

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

Evaluación del desempeño térmico de ladrillos ecoamigables con incorporación de residuos de mullita

Evaluation of the thermal performance of eco-friendly bricks fabricated with incorporation of mullite residues

MÓNICA A. VILLAQUIRÁN-CAICEDO *

ERICK HERNÁNDEZ-RENGIFO **

KEVIN AGUDELO ***

JONATAN ARIAS ****

MARÍA C. VIERA *****

DAVID CARVAJAL *****

*Doctora en Ingeniería Énfasis Ingeniería de Materiales, Docente Escuela de Ingeniería de Materiales. Grupo Materiales Compuestos (GMC). Universidad del Valle, Calle 13 # 100-00, Cali-Colombia. monica.villaquiran@correounivalle.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5145-0472>

**Magister en Ingeniería Mecánica, Asistente de Docencia. Universidad del Valle Calle 13 # 100-00, Cali-Colombia. erick.hernandez@correounivalle.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8175-1110>

*** Ingeniero de Materiales. Universidad del Valle. Calle 13 # 100-00, Cali-Colombia. kevin.agudelo@correounivalle.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2181-3516>

**** Ingeniero de Materiales. Universidad del Valle. Calle 13 # 100-00, Cali-Colombia. jonatan.arias@correounivalle.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4354-4414>

***** Ingeniero de Materiales. Universidad del Valle. Calle 13 # 100-00, Cali-Colombia. viera.maria@correounivalle.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5000-8236>

***** Ingeniero de Materiales. Universidad del Valle. Calle 13 # 100-00, Cali-Colombia. david.carvajal@correounivalle.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3440-229X>



Resumen

Se produjeron ladrillos de arcilla obtenidos con mezcla de arcilla con residuos de un horno eléctrico en desuso y reforzados con fibras cerámicas para la obtención de un material cerámico con características refractarias. Las mezclas de arcilla/partículas recicladas fueron 50:50 en peso, y la incorporación de fibra fue en un 10 y un 20 % en volumen, para obtener un cerámico por sinterización a 1.000 °C durante 2 h. Los materiales diseñados fueron caracterizados por difracción de rayos X, se determinó la resistencia a compresión, flexión, densidad, porosidad y absorción. También se comprobó su desempeño térmico por exposición directa a llama 1.000 °C. Los resultados mostraron que en la medida en que se incorpora fibra cerámica la resistencia a compresión disminuyó un 17,3 % para AF10 y un 17,0 % para AF20. Los valores de resistencia a flexión estuvieron en 3,4 MPa. El coeficiente de conductividad térmica fue de 0,5322 W/mK, y durante la exposición directa a la llama, las muestras lograron un gradiente térmico de ~700 °C para muestras de 2 cm de espesor. Las fases mineralógicas obtenidas para los ladrillos fueron mullita, corindón y cordierita, las cuales se consideran refractarias.

Palabras clave: arcilla, exposición a llama directa, fibra cerámica, ladrillo ecológico, reciclaje, refractarios.

Abstract

The aim of this research was the production of clay-brick, from red clay, waste from a disused electric furnace, reinforced with ceramic fibers, to obtain a ceramic material with refractory characteristics. The clay/waste particle proportion was 50:50 by weight, and the incorporation of fiber was 10% and 20% by volume, to obtain a ceramic by sintering at 1000°C, for 2 hours. The designed materials were characterized by X-ray diffraction, the flexural and compressive strength, density, porosity, and absorption were determined. The thermal performance was also verified by direct exposure to 1000°C flame. The results showed that as ceramic fiber was incorporated, the compressive strength decreased by 17.3% for AF10 and 17.0% for AF20. The flexural strength values were at 3.4 MPa. The coefficient of thermal conductivity was 0.5322 W/m.K, and, during direct flame exposure, the samples achieved a thermal gradient of ~ 700 °C for samples 2 cm thick. The mineralogical phases obtained for the bricks were mullite, corundum, and cordierite, which are considered refractory.

Keywords: ceramic fibre, clay, direct flame exposure, eco-friendly bricks, recycling, refractory.

1. INTRODUCCIÓN

Las arcillas constituyen la principal materia prima para la fabricación de elementos de construcción como ladrillos, bloques y tejas, los cuales poseen adecuadas propiedades mecánicas, buena durabilidad química y buen desempeño térmico [1]. En general, las características de estos elementos dependen de diferentes factores como materias primas (composición química y mineralógica), proceso de manufactura y temperatura a la cual se realiza la cocción. Por ejemplo, las arcillas con alto contenido de caolinita van a permitir obtener productos cerámicos con carácter refractario, coloración clara y buena resistencia mecánica, mientras que altos contenidos de illita y montmorillonita confieren alta plasticidad a las pastas cerámicas, lo que se traduce en un fácil conformado de las piezas, pero también en una gran contracción de estas durante el secado y la sinterización, lo cual puede llevar a la formación de grietas. En tales casos, se debe agregar material desgrasante (arena) para ajustar la plasticidad de la pasta [2].

Para desarrollar una adecuada unión a baja temperatura durante el proceso de conformado, los residuos inorgánicos han sido empleados como agentes fluidizantes [3]. Aditivos como carbonato de calcio virgen o procedente de residuos como mármol, cenizas volantes, perlita y vermiculita se han empleado alrededor del mundo para mejorar las propiedades del producto cocido [3]. Las propiedades mecánicas de los ladrillos de arcilla quemada se pueden mejorar utilizando cenizas volantes en piezas de ladrillos [4]. De manera similar, los desechos agrícolas (ceniza de cáscara de arroz y ceniza de bagazo de caña de azúcar) pueden utilizarse en la producción de ladrillos porosos de peso ligero [5]. Así es como el uso de diferentes residuos para la manufactura de piezas cerámicas es prometedor para conservar los depósitos de arcilla natural y gestionar los desechos indeseables [6], [7].

Además, cerámicas densas basadas en alúmina y mullita se usan ampliamente para aplicaciones estructurales como sistemas de blindaje, aplicaciones de resistencia al desgaste y algunos otros campos en que hay situaciones de tensiones mecánicas graves, a menudo junto con acciones corrosivas y térmicas. Las cerámicas porosas a base de sílice y alúmina son ampliamente utilizadas en aplicaciones como refractarios en calderas industriales, tienen la ventaja de bajo costo y además presentan buen desempeño en ambientes ácidos [8]. La mullita no solo tiene buenas propiedades a altas temperaturas, sino también una excelente capacidad de aislamiento eléctrico, lo que la hace potencialmente útil en aplicaciones que van desde refractarios para hornos hasta sustratos electrónicos. Se sabe que la mullita y el corindón tienen una excelente estabilidad térmica y un alto nivel de propiedades mecánicas. [9], [10] encontraron que diferentes composiciones de minerales (arcilla de caolín, arcilla roja, marga, arena de sílice, perlita, etc.) permite obtener una buena calidad del refractario entre 1400 y 1600 °C. [11], [12] produjeron cerámicos refractarios a

partir de arcilla caolinita y reutilización de residuos ricos en mullita, los cuales presentan buen desempeño termomecánico a temperaturas superiores a 1.000 °C. [13] evaluaron la reutilización de residuos de chamota mezclados con arcilla, alúmina y caolín para la obtención de refractarios y obtuvieron refractarios de alta porosidad. Las calderas industriales pueden manejar altas temperaturas y presiones, por lo cual requieren un recubrimiento tipo refractario, con características de elevado punto de fusión, alta capacidad para almacenar calor, capacidad aislante y buena resistencia físico-química [14], y en la actualidad se utilizan diferentes materiales refractarios provenientes de arcillas.

El objetivo de esta investigación fue la producción de piezas cerámicas a base de arcilla, mezcladas con residuos de un horno eléctrico en desuso y reforzadas con fibras cerámicas para producir un material cerámico con características refractarias, el cual fue sinterización a temperatura máxima de 1.000 °C. Los materiales diseñados fueron caracterizados por difracción de rayos X para conocer las fases mineralógicas obtenidas, se determinaron las propiedades mecánicas a compresión y flexión. Se encontraron las características físicas como densidad, porosidad y absorción, y también se comprobó su desempeño térmico por exposición directa a llama 1.000 °C.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Materias primas

Como materia prima fue empleada arcilla roja de la región del Valle del Cauca, muy utilizada para la fabricación de ladrillos artesanales e industriales. La arcilla fue tamizada y el material utilizado fue aquel que pasó el tamiz N.º 16. Para mejorar las propiedades mecánicas de los materiales, se utilizaron partículas refractarias recicladas, provenientes de un horno en desuso. Para la obtención de las partículas (RP), los pedazos del horno en desuso fueron acondicionados mecánicamente hasta obtener un tamaño promedio de partícula de 82,0 μm . Y para controlar el agrietamiento en ciclos de temperatura, se emplearon fibras cerámicas Cerachem (compuestas de alúmina-sílice-zircón) como material de refuerzo (AF). El diámetro promedio de las fibras (Thermal Ceramics) es de 2,2 μm , con longitud promedio de 12 mm.

Fabricación de especímenes

Para la fabricación de los especímenes compuestos de arcilla, RP y AF, se mezcló el 50 % de arcilla y el 50 % en peso de RP. La fibra AF fue incorporada en porcentajes del 0, el 10 y el 20 en volumen, cuyas mezclas serán identificadas AF0, AF10 y AF20, respectivamente. La relación líquido-sólido para lograr adecuada trabajabilidad previa a la cocción de las muestras fue de 0,24. Las dimensiones de los especímenes fue de

8 cm × 4 cm × 2 cm. Las materias primas fueron mezcladas en una mezcladora Hobart® durante 4 min. Una vez cumplido este tiempo, la mezcla fue vaciada en los moldes, se cubrieron con una película plástica y se dejaron 24 h al aire. Posteriormente, se empezó con el ciclo térmico en un horno eléctrico marca Terrigeno serie 2094. Terminado el reposo de 24 h, se llevó a cabo el proceso de secado en horno eléctrico por un tiempo de 2 h a temperaturas de 100 °C y 120 °C. Una vez secados, se efectuó el proceso de cocción hasta 1.000 °C con sostenimiento a 320 °C de 1 h, a 600 °C de 0,5 h y a 1.000 °C de 3 h. El proceso de producción de los ladrillos es mostrado en la figura 1A y la curva de cocción empleada en la figura 1B.

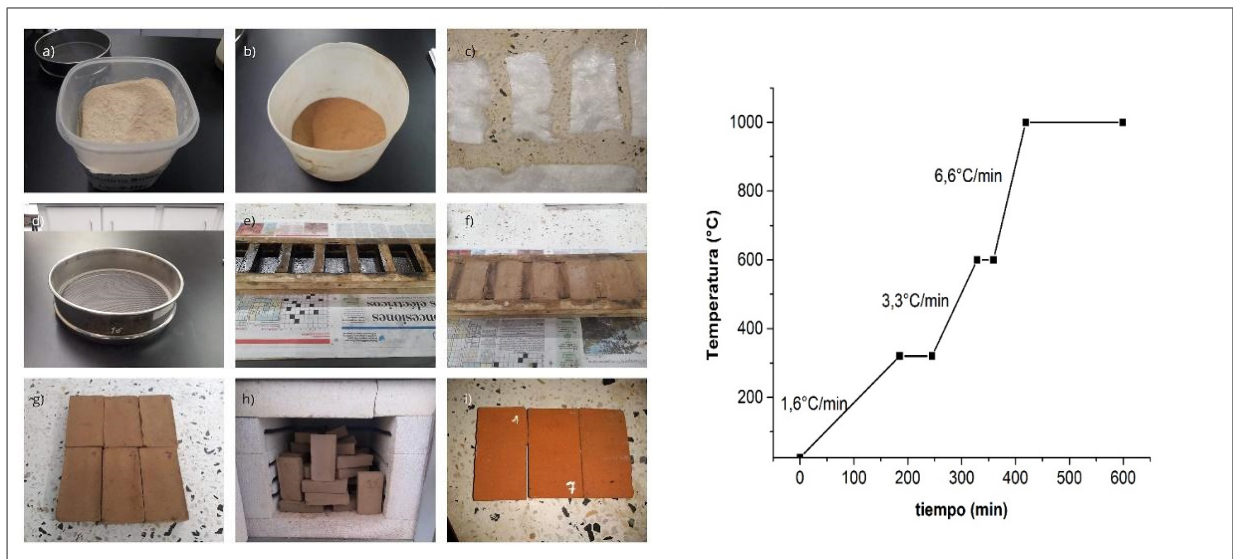


FIGURA 1. A: PRODUCCIÓN DE COMPUESTO REFRACTARIO. B: CURVA DE COCCIÓN

Ensayos de caracterización

Los siguientes ensayos fueron empleados para caracterizar los materiales desarrollados:

- Para la determinación de la composición química de la arcilla, se utilizó un espectrómetro de fluorescencia de rayos X (FRX), secuencial por longitud de onda dispersiva (WDXRF) marca Panalytical modelo Axios MAX, equipado con un tubo de rodio con una potencia máxima de 4,0 kW, *software* SuperQ versión 5.0L - Estándares de la base de datos OMNIAN, para análisis semicuantitativo y la detección de elementos desde el sodio (Na) hasta el uranio (U). MagixPro PW-2440 equipado con un tubo de rodio, con una potencia máxima de 4 kW. Este

equipo tiene una sensibilidad de 200 ppm (0,02 %) en la detección de elementos pesados metálicos. La muestra en polvo fue previamente secada a 105 °C para posteriormente ser mezclada con cera Merck para análisis de fluorescencia de rayos X en relación 10:1 (10 g de muestra y 1 g de cera), la cual una vez homogeneizada fue llevada a una prensa hidráulica a 196 kN que generó una pastilla de 40 mm. El análisis de la muestra se realizó en un tiempo de 20 min.

- La determinación de resistencia a la compresión y flexión fue realizada en probetas de 8 cm × 4 cm × 2 cm, a una velocidad de ensayo de 1 mm/min. Estos ensayos fueron realizados en la máquina universal de ensayos marca Tinius Olsen. Los resultados mostrados corresponden al promedio de tres especímenes.
- La densidad, la absorción y la porosidad del ladrillo se determinaron según el procedimiento descrito en la norma NTC 674. El procedimiento gravimétrico con el cual se calculan las propiedades incluye peso seco, peso saturado en agua, peso sumergido en agua y peso hidrostático o suspendido en agua.
- El análisis de difracción de rayos X (DRX) fue realizado en un goniómetro de amplio ángulo RINT2000, usando la señal K α 1 del Cu a 45 kV y 40 mA. Se usó un paso de 0,02° dentro de un rango de 10°-70° a una velocidad de 5°/min.
- La superficie de las fibras, las partículas de refuerzo y los materiales compuestos producidos fueron observados usando un microscopio electrónico JEOL JSM-6490LV. Para poder realizar la observación, los materiales fueron previamente con oro, y las observaciones se realizaron en modo vacío.
- Para encontrar la conductividad térmica del material compuesto, se empleó un equipo tipo Thermal Constant Analyzer TPS 500. El ensayo se llevó a cabo utilizando un sensor de tipo C5465, el cual fue puesto en medio de dos especímenes del material a analizar. El ensayo se realizó en un tiempo de 40 s y una potencia de 550 mW.
- Prueba de exposición directa al fuego. Este ensayo fue realizado colocando directamente los especímenes en soplete con gas propano Map/Pro. Las muestras eran ubicadas a 5 cm de la punta del soplete, durante un tiempo de 25 min. Se utilizaron sensores térmicos para medir las temperaturas en la cara frontal y posterior. Con este ensayo, y previamente determinada la conductividad térmica de las muestras, se pudo determinar el flujo de calor (Q) soportado por los especímenes de acuerdo con la ecuación 9.

$$\dot{Q} = KA \frac{\Delta T}{E} \quad (9)$$

Donde:

K : es la conductividad térmica del material (W/mK)

A : el área expuesta, en este caso $2 \text{ cm}^2 = 0,0002 \text{ m}^2$

ΔT : es la diferencia de temperaturas entre la cara frontal y posterior

E : es el espesor de los especímenes, $2 \text{ cm} = 0,02 \text{ m}$

Resultados y discusión

Características y propiedades de la materia prima

La composición química y densidad de las materias primas arcilla, partículas y fibras es mostrada en la tabla 1. Se puede observar que el contenido de sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3) en la arcilla es del 75,54 %, y de acuerdo con [15], arcillas con contenidos de SiO_2 entre 50 y 60 % y Al_2O_3 entre 10 y 20 % se consideran adecuadas para la fabricación de ladrillos. Una cantidad significativa de **óxido férrico** (Fe_2O_3) (8,29 %) fue encontrada en la arcilla, y un bajo contenido de CaO (2,13 %), el cual por su bajo contenido podría favorecer las propiedades refractarias de la arcilla [1].

Para las partículas de refuerzo RP y las fibras AF, los contenidos de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ fueron del 94,62 y del 84,90 %, respectivamente. Los contenidos de Al_2O_3 en RP y en AF son mayores del 30 %, con lo cual se esperan altos contenidos de mullita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) y alta refractariedad en los ladrillos producidos [1]. Los resultados de composición química mostraron que los minoritarios componentes como MgO , Fe_2O_3 , TiO_2 y CaO se encuentran en las partículas recicladas RP y en las fibras AF.

La superficie de las partículas y de las fibras pudo ser observada por medio de microscopía electrónica de barrido (MEB) cuyas imágenes son mostradas en la figura 2. En las MEB, puede apreciarse que las partículas RP son de morfología irregular, debido al proceso mecánico de conminución, además, fue posible observar pequeñas porosidades en la superficie de estas, las cuales son enmarcadas en los círculos blancos de la figura 2A. Para el caso de las fibras, puede distinguirse una superficie lisa.

TABLA 1. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE MATERIAS PRIMAS

		Arcilla	RP	AF
Composición química	SiO ₂	54,37	57,99	50,00
	Al ₂ O ₃	21,17	36,62	34,90
	TiO ₂	—	2,03	0,04
	Fe ₂ O ₃	8,29	1,52	0,05
	Na ₂ O	1,42	—	—
	K ₂ O	1,33	—	—
	MgO	2,70	0,51	0,07
	CaO	2,13	1,32	0,08
		P.F. (950 °C)	1,09	—
Densidad	(kg/m ³)	2.500	2.863	2.650

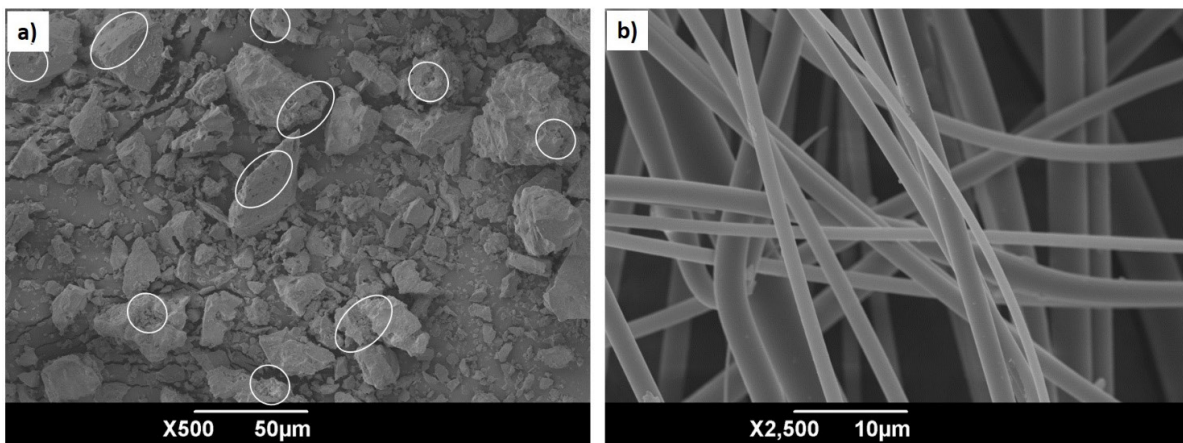


FIGURA 2. MICROSCOPIAS ELECTRÓNICAS DE LAS MATERIAS PRIMAS: (a) RP Y (b) AF

Propiedades y características de los ladrillos cerámicos

Desempeño mecánico y microestructura

La figura 3 muestra los resultados de resistencia a compresión y flexión de las muestras AFO, AF10 y AF20. Se encontró que en la medida que se incorpora fibra la resistencia a compresión disminuye un 17,3 % para AF10 y un 17 % para AF20. Sin embargo, la NTC 4205 [16] exige un mínimo de 5 MPa a compresión para ladrillos de arcilla cocida en el caso de ladrillos tipo PH de mampostería estructural. En cuanto a la resistencia a la flexión, la variabilidad es mínima y estuvo entre $3,30 \pm 0,086$ MPa y $3,38 \pm 0,48$ MPa, siendo comparables a las de ladrillos refractarios de semisílice y medianamente refractarios categorizados en la norma NTC 773 [17], la cual pide un mínimo de 2,07 MPa. [2] obtuvieron módulos de ruptura para ladrillos exclusivos de arcilla entre 4 y 8 MPa. [1] mezclaron arcillas con residuos de vidrio para fabricar ladrillos y encontraron resistencias a compresión entre ~9 MPa y 12,5 MPa. [18] incorporando residuos de perlita obtuvieron ladrillos con resistencias entre ~5,2 MPa para un 0 % de perlita y 2,0 MPa para un 50 % de perlita. En ladrillos con incorporación de mullita reciclada [9], han reportado resistencias a flexión de ~10,5 MPa para ladrillos prensados y cocidos a 1200 °C. Los bajos resultados en la resistencia a flexión reportados para los compuestos con fibras podrían atribuirse a la corta longitud de las AF, las cuales no generaron un reforzamiento mecánico efectivo y, además, la presencia de microagrietamiento, el cual pudo ser evidenciado en las MEB de la figura 4. Además, la fragilidad de las fibras y quizá falta de homogeneidad no contribuyen a un reforzamiento desde el punto de vista mecánico [19].

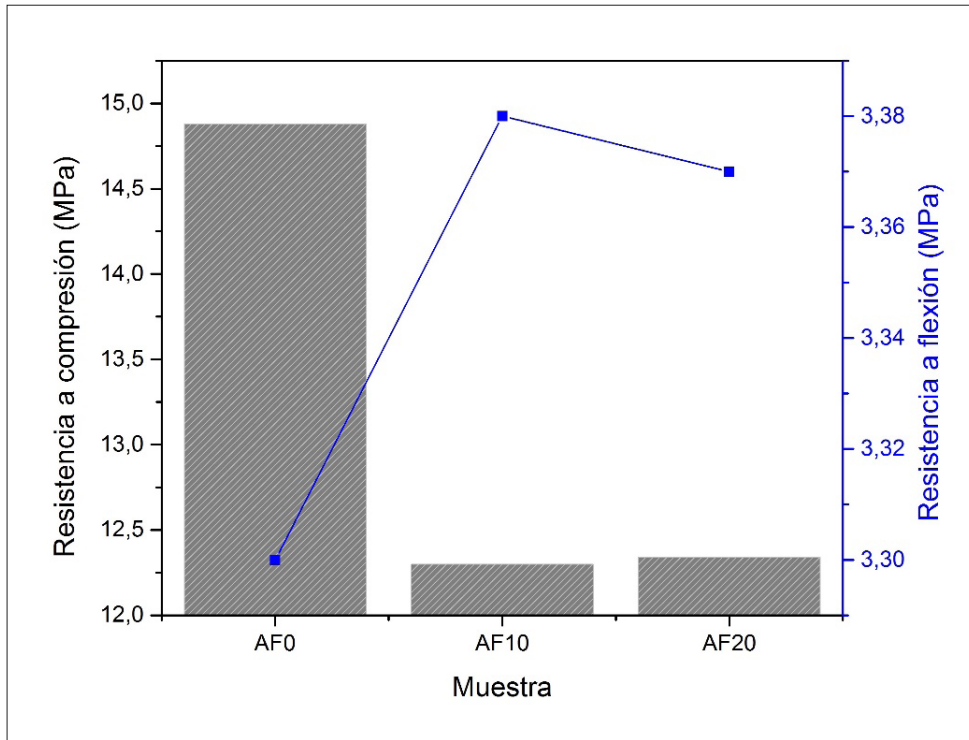


FIGURA 3. RESULTADOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y FLEXIÓN

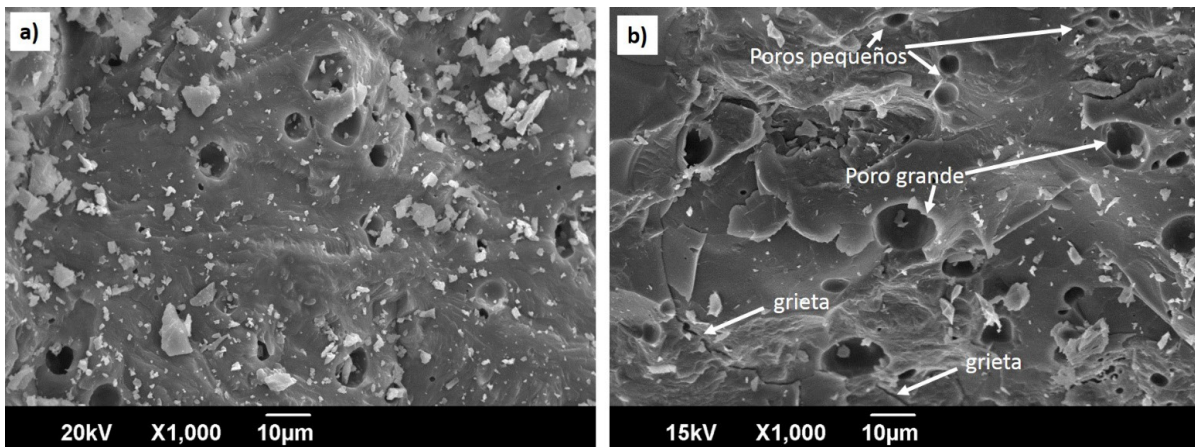


FIGURA 4. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA PARA LAS MUESTRAS A) AF0 Y B) AF20

Caracterización de fases mineralógicas

La figura 5 muestra los resultados de los espectros de rayos de la arcilla, partículas recicladas y el producto AF20. La arcilla empleada como materia prima presenta fases cristalinas principales como kaolinita (Inorganic Crystal Structures Database, ICSD # 063315), montmorillonite (ICSD # 51636), cuarzo (Pattern Diffraction File, PDF #33-1161), plagioclasa (ICSD # 87656) e illita (ICSD # 34921), las cuales están de acuerdo con la composición química reportada en la tabla 1. Las partículas recicladas RP presentan fases como mullita (PDF #15-776), cristobalita (ICSD # 047221) y pequeñas impurezas de anatasa (ICSD # 202242). Para fortalecer la refractariedad en los ladrillos, se espera que el cerámico producido por cocción tenga un alto contenido de mullita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), en atención a que esta fase le concede las mejores propiedades de resistencia mecánica a refractarios tipo síliceos aluminosos [20]. El proceso de cocción de los ladrillos a 1.000 °C generó una reorganización estructural, los procesos de sinterización de partículas fueron favorecidos y los picos atribuidos a mullita aumentaron su intensidad, lo cual corrobora los resultados encontrados por [21] en que fases como cuarzo y mullita fueron los principales componentes de los ladrillos. Nuevas fases cristalinas fueron formadas en AF20 como cordierita (ICSD #100487) y corindón (ICSD #009545). Algunas fases permanecieron estables en AF20 como cuarzo y cristobalita.

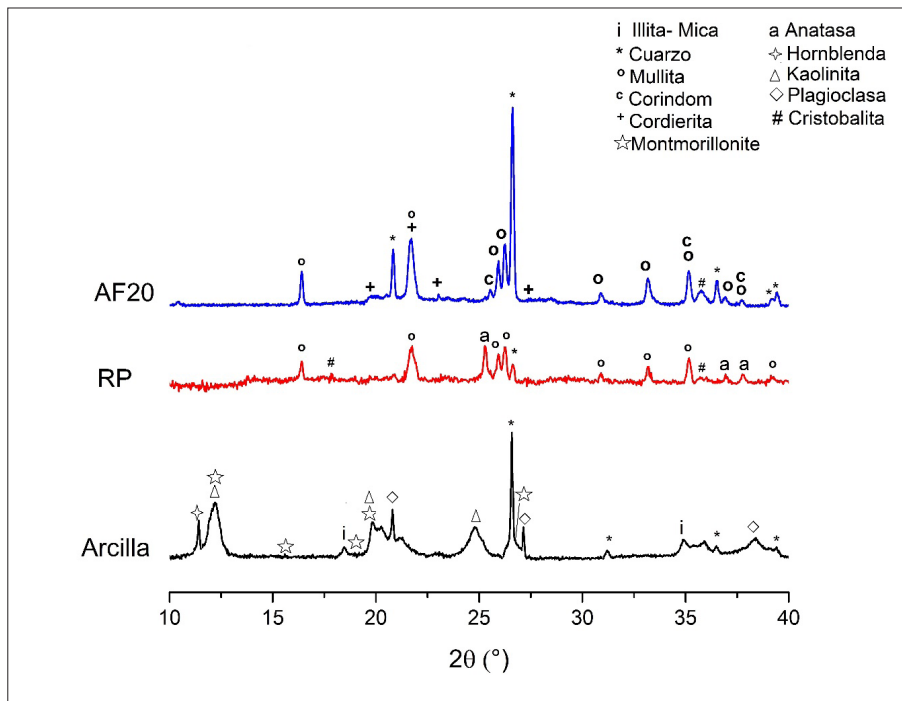


FIGURA 5. DIFRACTOGRAMA DE RAYOS X PARA ARCILLA, PARTÍCULAS RP Y MUESTRA DE LADRILLO AF20

Propiedades físicas y térmicas

Los resultados de densidad, absorción y porosidad, acorde con la norma ASTM C20 [22], se muestran en la tabla 2. Se encontró que la incorporación de fibras AF no afecta significativamente las propiedades físicas de las muestras. Sin embargo, de acuerdo con la NTC 4205 para los ladrillos estructurales de arcilla cocida [16], el máximo porcentaje de absorción en ladrillos no debe superar el 17 %, mientras que la norma NTC 744 permite un máximo de absorción del 30 % para los ladrillos refractarios de semisílice [23]; y en esta investigación, los valores estuvieron entre el 18,1 y el 19,3 %. Autores como [2] han encontrado menores valores de absorción utilizando exclusivamente arcilla. [9] obtuvo valores de porosidad para ladrillos con mullita entre el 11,8 y el 16,5 % para los ladrillos cocidos a 1.200 °C. Si es sabido que el incremento en porosidad está relacionado con la evaporación de agua, carbonatos y descomposición de compuestos orgánicos [24], se confirma que la relación líquido-sólido empleada para garantizar una buena trabajabilidad de la mezcla compuesta, el proceso de mezclado para obtención de los ladrillos y la porosidad intrínseca de las partículas recicladas influyen los resultados de las propiedades físicas y hacen que en el momento del tratamiento térmico de cocción el agua adsorbida y estructural sean liberadas y causen microgrietas (como fue visto en las imágenes de MEB de la materia prima [figura 3]) y porosidades, las cuales aumentan la absorción en los ladrillos. Los valores de densidad son similares a los encontrados por [2] con arcillas del departamento de Santander (Colombia). [9] obtuvieron densidades de entre 1,88 g/cm³ y 1,93 g/cm³ con incorporación de mullita reciclada. [1] utilizando mezclas de arcilla y vidrio encontraron densidades entre 1,32 g/cm³ y 1,37 g/cm³, valores menores de los reportados debido al contenido de vidrio, con porosidades aparentes del ~38 %, valores un poco mayores de los reportados. [21] evaluaron diferentes arcillas y obtuvieron porosidades aparentes del ~33 %. [25] encontraron densidades entre 1,6 g/cm³ y 1,4 g/cm³ con residuos de pulpa. [13] reportaron densidades entre 1,9 y 2,2 g/cm³ para refractarios de caolín-arcilla-chamota-alúmina y porosidades entre el 1,0 y el 35 %. En general, se encontró que la utilización del 20 % de AF genera una ligera disminución de la densidad y un aumento de la porosidad en los ladrillos en un 2,82 %; estos datos de porosidad y la aparición de microgrietas en AF20 (como se vio en los resultados de MEB) debilitan el ladrillo y producen la caída en la resistencia a compresión y flexión (figura 3). La muestra AF20 presentó dificultad a la hora de compactación de los ladrillos, lo cual pudo generar falta de adherencia entre la fibra y pasta de arcilla, lo que a su vez en el momento de sinterización impidió que la muestra alcanzara una alta compacidad.

TABLA 2. DENSIDAD, ABSORCIÓN Y POROSIDAD DE LA PIEZA REFRACTARIA

Muestra	AFO	AF10	AF20
Densidad (g/cm ³)	1,83 ± 0,02	1,83 ± 0,01	1,80 ± 0,02
Porosidad aparente (%)	33,95 ± 1,06	33,25 ± 0,38	34,91 ± 0,09
Absorción de agua (%)	18,60 ± 0,74	18,14 ± 0,32	19,35 ± 0,21

Los resultados de la determinación de propiedades térmicas como conductividad térmica, calor específico y difusividad térmica son mostrados en la tabla 3. La utilización del 20 % de AF disminuyó la densidad en solo el 1,63 % y la porosidad aumentó el 2,82 % con respecto al ladrillo sin refuerzo de fibras AFO. Estas diferencias tan pequeñas no afectaron significativamente los valores de conductividad térmica, la cual depende en gran medida de la porosidad del material [24]. En esta investigación, la conductividad térmica disminuyó tan solo un 0,56 % (AF20) y un 0,24 % (AF10) con respecto al ladrillo sin fibra AFO. La conductividad térmica de los ladrillos comunes puede variar entre 0,39 y 0,67 W/m °C [26]. Los resultados obtenidos son similares a los reportados por otros investigadores como [1] que obtuvieron conductividades entre 0,54 y 0,58 W/mK para ladrillos producidos con arcilla y residuos de vidrios, [27] alcanzaron conductividades entre 0,4 y 0,54 W/mK en ladrillos ecológicos producidos con incorporación de lodos de mármol y [25] tuvieron conductividades de 0,7 W/mK para ladrillos netamente de arcillas. Otros autores como [21] y [18] han logrado obtener ladrillos de arcilla con menores conductividades: 0,25 W/mK por la incorporación de lodos papeleros y de 0,12-0,35 kcal/mh°C perlita. El valor de difusividad térmica para AF20 es menor de la muestra de referencia AFO, lo cual indica que el calor se propaga un 21,30 % más lento debido a la incorporación de fibras, que proporciona una mayor capacidad de aislamiento. Finalmente, es posible encontrar en la literatura que factores como tipo de porosidad (abierta o cerrada), tamaño del poro y regularidad de la porosidad, es decir, porosidad bien distribuida, afectan la conductividad térmica y con ello la capacidad de aislamiento de los materiales [24], [28].

TABLA 3. PROPIEDADES TÉRMICAS DE LAS MUESTRAS AFO Y AF20

Muestra	Conductividad térmica (W/mK)	Difusividad térmica (mm ² /s)	Calor específico (MJ/m ³ K)
AFO	0,5352	0,3427	1,562
AF10	0,5339	0,3087	1,743
AF20	0,5322	0,2697	1,973

Las curvas de medición de temperatura por exposición directa al fuego son mostradas en la figura 6, donde pueden apreciarse las temperaturas registradas durante un tiempo aproximado de 25 min. En los primeros 5 min, se presenta un periodo de calentamiento en los materiales, posteriormente estabilización en la temperatura en la cara expuesta, que alcanza temperaturas del orden de 980 °C para AF0 y AF10, mientras que en el compuesto con mayor contenido de fibra AF20 las temperaturas registradas son en promedio 904 °C. En la cara posterior, se puede apreciar una temperatura menor de 350 °C (el gradiente térmico es ~700 °C). [29] produjeron materiales cerámicos con propiedades refractarias utilizando residuos de ceniza de carbón y encontraron que durante exposición a la llama las muestras lograron aislar entre ~500 °C durante los 25 min. [12] encontraron que los cerámicos de arcilla caolinita-mullita podrían generar gradientes térmico de ~600 °C durante los 30 min de ensayo. Es sabido que la fibra incorporada puede soportar temperaturas de hasta 1700 °C y comercialmente conocida por ofrecer un buen aislamiento a altas temperaturas, buena resistencia al desgaste por flama directa y buenas propiedades como material refractario.

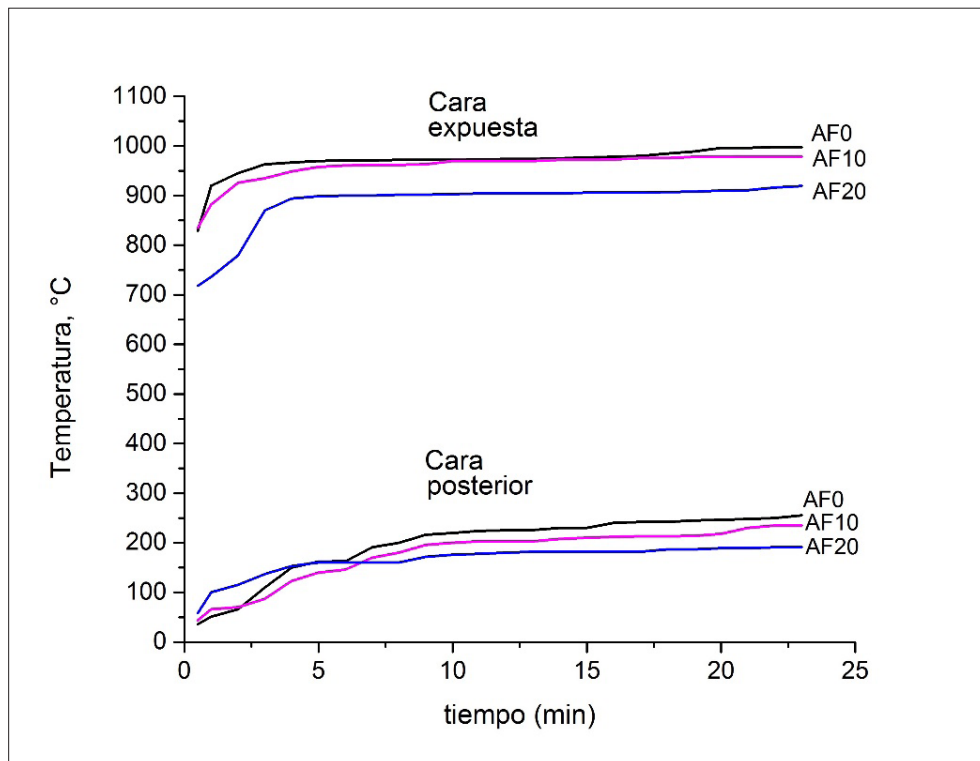


FIGURA 6. CURVAS DE TEMPERATURA MEDIDAS EN LAS MUESTRAS EXPUESTAS AL FUEGO DIRECTO POR MEDIO DE SOPLETE DE PROPANO

Con los resultados de conductividad térmica mostrados en la tabla 3, y el registro de temperaturas durante la exposición a fuego directo, se elaboró el gráfico de flujo de calor para AFO y AF20 mostrado en la figura 7. De los resultados de flujo de calor, se pueden resaltar tres etapas. La etapa inicial que dura aproximadamente los cinco primeros minutos del ensayo, donde la temperatura es mantenida por debajo de 200 °C. Subsecuentemente, en la etapa dos, de 5 a 10 min la transferencia de calor empieza a disminuir para AFO, pero se mantiene constante para AF20. La última etapa después de los 10 min es la que se considera en que se alcanza la estabilización de temperatura. Para el caso de AF20, la transferencia de calor durante el tiempo total de ensayo fue menor de la registrada para AFO. El flujo de calor en este estudio es ligeramente superior a lo reportado por [12] en cerámicos a partir de caolín-mullita, quienes obtuvieron flujos de calor entre 2,3 y 3,8 J. En este estudio, las muestras eran más gruesas y, además, más porosas que las muestras utilizadas por [12].

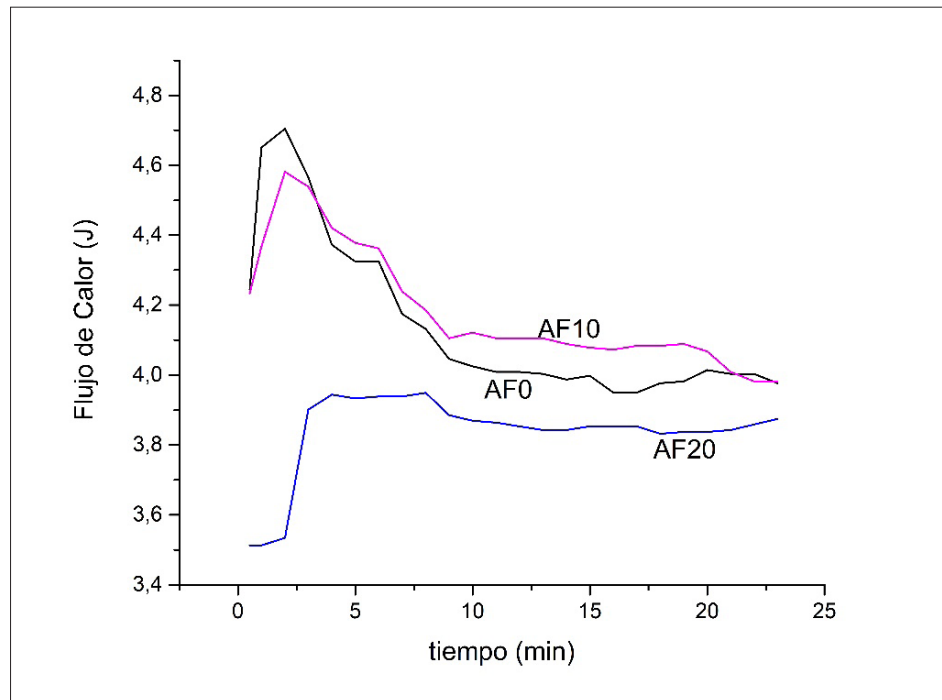


FIGURA 7. TRANSFERENCIA DE CALOR DE LAS MUESTRAS EXPUESTAS DIRECTAMENTE AL FUEGO

En la figura 8, se observan las huellas que dejó en los ladrillos AFO, AF10 y AF20 el contacto directo con fuego. Para AFO, la huella es mucho más grande y oscura, lo que infiere que existe un mayor grado de deterioro en la pieza, mientras que en la huella para las muestras con fibras AF10 y AF20 se observa que a mayor contenido de fibra

la huella es menor. Cuando se terminó el ensayo, se logró observar que la pieza AFO se había fisurado. El mejor desempeño térmico en las muestras con fibras se atribuye a la existencia de fases como mullita y corindón con propiedades refractarias encontradas previamente en los DRX para la muestra AF20.



FIGURA 8. MUESTRAS DESPUÉS DEL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA LLAMA. EN ORDEN DE IZQUIERDA A DERECHA, SE VEN LAS MUESTRAS AFO, AF10 Y AF20

CONCLUSIONES

Los resultados han mostrado que sí es factible la reutilización de residuos cerámicos provenientes de hornos para su empleo como partículas en la producción de ladrillos de arcilla con propiedades térmicas satisfactorias y que podrían clasificarlos como ladrillos refractarios. Se encontró que, en la medida en que se incorporó fibra cerámica, la resistencia a compresión disminuyó un 17,3 % para AF10 y un 17,0 % para AF20. Los valores de resistencia a flexión fueron de 3,4 MPa, siendo comparables a los valores de resistencia especificados para ladrillos refractarios de semisílice y medianamente refractarios especificados en la norma NTC 744 o de baja alúmina de la NTC 773. Además, el empleo de partículas recicladas de RP y fibras AF producen durante la cocción a 1.000 °C cristalización de corindón y cordierita, mientras que en las fases de mullita de las RP se ve incrementada. Estas fases poseen propiedades re-

fracturadas y pueden mantener en las muestras gradientes térmicos entre sus caras de ~ 700 °C. Los valores de porosidad aparente, densidad y absorción de los ladrillos no tienen mayor variación por el aumento en el contenido de la fibra. La norma NTC 744 permite un máximo de absorción del 30 % para los ladrillos refractarios de semisílice, y en esta investigación los valores estuvieron en un rango del 18,1 y el 19,3 %. El coeficiente de conductividad térmica (0,53 W/mK) de los ladrillos producidos con residuos es comparable con el de ladrillos tradicionales producidos con 100 % arcilla. Finalmente, se demostró que la incorporación de partículas recicladas RP junto con fibras cerámicas puede mejorar el desempeño térmico en ladrillos de arcilla. En la prueba de exposición directa al fuego, el mejor comportamiento lo mostró AF20, ya que al estar en contacto con el soplete generó una menor transferencia de calor. Además, se observó que AF20 tuvo una menor huella dejada durante la quema y no tuvo agrietamiento en comparación con la muestra AFO que sí se agrietó. Con los resultados encontrados, se propone que los ladrillos podrían clasificarse como refractarios de semisílice o de baja alúmina; sin embargo, se requieren otras propiedades complementarias para definir el tipo de refractario y el sector de aplicación.

REFERENCIAS

- [1] S. M. S. Kazmi, M. J. Munir, Y. F. Wu, A. Hanif y I. Patnaikuni, “Thermal performance evaluation of eco-friendly bricks incorporating waste glass sludge”, *J. Clean. Prod.*, vol. 172, pp. 1867-1880, en. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.255>
- [2] J. D. Santos Amado, P. Y. Malagón Villafrades y E. M. 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 rev.fac.nac.minas*, vol. 78, no. 167, pp. 50-58, jul.-sept. 2011 [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532011.000300006
- [3] S. Neves Monteiro y C. M. FontesVieirab, “On the production of fired clay bricks from waste materials: A critical update”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 68, pp. 599-610, oct. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.006>
- [4] T. Çiçek y Y. Çinçin, “Use of fly ash in production of light-weight building bricks”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 94, pp. 521-527, sept. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.029>
- [5] S. M. S. Kazmi, S. Abbas, M. J. Munir y A. Khitab, “Exploratory study on the effect of waste rice husk and sugarcane bagasse ashes in burnt clay bricks”, *J. Build. Eng.*, vol. 7, pp. 372-378, sept. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2016.08.001>
- [6] L. Aouba, C. Bories, M. Coutand, B. Perrin y H. Lemercier, “Properties of fired clay bricks with incorporated biomasses: Cases of Olive Stone Flour and Wheat Straw

- residues”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 102, pp. 7-13, en. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.040>
- [7] M. Sutcu y S. Akkurt, “The use of recycled paper processing residues in making porous brick with reduced thermal conductivity”, *Ceram. Int.*, vol. 35, no. 7, pp. 2625-2631, sept. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2009.02.027>
- [8] H. Fang, J. D. Smith y K. D. Peaslee, “Study of spent refractory waste recycling from metal manufacturers in Missouri”, *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 25, no. 2, pp. 111-124, febr. 1999. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(98\)00059-7](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(98)00059-7)
- [9] C. Sadik, I.-E. El Amrani y A. Albizane, “Processing and characterization of alumina-mullite ceramics”, *J. Asian Ceram. Soc.*, vol. 2, no. 4, pp. 310-316, abr. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jascer.2014.07.006>
- [10] C. Sadik, I.-E. El Amrani y A. Albizane, “Effect of andalusite rich schist grain size and the addition of metallic aluminum powder on the properties of silica-alumina refractory”, *J. Asian Ceram. Soc.*, vol. 1, no. 4, pp. 351-355, dic. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jascer.2013.10.002>
- [11] M. A. Villaquirán-Caicedo, R. Mejía de Gutiérrez y N. C. Gallego, “A novel MK-based geopolymer composite activated with rice husk ash and KOH: performance at high temperature”, *Mater. Construcción*, vol. 67, no. 326, pp. 1-13, 2017. <https://doi.org/10.3989/mc.2017.02316>
- [12] M. A. Villaquirán-Caicedo y R. Mejía de Gutiérrez, “Mechanical and microstructural analysis of geopolymer composites based on metakaolin and recycled silica”, *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 102, pp. 3653-3662, nov. 2019. <https://doi.org/10.1111/jace.16208>
- [13] S. Idarraga-Giraldo, S. Figueroa-Calle y F. A. Vargas-Bermúdez, “Utilización de chamota posconsumo en la formulación de una pasta refractaria como sustitución de la alúmina”, *Rev. Ión*, vol. 33, no. 1, pp. 39-45, 2020. DOI:10.18273/revion
- [14] J. Sánchez Molina, J. A. Orozco Cacique y L. Peñalosa Isidro, “Evaluation of mixtures of clay for the manufacture of refractory bricks used for the conversion technology of used ovens”, *Rev. Invest. Univ. Quindío*, vol. 26, no. 1, pp. 59-66, 2014 [En línea]. Disponible en: shorturl.at/knKN7
- [15] P. Muñoz Velasco, M. P. Morales Ortiz, M. A. Mendivil Giró y L. Muñoz Velasco, “Fired clay bricks manufactured by adding wastes as sustainable construction material: a review”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 63, pp. 97-107, jul. 2014.
- [16] Icontec, “NTC 4205. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos”, Bogotá, p. 28, 2019.
- [17] Icontec, “NTC 773. Clasificación de ladrillos refractarios de arcilla refractaria”, Bogotá, p. 11, 2018.

- [18] I. B. Topçu y B. Işikdağ, “Manufacture of high heat conductivity resistant clay bricks containing perlite”, *Build. Environ.*, vol. 42, no. 10, pp. 3540-3546, oct. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.016>
- [19] N. Ariyajinno y S. Thiansem, “Effect of firing temperature on sintering of cordierite-mullite refractories from raw materials and Narathiwat clay in Thailand”, *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 6, Part 1, pp. 14036-14040, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.057>
- [20] J. Morales Güeto, *Tecnología de los materiales cerámicos*. Madrid: Díaz de Santos, 2005.
- [21] S. K. Singh, S. Kulkarni, V. Kumar y P. Vashistha, “Sustainable utilization of deinking paper mill sludge for the manufacture of building bricks”, *J. Clean. Prod.*, vol. 204, pp. 321-333, dic. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.028>
- [22] D. Measurements, A. S. Gravity y B. Density, *Standard test methods for apparent porosity, water absorption, apparent specific gravity, and bulk density of burned refractory brick and shapes by boiling water*. West Conshohocken: ASTM, 2020.
- [23] Icontec, “NTC 744. Ladrillos refractarios de semisílice, especificaciones”. Bogotá, p. 5, 2021.
- [24] R. Taurino, D. Ferretti, L. Cattani, F. Bozzoli y F. Bondioli, “Lightweight clay bricks manufactured by using locally available wine industry waste”, *J. Build. Eng.*, vol. 26, nov. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100892>
- [25] P. Muñoz, M. P. Morales, M. A. Mendívilc, M. C. Juárez y L. Muñoz, “Using of waste pomace from winery industry to improve thermal insulation of fired clay bricks: eco-friendly way of building construction”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 71, pp. 181-187, nov. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.027>
- [26] G. Peña Rodríguez, J. Peña Quintero y M. Gómez Tovar, “Determinación experimental de la conductividad térmica efectiva en bloques extinguidos de arcilla roja”, *Rev. Cienc. en Desarro.*, vol. 5, no. 1, pp. 15-20, febr. 2014. <https://doi.org/10.19053/01217488.3227>
- [27] M. J. Munir, S. M. S. Kazmi, Y. F. Wu, A. Hanif y M. U. A. Khan, “Thermally efficient fired clay bricks incorporating waste marble sludge: an industrial-scale study”, *J. Clean. Prod.*, vol. 174, pp. 1122-1135, febr. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.060>
- [28] L. Gong, Y. Wang, X. Cheng, R. Zhang y H. Zhang, “Thermal conductivity of highly porous mullite materials”, *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 67, pp. 253-259, dic. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.08.008>
- [29] D. Vásquez-Molina, J. M. Mejía-Arcila y R. Mejía de Gutiérrez, “Mechanical and thermal performance of a geopolymeric and hybrid material based on fly ash”, *Dyna rev.fac.nac. minas*, vol. 83, no. 195, pp. 216-223, 2016. <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n195.50824>