

**Fabricación y caracterización de ladrillos Eco -amigables con  
adición de un residuo industrial de hierro**

**Jesús David Bautista Marín**

Trabajo dirigido para optar al título de ingeniero industrial con  
énfasis en materiales y manufactura

Directora Trabajo Dirigido  
Johanna Esguerra-Arce, Ph.D

**Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito  
Decanatura de Ingeniería Industrial  
Pregrado en Ingeniería Industrial  
Bogotá D.C., Colombia  
2020**

## **Agradecimientos**

A Dios y a mi familia por la bendición y el apoyo para poder optar por el título de ingeniero industrial con énfasis en materiales y manufactura .

Agradecerle especialmente a mi directora de trabajo dirigido Johanna Esguerra-Arce, Ph.D por acompañarme en todo momento y a su hermana Adriana Esguerra-Arce Ph.D por el gran apoyo siendo unas increíbles personas y profesionales, quienes con su conocimiento me guiaron a lo largo del desarrollo de este trabajo.

# Fabricación y caracterización de ladrillos Eco -amigables con adición de un residuo industrial de hierro

Jesús D. Bautista, Adriana Esguerra-Arce, Johanna Esguerra-Arce

CIMSER, Departamento de ingeniería industrial , Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), Bogotá Colombia

## Resumen

Se investigó el efecto de la adición del desecho de óxido de hierro llamado calamina, compuesta de FeO (wustita), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (hematita) y Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (magnetita), sobre las propiedades físicas, mecánicas y microestructurales de ladrillos de sílice. Para esto se realizó la adición de 0, 5, 10 y 15 % de calamina a arcilla del altiplano cundiboyacense para la fabricación de ladrillos. Una vez sinterizados se midió densidad, porosidad, absorción de agua, pérdida de peso y resistencia a flexión de los ladrillos. Además, se llevó a cabo un análisis microestructural mediante DRX y un análisis TGA/DTGA para los cuatro tipos de ladrillos comparándolos entre sí. Obteniendo variaciones de tonalidad para los tres tipos de ladrillos, una disminución promedio a flexión del 33 % y un aumento de porosidad promedio de 4 % respecto a los ladrillos tradicionales, además se encontró que la adición de calamina no se transforma, y no reacciona químicamente, siendo una adicción estable. Determinando que la calamina tratada por molienda es un método de recuperación y reintegración para aplicaciones en la construcción (Fabricación de Ladrillos).

**Palabras Claves:** Calamina, residuo industrial, reciclaje, ladrillos eco amigables

## Abstract

The effect of the addition of the iron oxide waste called calamine, composed of FeO (wustite), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (hematite) and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (magnetite), on the physical, mechanical and microstructural properties of silica bricks was investigated. For this, the addition of 0, 5, 10 and 15% of calamine was made to clay from the Cundiboyacense highlands for the manufacture of bricks. Once sintered, the density, porosity, water absorption, weight loss and flexural resistance of the bricks were measured. In addition, a microstructural analysis using XRD and a TGA / DTGA analysis were carried out for the four types of bricks comparing them with each other. Obtaining variations in hue for the three types of bricks, an average decrease in flexion of 33% and an increase in average porosity of 4% compared to traditional bricks, furthermore, it is found that the addition of calamine does not transform, and does not reacts chemically, being a stable addiction. Determining that calamine treated by grinding is a recovery and reintegration method for construction applications (Brick Manufacturing)

**Keywords:** Calamine, industrial waste, recycling, eco friendly bricks

## Introducción

Actualmente es importante el concepto 3-R: reducir, reutilizar y reciclar. El objetivo es promover el reciclaje, la reutilización y la transformación de subproductos industriales en materia prima y energía. Gran parte de los procesos de manufactura, aplicados a la transformación de metales, en la mayoría de los casos no concluyen con la obtención únicamente del producto final, sino que de ellos se obtienen subproductos adicionales. De esta manera, durante la deformación en caliente de los aceros al carbono, se produce una capa de óxido en su superficie llamada calamina, compuesta de FeO (wustita), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (hematita) y Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (magnetita). Esta capa de óxido no es compacta, no es adherente y es porosa, por lo tanto, se desprende del acero como subproducto siendo un desperdicio de las siderúrgicas. En Colombia, las industrias producen entre 20 y 30 kg de calamina por tonelada de acero fabricada [1] por esa razón la importancia de darle un nuevo uso buscando la manera de reincorporación en los procesos productivos. Uno de los materiales cerámicos más ampliamente utilizados en la industria es la arcilla, siendo los ladrillos uno de los materiales de construcción más utilizados en todo el mundo, la producción de ladrillos a nivel mundial es alrededor de 1.391 billones de unidades anuales, que es un material de bajo costo, que se encuentra en forma natural y en gran abundancia en Colombia. Adicionalmente, en muchos lugares del mundo, ya existe una escasez del material (arcilla) de origen natural para la producción de los ladrillos convencionales [2] y con ello la importancia de incursionar en agregados que sustituyan parte de esa arcilla conservando propiedades las cuales permitan su uso estructural, y a su vez genere un impacto ambiental positivo sin afectar la calidad del producto final.

En la actualidad el consumo energético aumenta considerablemente debido al crecimiento poblacional, así mismo los requerimientos energéticos tienen comportamiento creciente, por esta razón la población está en la búsqueda constante de métodos de generación de energía para poder suplir la demanda actual y futura, siendo esta mucho mayor con el paso del tiempo, un claro ejemplo es la construcción de más plantas de energía a nivel mundial, como es el caso del megaproyecto hidroeléctrico de Hidroitango en Colombia el cual busca poder cumplir con la demanda energética de la población actual y futura, por esto mismo todos los sectores se encuentran a la vanguardia investigando e incursionando en métodos que requieran menor consumo energético y el sector de la construcción no es la excepción, buscando constantemente edificaciones que sean autosostenibles con materiales que cumplan todos los requerimientos y que a su vez se adopten e incorpore la visión y concepto ecológico moderno de 3R. Siendo estas edificaciones en gran parte sistemas abiertos (interactúan con el medio ambiente), una parte de esta interacción es el mecanismo de transferencia de calor por parte del ambiente externo el cual afecta las edificaciones ya sea por calor o frío extremo. Hoy en día aproximadamente el 30% de la energía total consumida en el mundo se usa en edificaciones [3] Siendo destinada en gran proporción al gasto energético que requiere los sistemas de calefacciones u o sistemas de aislamiento térmico que se requieren en ciudades frías o en estaciones como invierno. El ahorro de energía se puede disminuir mediante edificaciones que incorporen techo y paredes con mejores propiedades de aislamiento térmico disminuyendo considerablemente el consumo energético de las edificaciones [4]. Los ladrillos a base de arcilla son los materiales de construcción más utilizados para muchos fines, como la decoración, el soporte de carga y el aislamiento de construcciones en todo el mundo, siendo este un material muy abundante en la tierra y con bajos costos de obtención y fabricación por ende dicho material es perfecto para una innovación en cuanto diseño, propiedades aptas para la construcción y con un mejoramiento térmico que aporte y sea generador inmediato de reducción de consumo energético. Así mismo los estudios sobre fabricación de ladrillo con incorporación de aditivos que son desechos para algunas industrias han aumentado recientemente buscando darle un nuevo enfoque investigando sus propiedades físicas, mecánicas y térmicas intensamente, con

el objetivo de reincorporar a los procesos productivos esos desperdicios que causan grandes problemas para la industria y el medio ambiente [5] [6] [7] [8] [9][10] [11] [12].

## Metodología

### Caracterización de materias primas

La calamina fue donada por Gerdau-Diaco, una industria que produce, entre otras, láminas producidas por laminado en caliente con bajo contenido de carbono (ver Figura 1-a) . Ésta fue preparada como agregado por el método de molienda en un molino de bolas durante 72 h (ver Figura 1-b) . La arcilla, por su parte, es proveniente de las tierras altas colombianas y se sometió inicialmente a un pretratamiento de secado y tamizado. Tanto la arcilla como la calamina se caracterizaron por difracción de rayos X (DRX) con un difractómetro RIGAKU (Dmax2100) usando radiación  $\text{Co K}\alpha$  ( $\lambda = 1.78899 \text{ \AA}$ , 30 kV y 16 mA). Se obtuvieron ladrillos con adición de 5%, 10% y 15% en peso de calamina, como se muestra en la (Tabla 1) donde se evidencia la codificación utilizada a lo largo del documento donde se representa el porcentaje de arcilla (CL) ,y el porcentaje de calamina (CA). El estudio de los cambios inducidos por la temperatura se llevó a cabo por DSC/TGA para cada mezcla desde temperatura ambiente hasta 1100 ° C con una velocidad de calentamiento de 10 ° C/min en una atmósfera de aire en un equipo DT Q600 de instrumentos TA. Finalmente se calcularon los límites de Atterberg para cada mezcla a fin de determinar la cantidad de agua que se utilizará para el moldeo de los ladrillos siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D4318-05.

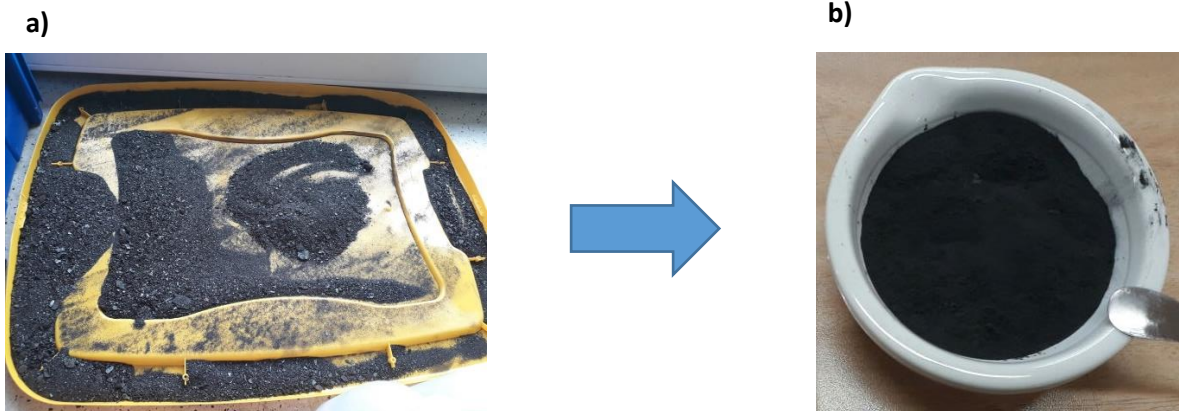


Figure 1. a) Calamina en estado bruto y, b) Calamina luego de molienda 72h

Tabla 1. Porcentaje en peso de mezcla usado para producir ladrillos

Arcilla (% Peso)	Calamina (% Peso)	Codificación
100	0	100CL-0CA
95	5	95CL-5CA
80	10	90CL-10CA
75	15	85CL-15CA

### Fabricación de ladrillos

La materia prima de la arcilla fue tamizada hasta obtener un tamaño de partícula entre  $80\mu\text{m}$  y  $10\text{ mm}$  (ver Figura 2-a) para posteriormente incorporar las adiciones en peso como se presentaron en la tabla 1 (ver Figura 2-b) . Luego a cada mezcla se le adicióno agua teniendo en cuenta los resultados obtenidos de los límites de Atterberg a fin de alcanzar la plasticidad .

Los ladrillos se obtuvieron por moldeo manual usando moldes con dimensiones de  $7\text{cm} \times 3.5\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ . Después de conformar los ladrillos se dejaron secar en tres etapas : Secado al ambiente , secado en horno a  $50^\circ\text{C}$  y  $105^\circ\text{C}$  con un tiempo de permanencia de  $24\text{ h}$  para cada etapa, esto con fin de evitar agrietamientos durante la cocción por eliminación abrupta de agua. Finalmente, las muestras fueron sinterizadas a  $1050^\circ\text{C}$  a velocidad de calentamiento de  $2^\circ\text{C}/\text{min}$  con tiempo de permanencia de  $2\text{ h}$  y luego enfriadas hasta temperatura ambiente

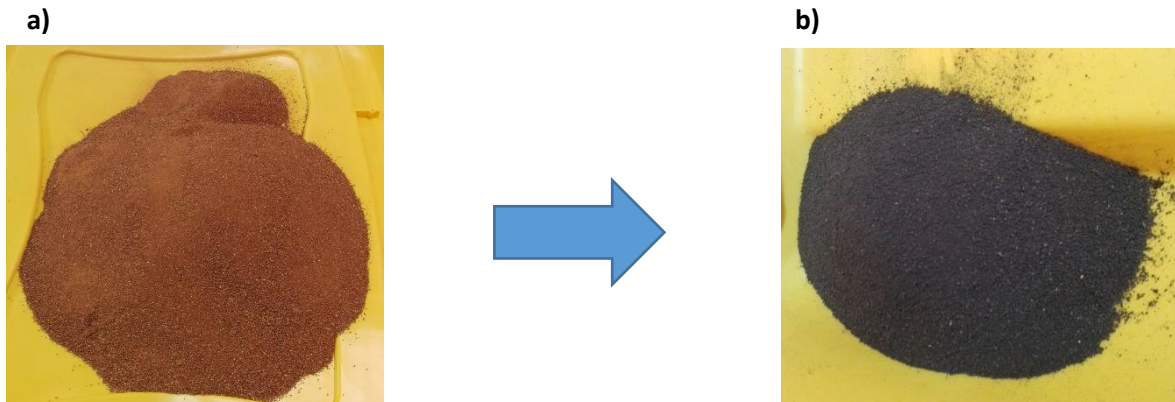


Figure 2. a) Arcilla con tamaño de partícula entre  $80\mu\text{m}$  y  $10\text{ mm}$  y, b) Arcilla con adición de calamina (85CL-15CA)

### Caracterización de ladrillos

Finalmente, los cerámicos obtenidos con las diferentes adiciones fueron caracterizados físicamente mediante medida de densidad aparente, porosidad aparente, absorción de agua por el método de Arquímedes (según la Norma ASTM C 20-00-2005), y mecánicamente midiendo resistencia a la flexión con un equipo de laboratorio SHIMADZU SES - 1000, siguiendo la norma (ASTM C67 2009). Además, se hizo un estudio microestructural por medio de difracción de rayos X para explicar las propiedades antes mencionadas.

## Resultados y discusión

### Materia prima

En la Figura 3-a) se puede ver el patrón DRX de la arcilla. Como puede verse, la arcilla presenta especies minerales como el cuarzo y la caolinita, que proporciona propiedades plásticas al preparado, y otras como la moscovita, la montmorillonita y la cristobalita. A pesar de que se informa que la mayoría de las arcillas contienen carbonatos [13], la arcilla de este estudio no los contiene [14]. La parte b) de la misma figura muestra la distribución granulométrica, que muestra que el tamaño de partícula varió entre  $\sim 80\mu\text{m}$  y  $\sim 10\text{ mm}$ .

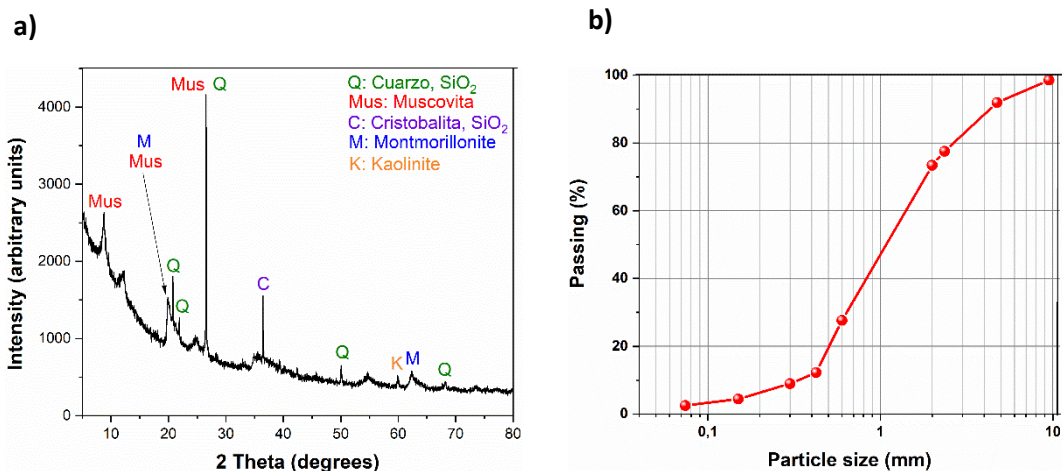


Figure 3. a) Patrón DRX de la arcilla y, b) distribución granulométrica de la arcilla

En la Figura 4-a) se puede ver el patrón DRX de la calamina donde se evidencia la presencia de los tres óxidos de hierro: wüstita (FeO), hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>). La presencia de los óxidos se explica por el proceso de oxidación del hierro durante el laminado en caliente, donde la oxidación ocurre de adentro hacia afuera en la superficie de la lámina [15]. La parte b) de la misma figura muestra la distribución granulométrica de la calamina, que muestra el tamaño de partícula varió entre ~ 0.5 μm y ~ 250 μm.

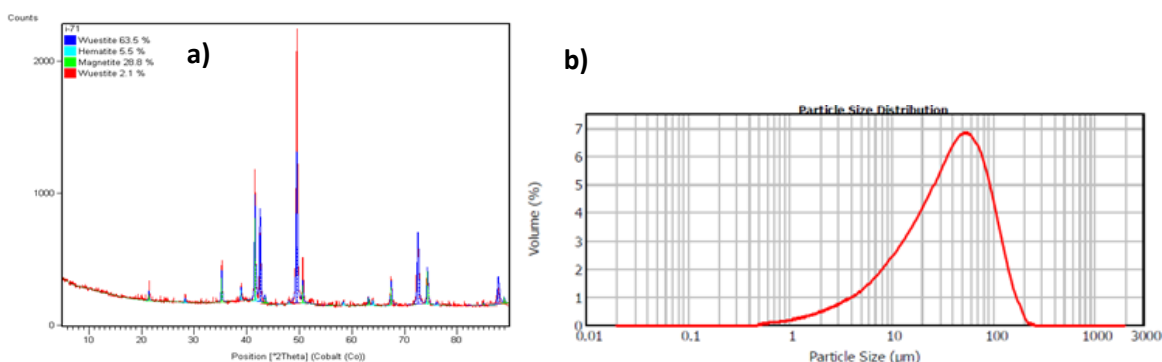


Figure 4.a) patrón de DRX de calamina y, b) distribución granulométrica de la calamina

La Figura 5 muestra el gráfico de plasticidad de las cuatro muestras de estudio en el diagrama de Casagrande, y la Tabla 2 muestra los límites de Atterberg. Se puede ver que la arcilla (100% arcilla) posee una alta plasticidad con un límite de líquido ~ 53%. Sin embargo, a medida que se agrega calamina a la arcilla, están en el rango de arcillas inorgánicas de plasticidad media con un índice de plasticidad superior al 10%, por lo que pueden considerarse apropiadas para la fabricación de cerámica para la construcción [16]. Además, podemos decir que la calamina tiene un efecto desengrasante en la arcilla.

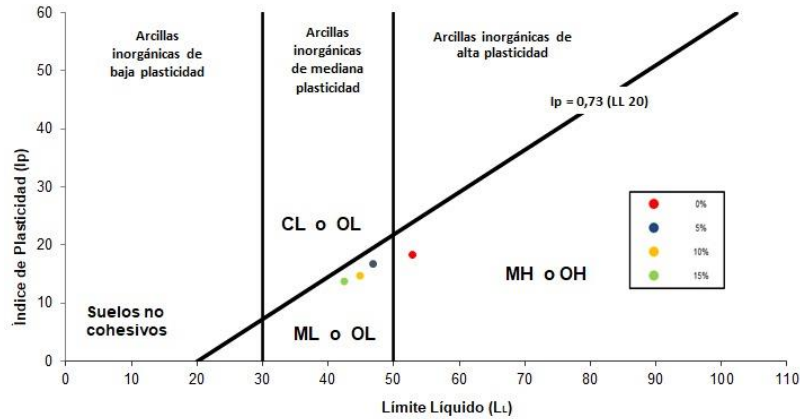


Figure 5. Tabla de plasticidad

Tabla 2. Límites de Atterberg de las mezclas.

Material	L <sub>p</sub>	L <sub>L</sub>	I <sub>p</sub>
100CL-0CA	34.5	52.8	18.3
95CL-5CA	30.1	46.9	16.8
80CL-10CA	29.9	44.8	14.9
75CL-15CA	28.6	42.4	13.8

## DSC/TGA

La Figura 6-a) muestra el porcentaje en peso y la derivada de la pérdida en peso en función de la temperatura de las mezclas cuando éstas se calientan desde 25 hasta 1200 °C. La Figura 6-b) muestra el flujo de calor de las mezclas. A medida que las muestras se calientan, pierden gradualmente el agua unida físicamente. Esto se manifiesta con una marcada pérdida de peso en la curva TGA y en un pico endotérmico en la curva de flujo de calor alrededor de 54 grados Celsius para todas las mezclas. Se puede ver que 100CL-0CA tuvo la mayor pérdida de peso y 95CL-5CA la menor. Sin embargo, no es un hecho relevante, porque depende de la cantidad de humedad de cada muestra en el momento de la prueba DSC/TGA. El segundo pico (amplio en el diagrama de flujo de calor) a ~ 230 °C está relacionado con la presencia de montmorillonita, ya que en el rango de temperatura entre 150 y 260 °C se produce la evolución del agua ubicada entre sus capas, así como el agua de hidratación de los iones adsorbidos [17]. El pico endotérmico número 3 a 466 °C con una pérdida de peso considerable, corresponde a la liberación de iones OH<sup>-</sup> de la estructura cristalina de la caolinita, lo que hace que la caolinita se convierta en metakaolinita [17][18]. Después de eso, no se observa pérdida de peso. De hecho, 85CL-15CA parece ganar un poco de peso en el rango de 700-1000 °C. El pico 4 corresponde a la transformación polimórfica de cuarzo α a cuarzo β [19]. Finalmente, el pico exotérmico 5, a 950 °C corresponde a la formación de mullita a partir de caolinita [20], lo cual es importante porque su presencia aumenta la resistencia mecánica de los ladrillos [21].



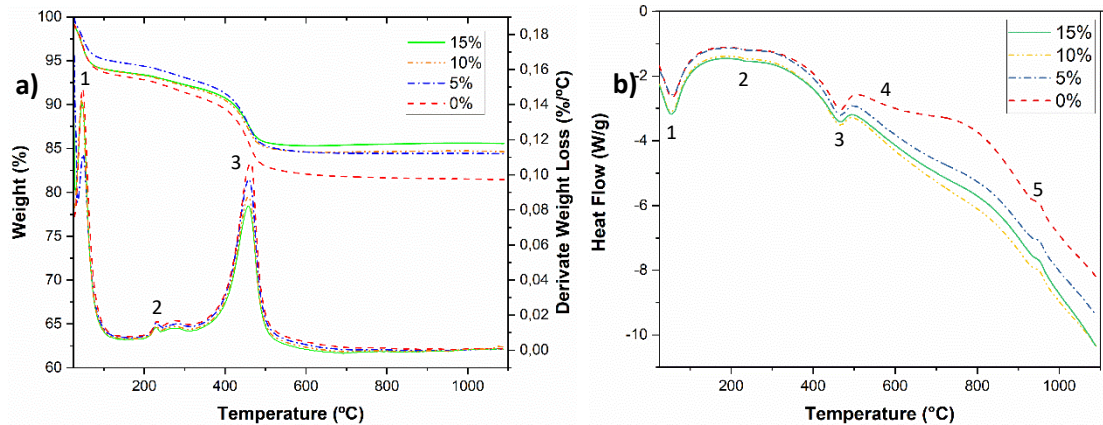


Figure 6. a) Resultados de TGA y DTGA y, b) Flujo de calor de mezclas de CL-CA calentadas de 30 a 1100 ° C

### Ladrillos sinterizados

Los ladrillos sinterizados se muestran en la (Figura 8). Evidenciando un claro cambio de tonalidad después de la cocción comparándolos con la (Figura 7). Así mismo se nota el cambio de tonalidad de los ladrillos conforme se incrementa el porcentaje de adición de calamina, tornándose más oscuros a mayor adición de calamina. Esto puede jugar un papel importante en la estética de construcciones modernas ya sea en tejas o ladrillos.



Figura 7. Ladrillos antes de cocción : De izquierda a derecha , 85CL-15CA y 90CL-10CA



Figura 8. Ladrillos después de sinterización: de izquierda a derecha 100CL-0CA, 95CL-5CA, 90CL-10CA y 85CL-15CA

En la (Figura 9) se pueden ver los patrones DRX de los ladrillos sinterizados. No hay hematita en los ladrillos 100CL-0CA, según el patrón DRX de la arcilla sin sinterización en la (Figura 3). Se observa la presencia de mullita y caolinita, de acuerdo con los resultados de DSC/TGA en la (Figura 6). Además, aparecen las fases silimanita ( $Al_2SiO_5$ ) y  $Al_4.81Si_{1.19}O_{9.59}$ . También aparecen cuarzo y cristobalita, como es habitual en ladrillos sinterizados [6] y de acuerdo con el patrón de DRX en la (Figura 9). En los ladrillos con calamina añadida, los picos correspondientes a hematita aparecen a 33,14°, 35,6°, 49,44° y 54,04°, siendo más altos a medida que se agrega más calamina. Vale la pena señalar que no hay picos correspondientes a

wüstita y magnetita, que están presentes en la calamina, de acuerdo con la (Figura 3-a). Esto significa que, a la temperatura de cocción, 1100 ° C, toda la wüstita y magnetita se oxida a hematita, debido a la atmósfera oxidante (atmósfera de aire). La cantidad de mullita parece no verse afectada por la presencia de calamina, según (Rasim Ceylantekin, et al) [22], cuando se agrega 1% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a una arcilla caolinítica y se disipa a 1000 ° C.

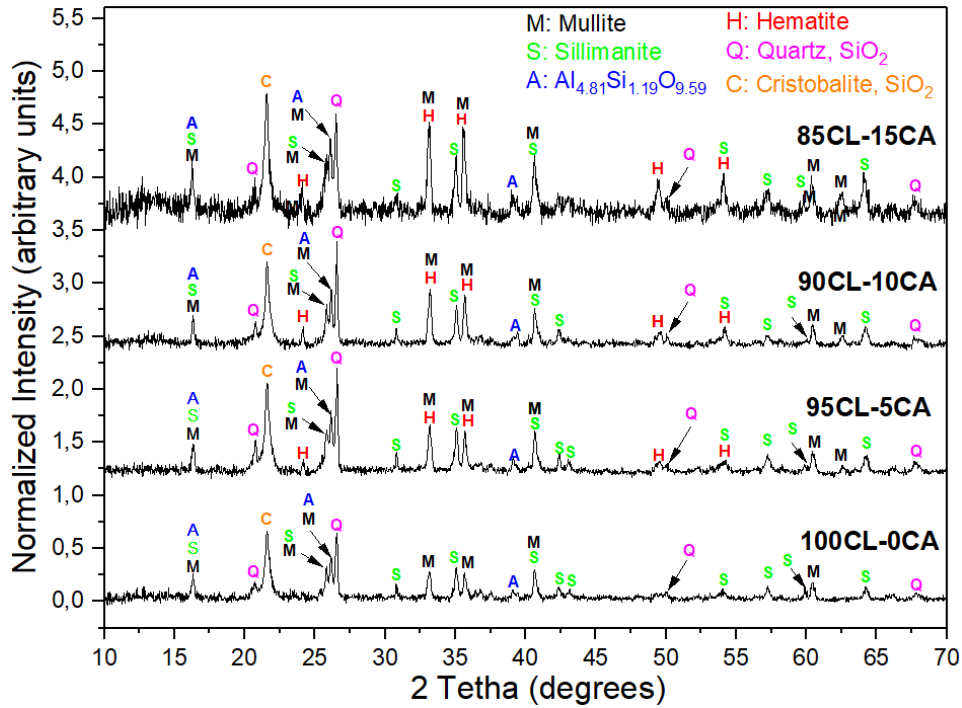


Figure 9. Patrón DRX de ladrillos sinterizados

### Porosidad y absorción

En la (Figura 10-a) se puede ver la porosidad aparente de los ladrillos cocidos. A medida que se agrega calamina a la arcilla, la porosidad aumenta de 20.5% a 27.8%. Esta porosidad está relacionada con el agua añadida para la fabricación de ladrillos.

Según la absorción de agua, todos los ladrillos cocidos cumplen con los requisitos de absorción de agua para la fabricación de ladrillos la cual debe ser menor a 15 % según la norma NTC 4205 [23].

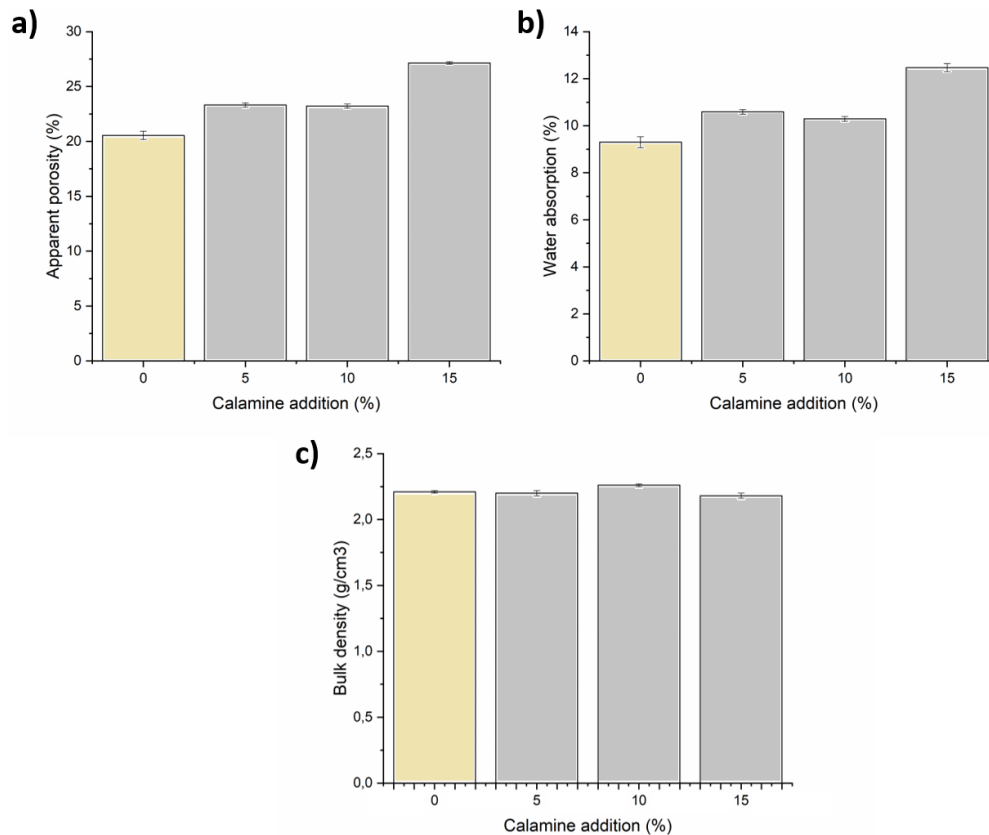


Figure 10. a) Porosidad aparente b) absorción de agua y c) densidad de los ladrillos

### Resistencia a flexión

En la figura (Figura 11) se observa el comportamiento de la resistencia mecánica al incorporar el agregado de calamina. Los valores de resistencia a la flexión están de acuerdo con Sarkar Noor-E-Khuda y Faris Albermani [24], quienes probaron ladrillos viejos y nuevos, y obtuvieron resistencia entre 2.5 y 6.5 MPa. La resistencia a la flexión de los ladrillos disminuye, de 10.8 MPa a 7.8 MPa cuando se incorpora el 5%. Entonces, la resistencia a la flexión es de 7.3 MPa, con 10% de calamina. Finalmente, la resistencia a la flexión fue de 6 MPa con 15% de calamina. Esta disminución se explica con el aumento de la porosidad. Es bien sabido que la porosidad es el defecto más importante en los materiales cerámicos, porque una mayor porosidad, menor resistencia mecánica. Sin embargo, todos los ladrillos exceden el requisito mínimo de 5 MPa de resistencia a la flexión [23]. Por lo tanto, la adición de calamina es una forma de usar un subproducto industrial, reduciendo el consumo de arcilla (que es un recurso no renovable), cumpliendo con los estándares mínimos de resistencia a la flexión y porosidad y siendo aptos para construcción.

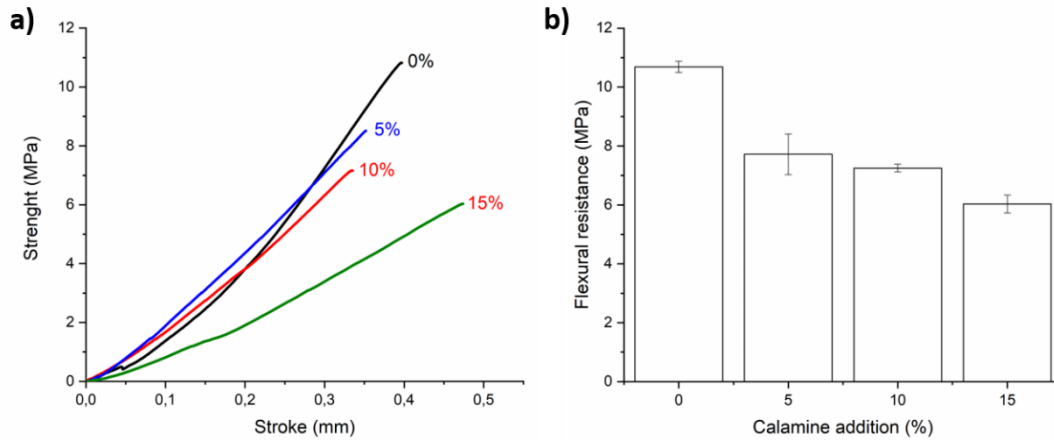


Figure 11. Resistencia a la flexión de los ladrillos a) curvas de fuerza y, b) resistencia a la flexión (MOR = módulo de ruptura)

## Conclusiones

Los hallazgos claves del uso de calamina tratada por molienda en la fabricación de ladrillos es la siguiente:

Observamos que el comportamiento de la arcilla no sufre cambios abruptos con la adición de calamina en diferentes proporciones y es estable en los rangos de temperatura trabajados para la sinterización de los ladrillos 50°C- 1050°C: no se transforma, y no reacciona químicamente, es una adicción estable. Esto se evidencia en los resultados TGA, los cuales no presenta picos diferenciales comparados con la adicción 0% de calamina. Además, los patrones de DRX mostraron las mismas fases en todos los casos a excepción de la hematita, la cual aparece por la adicción de calamina. La hematita aparece porque la calamina se oxida la sinterización a 1100°C por oxidación de la wüstita y la magnetita a hematita-. Así mismo la fase característica a la cual se le atribuyen las propiedades de la arcilla, la mullita, no se vio afectada por la presencia de calamina. Se obtuvo una disminución en el índice de plasticidad, como se observa en los límites de Atterberg: a mayor porcentaje de calamina, que actúa como desgrasante. Así mismo luego de la adicción de calamina se obtuvo una disminución en la resistencia mecánica a flexión esto debido a que la porosidad aumentó conforme la adicción de calamina fue mayor.

Siendo la molienda un método óptimo mediante el cual se puede reintegrar al proceso productivo la calamina que hoy en día es un subproducto que no es de valor para las compañías (Desecho) en la fabricación de mampostería por medio de agregado cumpliendo a cabalidad cada uno de los requerimientos mínimos para ser apto como material para la construcción. Los ladrillos con adicción de calamina para todos los casos cumplen con los requisitos de la norma NTC 4205 para ser un material de construcción en aplicaciones estructurales

## Referencias

---

- [1] Adriana Esguerra, Oscar Vanegas, Modesto Fajardo, William Barona, Héctor Sánchez. Evaluación de la reducibilidad de la calamina proveniente de una siderúrgica de la región, por reducción con monóxido de carbono. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* 2009; S1 (3): 1289-1294
- [2] Zhang, L. (2013). Production of bricks from waste materials - A review. *Construction and Building Materials*, 47, 643-655. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.043>
- [3] Wouter, P. Energy Performance of Building: Assessment of Innovative Technologies. ENPER-TEBUC, Brussels, Belgium. Final Report. (2004)
- [4] EN 832. Thermal Performance of Buildings. In: Calculation of Energy Use for Heating. Residential Buildings, CEN, Brussels, Belgium. (1998)
- [5] C.M.F. Vieira, R. Sánchez, S.N. Monteiro. Characteristics of clays and properties of building ceramics in the state of Rio de Janeiro, Brazil. *Construction and Building Materials* 22 (2008) 781-787.
- [6] Esperanza Carazo, Ana Borrego-Sánchez, Rita Sánchez-Espejo, Fátima García-Villén, Pilar Cerezo, Carola Aguzzi, César Viseras. Kinetic and thermodynamic assessment on isoniazid/montmorillonite adsorption. *Applied Clay Science* 165 (2018) 82-90
- [7] Ptáček P, Frajkorová F, Šoukal F, Opravil T. Kinetics and mechanism of three stages of thermal transformation of kaolinite to metakaolinite. *Powder Technology* 264 (2014) 439-45
- [8] H. Slimanou, D. Eliche-Quesada, S. Kherbache, N. Bouzidi, A./K. Tahakourt. Harbor Dredged Sediment as raw material in fired clay brick production: Characterization and properties. *Journal of Building Engineering* 28 (2020) 101085.
- [9] Mohammed Rashad, M. Balasubramanian. Characteristics of porous mullite developed from clay and  $AlF_3 \cdot 3H_2O$ . *Journal of the European Ceramic Society* 38 (2018) 3673-3680
- [10] Abdel Monem Mohamed Soltan, Katharina Pöhler, Florian Fuchs, Fawzia Abd EL-Raouf, Baher Abdel-Hamid El-Kaliouby, Andreas Koenig, Herbert Pöllmann. Clay-bricks from recycled rock tailings. *Ceramics International* 42 (2016) 16685-16696.
- [11] Rasim Ceylantekina, Reyhan Başar. Solid solution limit of  $Fe_2O_3$  in mullite crystals, produced from kaolin by solid state reactions. *Ceramics International* 44 (2018) 7599-7604
- [12] José Darío Santos Amado, Pedro Yesid Malagón Villafrades, Elcy María Córdoba Tuta. Characterization of clays and preparation of ceramic pastes for the manufacture of roofing tiles and bricks in the region of Barichara, Santander. *DYNA* 78 (167) (2011) 1-12
- [13] B. De Rosa, G. Cultrone. Assessment of two clayey materials from northwest Sardinia (Alghero district, Italy) with a view to their extraction and use in traditional brick production. *Applied Clay Science* 88-89 (2014) 100-111.

---

[14] Yudi E. Ramírez Calderón, Carlos A. Nieto Rangel, Jorge Llop Pla, Ester Barrachina Albert, Jesús S. Valencia Rios, Juan B. Carda Castelló. Development of ceramic porcelain stoneware pastes by the revalorization of Colombian clays subjected to bleaching process. *Applied Clay Science* 178 (2019)

[15] O.A. Zambrano, J.J. Coronado, S.A. Rodríguez. Mechanical properties and phases determination of low carbon steel oxide scales formed at 1200 °C in air. *Surface & Coatings Technology* 282 (2015) 155–162

[16] C.M.F. Vieira, R. Sánchez, S.N. Monteiro. Characteristics of clays and properties of building ceramics in the state of Rio de Janeiro, Brazil. *Construction and Building Materials* 22 (2008) 781–787

[17] Esperanza Carazo, Ana Borrego-Sánchez, Rita Sánchez-Espejo, Fátima García-Villén, Pilar Cerezo, Carola Aguzzi, César Viseras. Kinetic and thermodynamic assessment on isoniazid/montmorillonite adsorption. *Applied Clay Science* 165 (2018) 82-90

[18] Ptáček P, Frajkorová F, Šoukal F, Opravil T. Kinetics and mechanism of three stages of thermal transformation of kaolinite to metakaolinite. *Powder Technology* 264 (2014) 439–45

[19] Kohobhange SP Karunadasa, CH Manoratne, HMTGA Pitawala, RMG Rajapakse. The composition, unit cell parameters and microstructure of quartz during phase transformation from  $\alpha$  to  $\beta$  as examined by in-situ high-temperature X-ray powder diffraction. Volume 117, June 2018

[20] Mohammed Rashad, M. Balasubramanian. Characteristics of porous mullite developed from clay and  $AlF_3 \cdot 3H_2O$ . *Journal of the European Ceramic Society* 38 (2018) 3673–3680

[21] Abdel Monem Mohamed Soltan, Katharina Pöhler, Florian Fuchs, Fawzia Abd EL-Raouf, Baher Abdel-Hamid El-Kaliouby, Andreas Koenig, Herbert Pöllmann. Clay-bricks from recycled rock tailings. *Ceramics International* 42 (2016) 16685–16696

[22] Rasim Ceylantekina, Reyhan Başar. Solid solution limit of  $Fe_2O_3$  in mullite crystals, produced from kaolin by solid state reactions. *Ceramics International* 44 (2018) 7599-7604.

[23] José Darío Santos Amado, Pedro Yesid Malagón Villafrades, Elcy María Córdoba Tuta. Characterization of clays and preparation of ceramic pastes for the manufacture of roofing tiles and bricks in the region of Barichara, Santander. *DYNA* 78 (167) (2011) 1-12

[24] Sarkar Noor-E-Khuda, Faris Albermani. Mechanical properties of clay masonry units: Destructive and ultrasonic testing. *Construction and Building Materials* 219 (2019) 111-12