cement/06a3r1s.pdf>
- [35] V. Nikolić, M. Komljenović, N. Marjanović, Z. Baščarević y R. Petrović, “Lead immobilization by geopolymers based on mechanically activated fly ash”, *Ceramics international*, vol. 40, no. 6, pp. 8479-8488, jul., 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.01.059>