

ESTUDIO DE PROTOTIPOS DE LADRILLOS CERÁMICOS ELABORADOS CON RESIDUOS DE LA MINERÍA DEL ORO

Daniel Zuluaga^{1,2}, Milton Pérez¹, Esperanza López¹, Mauricio Correa²*

1. Grupo de Investigación en Materiales y Recubrimientos Cerámicos (GIMACYR), Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
2. Grupo de Investigación en Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA), Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

*E-Mail: daniel.zuluagac@udea.edu.co

RESUMEN

Este artículo exhibe los resultados de una investigación centrada en la elaboración prototipos de ladrillos cerámicos a partir de mezclas de dos tipos de residuos de la minería del oro procedentes del Nordeste de Antioquia: el primero consiste en una capa arcillosa generada a partir de operaciones aluviales (RA) y el segundo se compone de colas de flotación (RF) generadas a partir del beneficio de mineral de veta. Los porcentajes en peso de los residuos utilizados en este proyecto fueron de 0, 5, 10, y 15 de RF y con RA a completar; las diferentes muestras fueron conformadas mediante prensado a 3 MPa y sinterizadas a 1050 °C durante 3 h. Se determinó la composición elemental de los dos residuos mediante la técnica de fluorescencia de rayos X y las fases cristalinas tanto de las materias primas como de los ladrillos sinterizados empleando la técnica de difracción de rayos X. A los diferentes prototipos de ladrillos sinterizados se les determinaron el módulo de ruptura, el porcentaje de absorción de humedad, porosidad aparente, densidad tipo “bulk”. Los resultados obtenidos para los prototipos ladrillos fabricados con las diferentes mezclas fueron comparados con los presentados por un prototipo fabricado bajo las mismas condiciones con una arcilla típica para fabricación de ladrillos en la región (AP), y con los criterios exigidos por la norma NTC 4017, que rige los parámetros de calidad de materiales de mampostería no estructural. Finalmente, se encontró que existe un efecto causado por aumento del porcentaje en peso de RF, sobre la contracción en quema de los prototipos de ladrillos; no se presenta un efecto importante sobre el módulo de ruptura generado por el cambio de porcentaje de RF.

Palabras clave: Ladrillos, residuos, módulo de ruptura, propiedades mecánicas y propiedades físicas.

STUDY OF PROTOTYPES OF CERAMIC BRICKS PROTOTYPES MADE FROM GOLD MINING RESIDUES

ABSTRACT

This article shows the results of an investigation focused on the elaboration of ceramic brick prototypes from mixtures of two types of gold mining waste from the Northeast of Antioquia: the first one consists of a clay layer generated from alluvial operations (RA) and the second one consists of flotation tails (RF) generated from the benefit of grain ore. The proportions by weight of the waste used in this project were 0, 5, 10, and 15 RF and with RA to be completed; the different

samples were formed by pressing at 3 MPa and then sintered at 1050 °C for 3 h. The elemental composition of the two residues was determined by the X-ray fluorescence technique and the crystalline phases of both the raw materials and the sintered bricks using the X-ray diffraction technique. The modulus of rupture, percentage of moisture absorption, apparent porosity, bulk density were determined for the different prototypes of sintered bricks. The results for the brick prototypes manufactured with the different mixtures were compared with those presented by a prototype manufactured under the same conditions with a typical clay for brick manufacturing in the region (AP), and with the criteria required by the NTC standard 4017, which governs the quality parameters of non-structural masonry materials. Finally, it was found that there is an effect caused by an increase in the percentage by weight of RF, on the burning contraction of brick prototypes; there is no significant effect on the modulus of rupture generated by the change in the percentage of RF.

Keywords: Pressed brick, waste, rupture module, mechanical properties and physical properties.

1. INTRODUCCIÓN

La alta demanda de productos industriales impulsa la realización de actividades mineras a una escala cada vez mayor, este hecho ocasiona la acumulación de diversos tipos de materiales derivados del proceso que en su mayoría se disponen en sistemas de vertederos, escombreras o inclusive en afluentes hídricos; la literatura menciona que se generan aproximadamente 1,3 billones de toneladas por año y se espera que para 2025 la cifra llegue a los 2,2 billones de toneladas [1]–[3]. La constante acumulación de los residuos producto de la minería corren el riesgo de convertirse en futuros pasivos ambientales, focos contaminantes que afectan la salud de las poblaciones aledañas, y en peligrosos deslizamientos de materiales debido a la pérdida de estabilidad de los residuos distribuidos en las escombreras [4]. En Antioquia, Colombia, los procedimientos mineros son cada vez más rigurosos con el fin de obtener una mayor cantidad de minerales, como en el caso del oro, el carbón, entre otros; asimismo, estas actividades traen como consecuencia, el incremento de manera proporcional de la cantidad de residuos generados respecto a las hectáreas que comprenden los títulos mineros [4–6].

Por otra parte, las políticas de limitación para el uso de arcillas en la fabricación de ladrillos impuestas al sector de la construcción, ha generado una serie de investigaciones en el mundo centradas en la búsqueda de nuevas materias primas que cumplan estos requerimientos, específicamente en China, India, Rusia, entre otros países desarrollados, en los que se fabricaron ladrillos sinterizados empleando residuos de distintos tipos de industrias (Mineras incluidas) [7], [8], estos estudios tuvieron resultados de propiedades mecánicas y fisicoquímicas comparables con las presentadas por ladrillos fabricados con materias primas tradicionales [9].

En el año 2008 *El-Mahllawy et al.* elaboró ladrillos con residuos finos de la producción de caolín por medio del método de conformación presurizada y un tratamiento de cocción a 1125 °C; el estudio obtuvo prototipos con propiedades mecánicas que cumplen los requisitos sugeridos por la ESS [10]. Además, en la literatura se encuentra la experimentación realizada por Taha et al. en el 2016, donde emplearon residuos compuestos de sulfatos de calcio (CaSO_4) (generados como subproducto del beneficio del mineral de calamina) en un 30 % en peso para fabricar ladrillos con características mecánicas y ambientales aceptables, sinterizados a una temperatura de 1050 °C [11].

De manera paralela, *Lingling et al.* utilizaron cenizas volantes de tipo F, como reemplazo de distintos porcentajes de arcilla con lo que lograron fabricar ladrillos manufacturados por cocción

con alta resistencia a la compresión, baja absorción de agua porcentual, además de una tenacidad considerable. Como conclusión final de este estudio, se determinó el efecto de la disminución del tamaño de partícula de las cenizas volantes sobre el aumento de las propiedades mecánicas del ladrillo [12]. En 2018 *Joglekar et al.* evaluaron la viabilidad sostenible de la manufactura de ladrillos cerámicos elaborados con distintos tipos de residuos agroindustriales. Se analizaron criterios económicos, ambientales, sociales y técnicos; los resultados reportados arrojaron una respuesta positiva, argumentando la evidente sostenibilidad de este tipo de materiales [13].

Revisando los trabajos que se han hecho en Colombia, no se encuentran muchos resultados de investigaciones que vinculen residuos mineros como materias primas para la fabricación de ladrillos o materiales de mampostería. Entre los pocos trabajos que se reportan, se encuentran los resultados de *García et al.*, en 2013, de *García-Ubaque* en 2013 y de *Triviño* en 2015 [6,14,15] Esta situación en Colombia, puede indicar una falta de compromiso por parte del sector empresarial entorno a la generación de políticas de economía circular o de inserción en las distintas políticas de reciclaje de subproductos mineros.

A partir de lo anterior, este proyecto busca ofrecer una alternativa a la problemática del uso de residuos mineros para la fabricación de materiales de mampostería, como es el caso de los ladrillos cerámicos sinterizados, que cumplan los requisitos establecidos por la norma colombiana NTC 4017. En específico se estudiaron dos tipos de residuos de los principales procedimientos mineros en Antioquia: el primero consiste en los residuos arcillosos obtenidos a partir de actividades de extracción del oro de fuentes aluviales y el segundo corresponde a las colas de flotación obtenidas como subproducto de la concentración de material aurífero beneficiado a partir de vetas. Estos residuos fueron recolectados a través del proyecto de Fiscalización Minera, Convenio Interadministrativo de Colaboración entre la Universidad de Antioquia y la Gobernación de Antioquia.

2. METODOLOGÍA

En esta etapa experimental se realizó la recolección de los residuos RA y RF, los cuales se tomaron directamente de los vertederos y zonas de desechos de títulos mineros ubicados en el sector del Nordeste de Antioquia. El acondicionamiento de la materia prima consistió en el secado a temperatura ambiente durante un tiempo aproximado de 24 h; posteriormente, se desintegraron rocas aglomeradas de mayor tamaño y luego se redujo el volumen del material a muestras significativas de menor peso; lo anterior, siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C702-98(2003).

2.1. Caracterización de las muestras

Se tomaron muestras representativas de cada una de las materias primas con el objetivo de determinar las propiedades físico-químicas, cristalinas, térmicas y morfológicas, para ello se emplearon las siguientes técnicas de caracterización: Fluorescencia de rayos X (FRX) y Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) para determinar todas las características químicas; se determinó la distribución granulométrica de las muestras mediante tamizado mecánico (AG) (Acorde a lo establecido por las normas ASTM D422-63(2007)) y mediante Difracción Láser (DL) para partículas con tamaños menores a los 75 μm . Las fases cristalinas de las materias primas se identificaron mediante difracción de rayos X (DRX). Finalmente se estudió la evolución térmica de las muestras empleando análisis termogravimétrico y termogravimétrico (DTA/TGA).

2.2. Preparación de ladrillos

Inicialmente, se realizó una disgregación de la materia prima RA hasta obtener tamaños de partícula inferiores a los 450 μm ; para la muestra de RF, esta se molió hasta obtener tamaños inferiores a 100 μm ; las mezclas realizadas en este estudio se observan en la Tabla 1; la homogenización de las mezclas se realizó sin la adicción de ningún aglomerante o aditivo (en seco) y empleando recipientes cilíndricos, los cuales se sometieron a una rotación de 60 RPM durante 30 min. Las probetas de ladrillos macizos en verde (prismáticos de 160 mm x 52 mm x 15 mm) fueron conformados por prensado uniaxial a 3 MPa durante 1 min; posteriormente fueron secados a temperatura ambiente durante 24 h y finalmente, todas las muestras fueron sinterizadas a una temperatura de 1050 °C durante (3 h).

Tabla 1. Condiciones de mezclas realizadas.

Mezcla	1	2	3	4
RA (% en peso)	100	95	90	85
RF (% en peso)	0	5	10	15

2.3. Caracterización de los prototipos de ladrillos sinterizados

Para todas las condiciones de mezclas de los ladrillos sinterizados se les determinaron la contracción por quema siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C326 y la NTC 4017, también se determinó el porcentaje de pérdida de peso después de la quema; el porcentaje de absorción de humedad, de porosidad, así como la densidad aparente, se evaluaron siguiendo los lineamientos de la norma ASTM-C373. Por último, se estudió el efecto del aumento del residuo RF sobre los módulos de ruptura y de elasticidad en flexión de los prototipos de ladrillos fabricados por las mezclas descritas en la Tabla 1 siguiendo los lineamientos de la norma NTC 4017. Por otra parte, se emplearon como patrones de comparación interna prototipos de ladrillos compuestos por una materia prima arcillosa de uso común en la fabricación de elementos de mampostería a nivel industrial (AP).

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. Caracterización de la materia prima

Los resultados del análisis de composición química de los dos minerales se evidencian en la Tabla 2, la muestra RA presenta un porcentaje de Al_2O_3 y SiO_2 de 19,45 y 59,60 % respectivamente, encontrando que el valor presentando por la alúmina es ligeramente inferior al rango recomendado por la literatura para la fabricación elementos de mampostería (Al_2O_3 entre 20 y 30%) [16]; mientras que la cantidad de SiO_2 corresponde a los valores adecuados para la aplicación (la cual se sugiere que se entre 50 y 60% para la SiO_2). También es importante resaltar, el porcentaje de Fe_2O_3 el cual se relaciona con la formación de hematita, siendo este óxido el que permite obtener el color rojizo característico de los elementos de mampostería durante la sinterización, también se menciona el porcentaje de CaO que a altos contenidos permite obtener coloraciones amarillas en los prototipos [17]. Finalmente, los porcentajes de óxidos alcalinos como es el caso de Na_2O y K_2O son inferiores al 3 %, lo cual puede sugerir un bajo efecto fundente de estos en la sinterización y consecuente densificación de las muestras [18]. En contraste, los resultados para el residuo RF evidencian que tanto Al_2O_3 como SiO_2 con un 10,43 % y un 69,45 % respectivamente, no se

encuentran entre los valores referenciados para la fabricación de ladrillos; sin embargo un alto contenido de SiO₂ le confiere un conjunto de propiedades como material desgrasante y promover el aumento en la resistencia mecánica de la probeta de ladrillo [8]. Adicionalmente, se menciona que la arcilla de comparación interna AP, la cual presentó un porcentaje en peso de Al₂O₃ y SiO₂ de 23,80 % y 54,2 % de manera respectiva, muestra una composición muy coherente para su utilización como materia prima en ladrillos sinterizados.

Tabla 2. Resultados del análisis químico por FRX para todas las muestras (% en peso).

Óxido encontrado (*)	RA (%)	RF (%)	Óxido encontrado (*)	RA (%)	RF (%)
Al ₂ O ₃	19,45	10,43	SO ₃	0,04	0,10
CaO	1,45	5,50	SrO	0,03	0,04
Fe ₂ O ₃	6,40	4,96	TiO ₂	1,1	0,47
SiO ₂	59,60	69,45	Cr ₂ O ₃	0,05	0,02
MnO	0,09	0,12	ZnO	0,03	0,03
K ₂ O	1,58	0,60	ZrO ₂	0,04	0,13
MgO	1,85	3,19	BaO	----	----
P ₂ O ₅	0,08	0,05	P.P.I.(#)	7,45	3,68
Na ₂ O	0,88	1,23			

(*) Los óxidos son recalculados por el sistema OXGEN 2017 y UNIQUANT

(#) Pérdidas por Ignición a 1000°C durante 1 h.

Los datos correspondientes a la distribución del tamaño de partícula para los dos residuos, determinados por tamizado mecánico, son comparados en la Figura 1a; los resultados permiten predecir un contenido importante de partículas de tamaños muy finos, dado que aproximadamente el 83,04% de las partículas presentan tamaños inferiores a las 75 µm. Estos tamaños posiblemente puedan relacionarse con minerales de tipo filosilicatos como es el caso de las arcillas y otras especies de carácter plástico [19]. Además, no se presenta un porcentaje de finos tan elevado en el caso de la muestra RF, ya que en contraste con la muestra RA, el 21,83% de la muestra presenta tamaños inferiores a las 75 µm y un d50 de 141,61 µm, esto debido a la naturaleza general de las colas de flotación, ya que este tipo de residuos en su gran mayoría contienen de manera predominante especies asociadas al cuarzo, o albitas feldespáticas [20].

La Figura 1b permite comparar la distribución de tamaño de partícula de la fracción <75 µm para las dos muestras, las cuales fueron determinadas por difracción laser; los resultados de la muestra (RA) permiten predecir una mayor concentración de partículas con tamaños inferiores a las 75 µm, con un d50 de 15.733 µm, este valor es comparable con la distribución presentada por la arcilla patrón AP que se utiliza para la fabricación de ladrillos, con un d50 de 8,594 µm. En contraste, por parte de la muestra RF se presenta una distribución distinta en estos rangos de tamaño inferiores a los 75 µm, ya que los tamaños de partícula tienden a acumularse alrededor de 36,953 µm, valor correspondiente al d50 de la muestra.

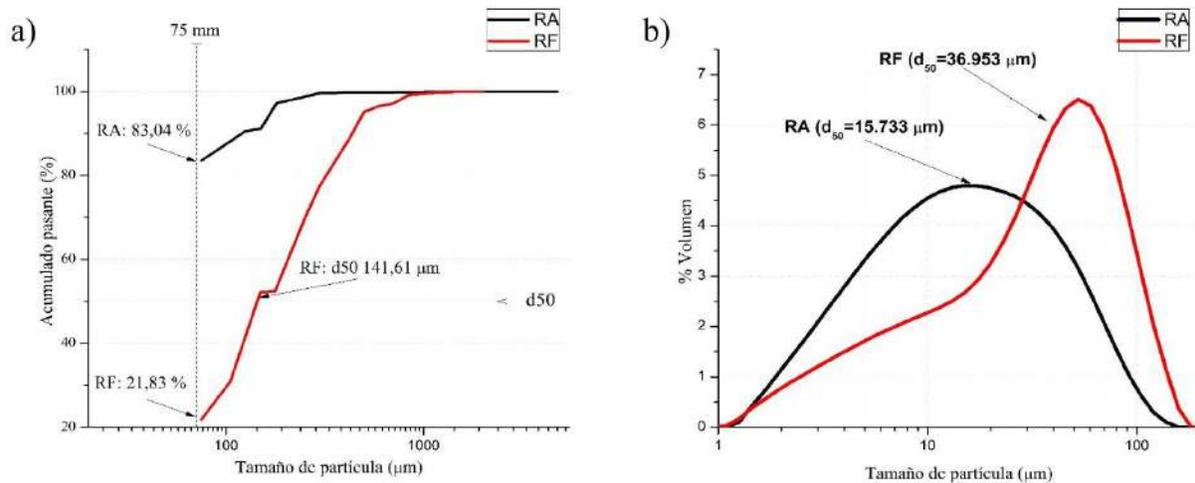


Figura 1. Resultados de análisis del tamaño de partícula a) Por tamizado mecánico y b) Por difracción láser.

Por otro lado, los resultados de la identificación de las fases cristalinas en las muestras estudiadas se observan en las Figuras 2a y 2b para los residuos RA y RF de manera respectiva. Para la muestra RA, se presentan fases cristalinas como clorita, moscovita y cuarzo, especies típicas en materiales arcillosos de alta plasticidad, y las cuales pueden ser posibles formadores de fases cristalinas de alta resistencia mecánica y térmica a alta temperatura, como es el caso de la mullita [21]. También se resalta que la oligoclasa y la hastingtonita, especies que pertenecen a la familia de los feldespatos, favorecen la densificación de un material sinterizado.

Por parte de los residuos de flotación (RF) la fase predominante es el cuarzo, lo cual es recurrente en residuos generados de manera homologa; además se presentan fases secundarias de filosilicatos como la vermiculita y la moscovita, además se encuentran en muy bajos porcentajes albita y cordierita. Finalmente, se presenta una fase cristalina asociada a un compuesto que contiene fósforo y carbono, el cual posee una estructura cristalina similar a un tipo de hiposulfito encontrado en la base de datos COD con el código 2012671; el cual posiblemente pueda vincularse a posibles reactivos empleados en la flotación de minerales del oro, siendo esto coherente con el origen de este tipo de materiales [22].

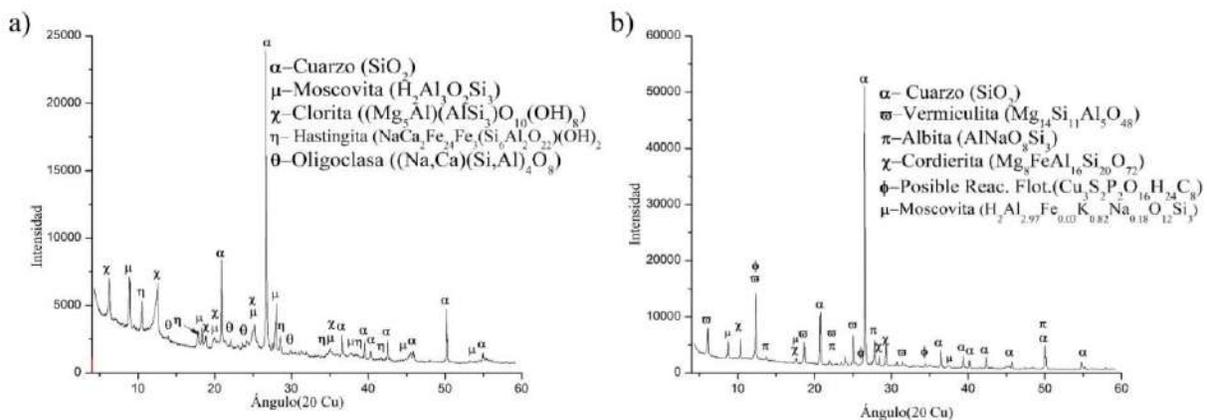


Figura 2. Resultados de difracción de rayos X para las muestras a) Residuos de Aluvión y b) Residuos de Flotación (RF).

Respecto a los resultados de espectroscopia infrarrojo (FTIR) los espectros analizados de las muestras RA y RF se muestran en la Figura 3, para la muestra RA se resaltan los picos generados por las vibraciones por tensión y flexión de los grupos funcionales OH posiblemente presentes en los filosilicatos presentes en esta muestra con números de onda 3698, 3622 y 1627 cm^{-1} de manera respectiva; posteriormente se encuentran vibraciones de extensión (E) típicas de los enlaces Si-O-Si a 992 cm^{-1} y de Si-O-Al a 905 cm^{-1} y finalmente, a 782 y 683 cm^{-1} se presentan dos tipos de vibraciones típicas de la flexión (F) y torsión (T) del enlace Si-O de manera respectiva [20,23,24]. Por otro lado, en contraste con la muestra RA, la muestra RF presenta ausencia de vibraciones OH estructurales, lo cual coincide con el bajo porcentaje de especies arcillosas encontrados en el análisis DRX; también se resalta la intensificación de la banda vibracional del enlace Si-O-Si ubicada en los 992 cm^{-1} y la ausencia del pico de Si-O-Al a 905 cm^{-1} ; también es importante destacar la vibración de tipo asimétrica (A) del enlace P-CH₃ a 1437 cm^{-1} . Lo anterior acompañado con la identificación de las fases cristalinas permite corroborar la presencia de especies compuestas de fosfatos asociados a posibles reactivos de flotación de mineral aurífero.

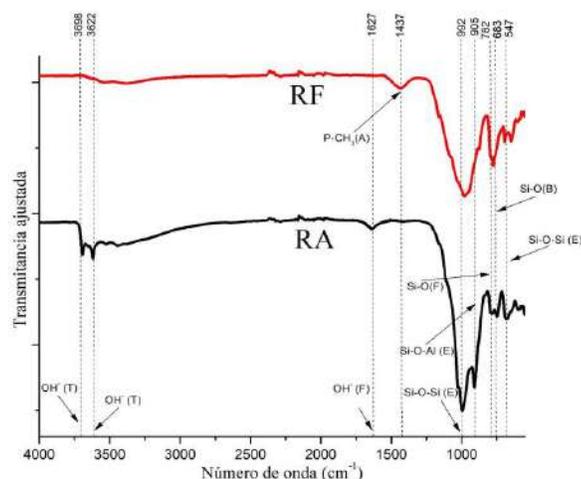


Figura 3. Espectros infrarrojos presentados por las muestras RA y RF.

Los resultados del análisis térmico (DTA) para la muestra RA se presenta en la Figura 4a (línea de color azul), y se puede observar dos eventos térmicos a resaltar, en los cuales ocurren cambios importantes: el primer evento térmico se presenta a 252 °C se considera como la eliminación de agua que se encuentra adsorbida en todas las superficies disponibles de las distintas especies presentes en la muestra, la segunda señal endotérmica se presenta alrededor de los 474 °C, se atribuye de manera directa a la descomposición de los OH presentes en los filosilicatos presentes en la muestra generando así posibles estructuras amorfas [25,26]. Por el lado de los resultados de análisis térmico gravimétrico (TGA), línea de color verde, se encuentra que el peso del material empezó a descender conforme se aumentaba la temperatura del ensayo, en las primeras etapas se puede relacionar posiblemente con la pérdida de humedad de la muestra hasta los 100 °C donde parece reducir la velocidad de pérdida de masa, alrededor de 252 °C inicia una pérdida de humedad adsorbida de manera interlaminar en las estructuras de los filosilicatos, también esta etapa de pérdida de peso podría relacionarse a posibles eliminaciones de material orgánico perteneciente a la materia prima, hasta llegar a una temperatura aproximada de 440 °C, donde el peso cae de manera abrupta, esto relacionado posiblemente a la eliminación de OH en estos filosilicatos [27], después de la etapa de transformación descrita anteriormente la velocidad de pérdida de masa disminuye

hasta llegar a temperaturas cercanas a los 1000 °C; los resultados indican que la muestra perdió alrededor de 8,61 % del peso inicial.

El análisis térmico de la muestra RF en la Figura 4b donde aparece un pico en la curva del (DTA) endotérmico sin pérdida considerable de peso, alrededor de 574 °C, el cual se atribuye a la transformación de cuarzo α a cuarzo β y posteriormente se presenta una pérdida de peso a temperaturas superiores a los 600 °C, relacionada a la eliminación de NaO presente en especies cristalinas como la albita [25]. En el TGA, la pérdida total de peso presentada por esta muestra fue de alrededor el 5,12 %.

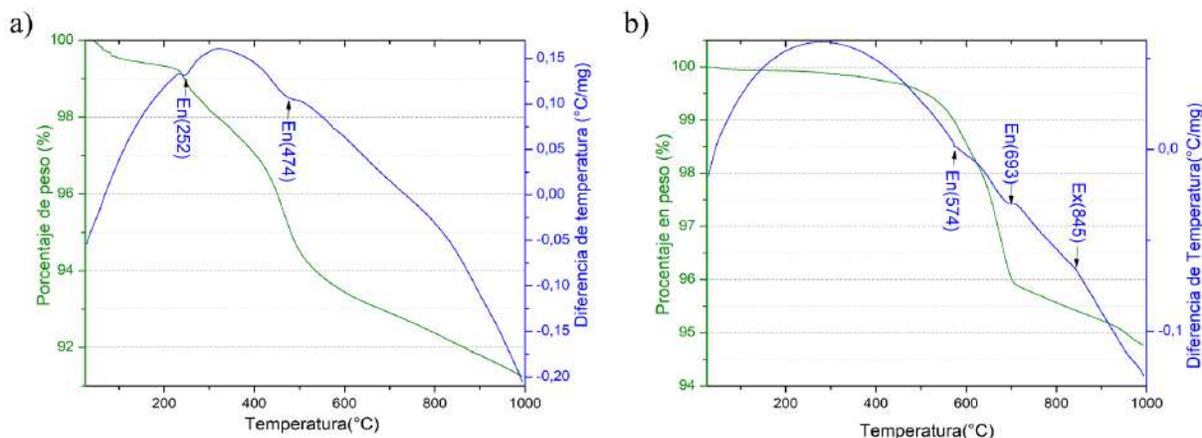


Figura 4. Resultados de los análisis térmicos (DTA/TGA) a) Muestra RA y b) Muestra RF.

3.2. Caracterización de los prototipos de ladrillos elaborados por sinterización

El comportamiento de la contracción en quema para los prototipos de ladrillos elaborados con las mezclas establecidas en la Tabla 1 se puede evidenciar en la Figura 5a donde se observa que existe un efecto de disminución de esta característica con el aumento de la proporción de RF; lo cual puede ser benéfico ya que este residuo favorecería la estabilidad dimensional después de realizar un proceso de sinterización de muestras conformadas en verde; cabe resaltar que a comparación con los prototipos de la muestra de control AP en todos los casos tenemos porcentaje de contracción en quema menores, lo cual puede resaltar la posibilidad de elaborar elementos de mampostería con este tipo de materiales. Finalmente, todas las muestras de prototipos de ladrillos estudiadas presentan valores de contracción en quema considerablemente inferiores al valor crítico sugerido por la norma ASTM C326 (8 %).

La Figura 5b permite observar el porcentaje de pérdida en peso de los prototipos de ladrillos estudiados; donde se observa de nuevo el efecto de la adición de la muestra RF en las mezclas descritas en la Tabla 1 y se evidencia una disminución del peso de las muestras con el aumento de la muestra RF; lo cual tiene coherencia con los análisis térmicos previamente descritos, principalmente debido a que la pérdida de peso que presenta la muestra RF es inferior a la que presenta la muestra RA, la cual tiene un porcentaje mayor de filosilicatos que comúnmente se pierden OH durante la quema. En el caso de la muestra con 5 % de RF parece presentar un valor medio de la pérdida de peso durante la sinterización ligeramente superior al presentado por la muestra sin incorporación de RF. Sin embargo, la diferencia entre estos resultados no parece ser estadísticamente representativa, debido a la importante desviación presentada por los resultados de 5 % de RF. Estos valores se contrastaron con resultados encontrados en la literatura para estudios

similares y se observa que estas muestras están en rangos de pérdida de pesos similares a materiales elaborados por métodos parecidos [11]. Para terminar, los resultados para todas las mezclas presentan valores inferiores a los encontrados en los prototipos de referencia AP, la cual presenta un valor promedio de 8,7 %.

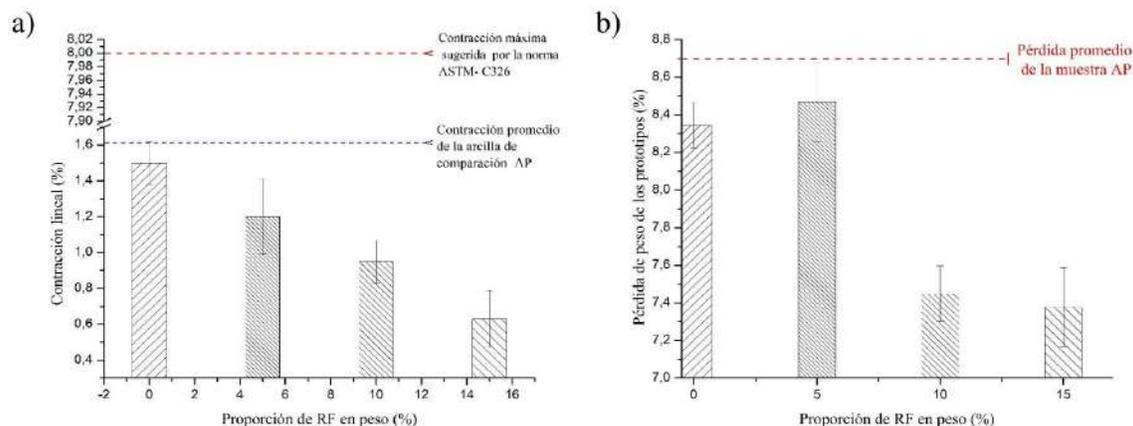


Figura 5. Resultados para las mezclas estudiadas a) Contracción en quema b) Pérdida de peso de los ladrillos sinterizados.

3.3. Determinación de las propiedades físicas de los prototipos de ladrillos

Las Figuras 6a, 6b y 6cc muestran los resultados de las pruebas físicas determinadas por el método de inmersión siguiendo los lineamientos de la norma NTC 4017 [17]; para el caso del porcentaje de absorción de humedad se observa un importante aumento con la incorporación de los residuos RF como se observa en la Figura 6a; lo cual puede explicarse a partir de un posible aumento del volumen de la porosidad interna del prototipo del ladrillo, esto generado por incorporación de diferentes partículas de mayor tamaño medio presentes en la muestra de RF, como es el caso de la alta cantidad de cuarzo, [11]. Por otro lado, se evidencia el aumento de la porosidad aparente de las muestras estudiadas con la incorporación de RF en la Figura 6b. Sin embargo, los valores de porosidad más elevados se encuentran en rangos aceptables para la elaboración de elementos de mampostería, según los criterios establecidos por la norma técnica ASTM C373.

De igual manera el aumento de la porosidad asociada a la incorporación de los residuos RF como se esperaba presenta un efecto sobre la densidad tipo “bulk” de los prototipos, la Figura 6c muestra la tendencia a la disminución de la magnitud de esta propiedad. La densidad de estos prototipos es muy baja si se compara con los presentados por las muestras de control interno AP ($1,81 \pm 0,54 \text{ g/cm}^3$); y además, según los lineamientos la norma ASTM C90 se puede clasificar a estos prototipos como como elementos de mampostería ligeros de baja densidad [1].

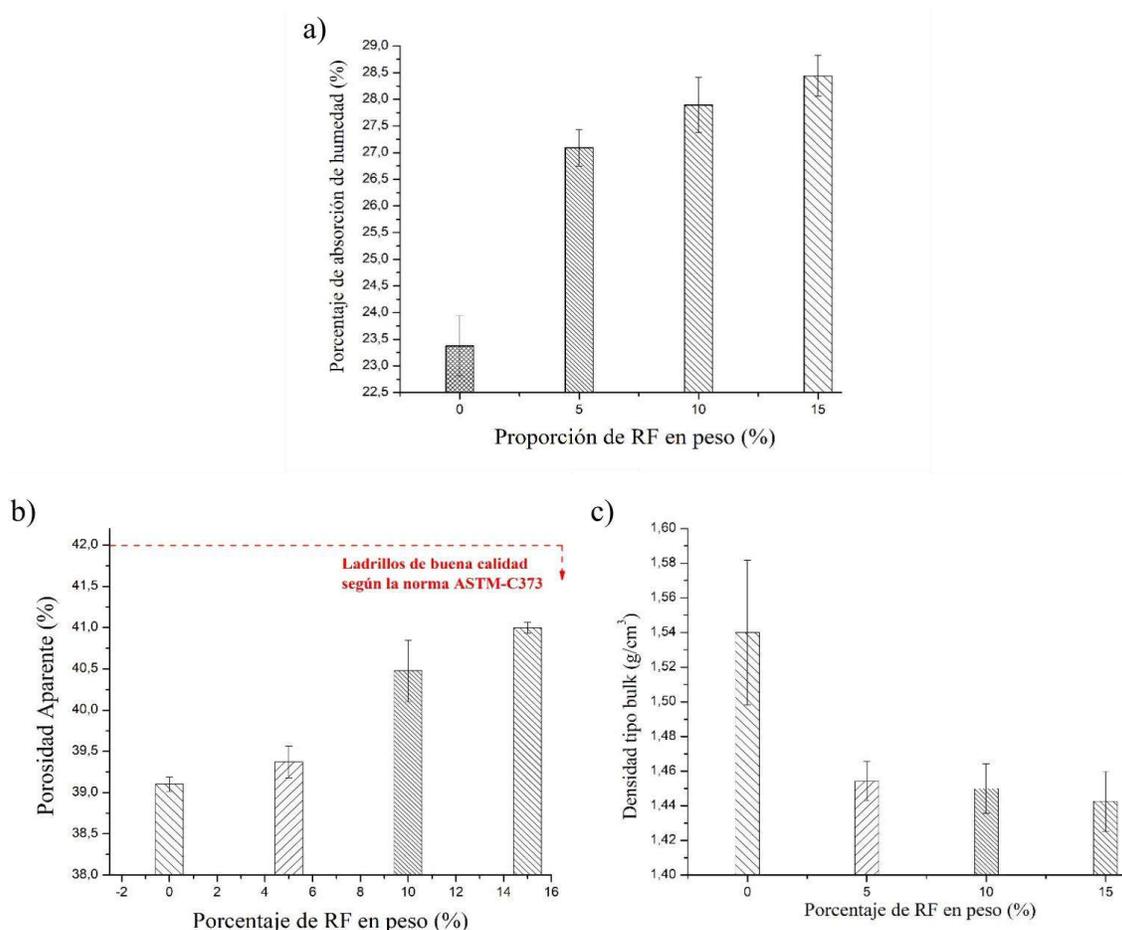


Figura 6. Resultados de las propiedades físicas de los prototipos de ladrillos a) Porcentaje de absorción de humedad b) Porosidad aparente y c) densidad aparente.

3.4. Caracterización mecánica de los prototipos de ladrillos

Los resultados del ensayo de flexión se presentan en la Figura 7a en donde se resalta el efecto de los residuos de flotación sobre el módulo de ruptura de los prototipos de ladrillos; las muestras elaboradas con RA sin ninguna incorporación de RF presentan valores de $3,13 \pm 0,37$ MPa y se puede observar que con la adición de 5% de RF a los prototipos se presenta un ligero incremento del valor medio de esta resistencia llegando a valores de $3,67 \pm 0,80$ MPa. Sin embargo, para los prototipos con incorporaciones de RF de 5 % o más en peso (5, 10 y 15 %) no se puede afirmar que exista una diferencia estadística significativa, debido al amplio rango variabilidad o desviación de los resultados del módulo de ruptura. Finalmente, y de manera comparativa los resultados presentados por las muestras estudiadas se encuentran en un rango similar y en algunos casos superiores a los valores de módulo de ruptura determinados para las muestras de comparación interna (AP), además dichos valores son comparables con resultados encontrados en literatura relacionada [1,11,28].

La Figura 7b muestra el cambio presentado por el módulo de elasticidad en flexión de los prototipos estudiados; esta propiedad permite describir la proporcionalidad directa entre la carga aplicada y la deformación elástica del material; y los resultados muestran que no se presenta un efecto considerable debido a la incorporación de RF. Por otro lado, a 15 % de RF en peso se muestra un

ligero aumento del valor promedio del módulo de proporcionalidad; lo cual podría significar que se presenta un aumento en la rigidez a mayores porcentajes de este residuo. Sin embargo, es necesario realizar estudios a mayores concentraciones porcentuales para soportar dichas afirmaciones. Finalmente, se evidencia que todos los resultados presentados por las mezclas descritas en la Tabla 1, presentan valores superiores que los presentados por las muestras de control interno AP, como se evidencia de nuevo en la Figura 7b.

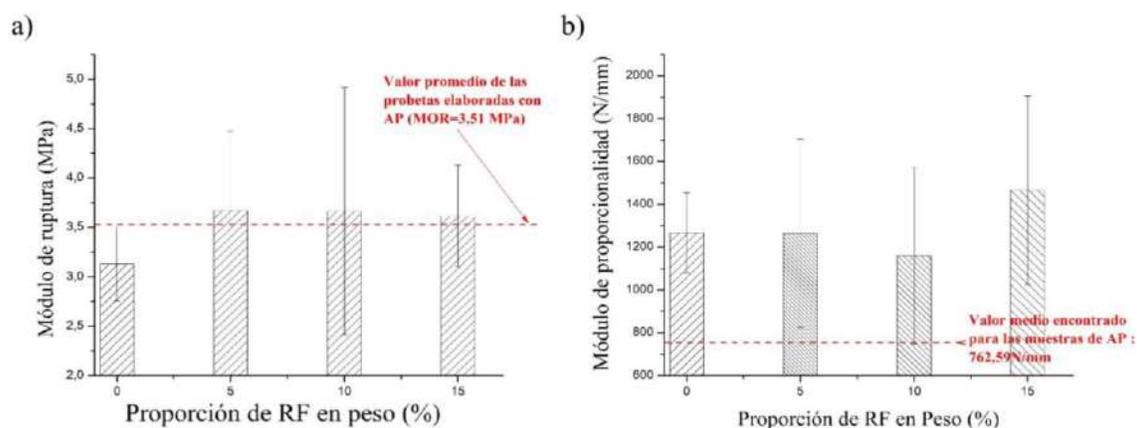


Figura 7. Resultados del ensayo de flexión en función del porcentaje de RF a) Módulo de ruptura y b) Módulo de elasticidad en flexión.

4. CONCLUSIONES

Los prototipos de ladrillos estudiados elaborados con residuos mineros muestran características comparables con elementos de mampostería de baja densidad, con propiedades físicas y mecánicas comparables con elementos empleados a nivel industrial. Se determinaron las características generales de la materia prima y la posible aplicación de estos residuos para la fabricación de elementos de mampostería.

Entre los resultados más destacables se encuentra que la muestra RA presenta una composición mineralógica consistente de filosilicatos de alta plasticidad como es el caso de la clorita, y especies que permitirán la formación de mullita, como es el caso de la moscovita. Se destaca la presencia de cuarzo como fase principal del residuo RF.

La incorporación de RF aumenta la absorción de humedad y la porosidad de las probetas, pero no afecta de manera significativa el módulo de ruptura; además los prototipos estudiados presentan módulos con valores cercanos a los encontrados para los elementos de control interno AP. Finalmente, el módulo de elasticidad en flexión parece tener un aumento por la incorporación de 15 % de RF.

5. AGRADECIMIENTOS

En este proyecto se agradece a todos los integrantes de los grupos de investigación pertenecientes a la Universidad de Antioquia GIMACYR y GIGA; así como al proyecto enmarcado al “Convenio interadministrativo de colaboración No.4600007519. Fortalecimiento del control derivado de la Delegación Minera en cabeza de la Gobernación de Antioquia, en los aspectos técnico, jurídico y económico, a través de la Fiscalización, seguimiento y control de los títulos mineros, y de

actividades académicas relacionadas”. Finalmente, a las empresas que han suministrado los residuos los residuos empleados en este proyecto.

6. REFERENCIAS

- [1] A. Al-Fakih, B. S. Mohammed, M. S. Liew, and E. Nikbakht, “Incorporation of waste materials in the manufacture of masonry bricks: An update review,” *J. Build. Eng.*, vol. 21, no. September 2018, pp. 37–54, 2019.
- [2] M. A. Aramburo and Y. Olaya, “Problemática de los pasivos ambientales mineros en Colombia,” *Gestión y Ambient.*, vol. 15, no. 3, pp. 125–133, 2012.
- [3] É. Lèbre, G. D. Corder, and A. Golev, “Sustainable practices in the management of mining waste: A focus on the mineral resource,” *Miner. Eng.*, vol. 107, pp. 34–42, 2017.
- [4] E. Casadiego Quintero, A. G. Gutiérrez Bayona, M. Á. Herrera Lopez, and M. L. Páez Rojas, “Manejo estratégico de la producción de residuos estériles de minería sustentable, utilizando prácticas mineras eco-eficientes en Colombia,” *Rev. Investig. Agrar. y Ambient.*, vol. 8, no. 2, pp. 107–118, 2017.
- [5] G.-M. Dora, “Sistema productivo del carbón mineral y sus residuos,” Universidad Autónoma de Nuevo León, 1999.
- [6] M. D. P. Triviño-Restrepo and E. Gil-Lancherosa, “Utilización de los residuos de la extracción de carbón y del proceso de coquización junto con desechos plásticos, como alternativa de obtención de materiales.,” *Energética*, vol. 46, pp. 85–95, 2015.
- [7] J. M. Barbero, E. Montero, A. Vallés, M. A. Plasencia, J. Romanyk, and J. López, “Infección de prótesis articular en el paciente con fractura de cadera. Diferencias frente a la infección de prótesis electiva,” *Rev. Esp. Quim.*, vol. 29, no. 5, pp. 273–277, 2016.
- [8] S. N. Monteiro and C. M. F. Vieira, “On the production of fired clay bricks from waste materials: A critical update,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 68, pp. 599–610, 2014.
- [9] C. Coletti, G. Cultrone, L. Maritan, and C. Mazzoli, “How to face the new industrial challenge of compatible, sustainable brick production: Study of various types of commercially available bricks,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 124–125, pp. 219–226, 2016.
- [10] M. S. El-Mahllawy, “Characteristics of acid resisting bricks made from quarry residues and waste steel slag,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 8, pp. 1887–1896, 2008.
- [11] Y. Taha, M. Benzaazoua, R. Hakkou, and M. Mansori, “Natural clay substitution by calamine processing wastes to manufacture fired bricks,” *J. Clean. Prod.*, vol. 135, pp. 847–858, 2016.
- [12] X. Lingling, G. Wei, W. Tao, and Y. Nanru, “Study on fired bricks with replacing clay by fly ash in high volume ratio,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 19, no. 3, pp. 243–247, 2005.
- [13] S. N. Joglekar, R. A. Kharkar, S. A. Mandavgane, and B. D. Kulkarni, “Sustainability assessment of brick work for low-cost housing: A comparison between waste based bricks and burnt clay bricks,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 37, no. November 2017, pp. 396–406, 2018.
- [14] C. A. García, M. C. García Vaca, and M. L. Vaca Bohórquez, “Resistencia mecánica de ladrillos preparados con mezclas de arcilla y lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales.,” *Rev. tecnura*, vol. 17, no. 38, pp. 68–81, 2013.
- [15] C. A. García-Ubaque, A. González-Hässig, and M. L. Vaca-Bohórquez, “Ceramic bricks made from municipal solid waste incineration derived clay and ashes: A quality study,” *Ing. e Investig.*, vol. 33, no. 2, pp. 36–41, 2013.
- [16] N. Afanador García, A. C. Ibarra Jaime, and C. A. López Durán, “Caracterización de arcillas empleadas en pasta cerámica para la elaboración de ladrillos en la zona de Ocaña , Norte de Santander,” *Epsilon*, vol. 20, no. ISSN 1692-1259, pp. 101–119, 2013.
- [17] F. Sandford and B. Liljegren, “La formación de color en ladrillos rojos y amarillos,” *Trans. Chalmers Univ. Technol.*, no. 282, pp. 40–48, 1964.

- [18] S. K. Amin, S. A. El-Sherbiny, A. A. M. A. El-Magd, A. Belal, and M. F. Abadir, "Fabrication of geopolymer bricks using ceramic dust waste," *Constr. Build. Mater.*, vol. 157, pp. 610–620, 2017.
- [19] H. H. Murray, *Applied Clay Mineralogy - Occurrences, Processing and application of Kaolins, Bentonites, Palygorskite-Sepiolite, and common Clays*, vol. 2. Paisés Bajos, 2006.
- [20] S. Kaufhold, M. Hein, R. Dohrmann, and K. Ufer, "Quantification of the mineralogical composition of clays using FTIR spectroscopy," *Vib. Spectrosc.*, vol. 59, pp. 29–39, 2012.
- [21] C. Rodríguez-Navarro, G. Cultrone, A. Sánchez-Navas, and E. Sebastian, "TEM study of mullite growth after muscovite breakdown," *Am. Mineral.*, vol. 88, no. 5, pp. 713–724, 2003.
- [22] Ö. Çelik, I. Y. Elbeyli, and S. Pişkin, "Utilization of gold tailings as an additive in Portland cement," *Waste Manag. Res.*, vol. 24, no. 3, pp. 215–224, Jun. 2006.
- [23] J. Galindo, A. Muñoz, and M. Caicedo, "Caracterización de los ladrillos constitutivos de un puente histórico en Popayán (Colombia)," *Rev. Ing. e investigación*, vol. 28, no. 2, pp. 15–21, 2008.
- [24] Y. de B. C. G. I. Ramírez, "Análisis por Espectroscopía Infraroja de algunas arcillas colombianas," *Revista Colombiana de Química*, vol. 10, no. Chemistry, pp. 45–52, 1980.
- [25] U. P. de Madrid, "Métodos de análisis térmico 1. Introducción," pp. 1–32, 2010.
- [26] A. Manni, A. El Haddar, I. E. E. A. El Hassani, A. El Bouari, and C. Sadik, "Valorization of coffee waste with Moroccan clay to produce a porous red ceramics (class BIII)," *Bol. la Soc. Esp. Ceram. y Vidr.*, pp. 1–10, 2019.
- [27] A. Terzić, L. Andrić, and V. Mitić, "Mechanically activated coal ash as refractory bauxite shotcrete microfiller: Thermal interactions mechanism investigation," *Ceram. Int.*, vol. 40, no. 8, Part A, pp. 12055–12065, Sep. 2014.
- [28] Z. Zhang, Y. C. Wong, A. Arulrajah, and S. Horpibulsuk, "A review of studies on bricks using alternative materials and approaches," *Constr. Build. Mater.*, vol. 188, pp. 1101–1118, 2018.