



Evaluación de las propiedades mecánicas de ladrillos elaborados con residuos de vidrio y plástico. Análisis de las emisiones de dióxido de carbono

Evaluation of the mechanical properties of bricks made with glass and plastic waste. Analysis of carbon dioxide emissions

Faber Sneider Cardona Howard*

Luis Alberto Rengifo Rojas**

Juan Felipe Guarín Martínez***

Daniel Guillermo Mazo Castro****

Oscar Felipe Arbeláez Pérez*****

(Recibido el 22-08-2020. Aprobado el 04-11-2020)

Estilo de citación de artículo:

F. S. Cardona Howard, L. F. Rengifo Rojas, J. F. Guarín Martínez, D. G. Mazo Castro and O. F. Arbeláez Pérez, "Evaluación de las propiedades mecánicas de ladrillos elaborados con residuos de vidrio y plástico. Análisis de las emisiones de dióxido de carbono", *Lámpsakos*, no. 24, pp. 60-73, julio-diciembre, 2020.
DOI: 10.21501/21454086.3725

* Ingeniero Civil. Universidad Cooperativa de Colombia, Medellín-Colombia. Contacto: faber.cardonah@campusucc.edu.co. ORCID: 0000-0002-7446-4794. Google académico: https://scholar.google.es/citations?view_op=list_works&hl=es&user=ratnjXAAAAAJ

** Ingeniero Civil. Universidad Cooperativa de Colombia, Medellín-Colombia. Contacto: luis.rengifor@campusucc.edu.co, ORCID: 0000-0003-0700-6643. Google académico: https://scholar.google.es/citations?hl=es&view_op=list_works&gmla=AJsN-F5CLXx0_s3NoAzKmPP-NBkQpoA1_FHgQLMT69HgS7215O587InSySzUJh4wTEV6MCatfaueKhWKOOzNGCVq_w-glt_X8eQIEw-VtR6uKbf5N6ip0SA&user=SL4IFCUAAAAJ

*** Ingeniero Civil. Universidad Cooperativa de Colombia, Medellín-Colombia. Contacto: juan.guarinm@campusucc.edu.co, ORCID: 0000-0002-1381-6629. Google académico: https://scholar.google.es/citations?hl=es&user=QWgXpyYAAAAJ&view_op=list_works&gmla=AJsN-F7NU16YSHbH1yIrMM2pw3itJc9V2MzWjOkmGQIL_FSLAXuoJCMPPd7gVee5fdAQq4alxZHJ4ZjrtEGJdg8tDSwLBTQGbbUgHTEugBeTnnxIR9yHM

**** Ingeniero Civil. Universidad Cooperativa de Colombia, Medellín-Colombia. Contacto: daniel.mazoc@campusucc.edu.co, ORCID: 0000-0003-1276-502X. Google académico: https://scholar.google.es/citations?hl=es&user=CVi0D_kAAAAJ&view_op=list_works&gmla=AJsN-F6a2DiVO6SDm4wBQPRLqFN-blVpsmeGHOHQURBqLbBn-A_sGw1qte0g9OylWuok2BfF1ziYcNtU19AjpPKSJQnvW-bIQ

***** Doctor en Ingeniería, Universidad Cooperativa de Colombia, Grupo de Investigación Termomec, Medellín-Colombia. Contacto: oscar.arbelaez@campusucc.edu.co, ORCID: 0000-0001-8592-5333. Google académico: <https://scholar.google.com/citations?user=TmMF3gAAAAJ&hl=es>

DOI: <https://doi.org/10.21501/21454086.3725>

Resumen

El uso de desechos no biodegradables como el vidrio y el plástico en la industria de la construcción ha recibido atención significativa para un medio ambiente más limpio. Este trabajo presenta un estudio de las propiedades mecánicas de ladrillos que contienen agregados, vidrio y pellets de tereftalato de polietileno. Los ladrillos se fundieron a 240 °C durante 3 horas y se enfriaron por convección natural. Los resultados mostraron que un aumento en el contenido de vidrio y agregados genera un incremento en la densidad, que es superior en las muestras con mayor contenido de agregados. La misma tendencia se observó en la resistencia a la compresión: la muestra con mayor contenido de agregados mostró una mejora del 243 % comparada con la referencia (preparada solo con plástico). Los resultados indicaron que las emisiones de dióxido de carbono disminuyeron alrededor del 30 % en las muestras preparadas, en comparación con los ladrillos tradicionales. Se espera que el uso de residuos de plástico y vidrio en la producción de ladrillos se convierta en una ruta para su valorización.

Palabras clave: Residuos de vidrio; Residuos plásticos; Ladrillos no cocidos; Huella de carbono; Emisión de gases; Propiedades mecánicas; Materiales de construcción; Resistencia a compresión; Construcción sostenible; Reciclaje.

Abstract

The use of non-biodegradable waste such as glass and plastic in the construction industry has received significant attention for a cleaner environment. This work presents a study of bricks' mechanical properties containing aggregates, glass, and polyethylene terephthalate pellets. The bricks were melted at a temperature up to 240 °C for 3 hours and cooled by natural convection. The results showed that an increase in the content of glass and aggregates generates an increase in density, being higher in the samples with a higher aggregates content. The same trend was observed in compressive strength. The sample with the highest aggregates' content showed an improvement of 243% compared to the reference (prepared only with plastic). The results indicated that carbon dioxide emissions decreased by around 30% in the prepared samples, compared to traditional bricks. The use of plastic and glass waste in brick production is expected to become a recovery route.

Keywords: Glass waste; Plastic waste; bricks; Carbon footprint; Emission of gases; Mechanical properties; Building materials; Compressive strength; Sustainable construction; Recycling.

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento continuo de la población y su migración a las zonas urbanas genera un incremento en los requerimientos de infraestructura civil, como edificios residenciales y no residenciales, fábricas, hospitales, puentes, túneles y diferentes proyectos viales e hidroeléctricos [1]. Estos requerimientos en infraestructura están asociados con una elevada demanda de materiales de construcción como cemento, ladrillos, acero y concreto, entre otros [2], los cuales representan alrededor del 60 % del costo total de las construcciones [3]. Los ladrillos se han utilizado ampliamente como material de construcción en todo el mundo. Hay dos tipos de ladrillos: los ladrillos a base de cemento y los de arcilla [4]. El ladrillo a base de arcilla ha sido generalmente preferido por los fabricantes porque es más económico, tiene una mayor resistencia al fuego y mayor vida útil que el ladrillo a base de cemento [5]. Actualmente, se consumen al año alrededor de 180 mil millones de toneladas de ladrillos de arcilla en todo el mundo [6]. Aproximadamente 340 billones de toneladas de arcilla y 5000 acres de la capa superior de tierra excavada se requieren para su fabricación; además de la erosión del suelo, la emisión de dióxido de carbono en su proceso de elaboración y la deforestación son algunos de los problemas relacionados con este proceso [6]. Asimismo, la elevada demanda de arcilla en la producción de ladrillos ha llevado a su sobreexplotación, lo que resulta en la reducción de este material no renovable en varios países de rápido crecimiento en todo el mundo [7]. Por lo tanto, es crucial identificar materiales alternativos ecológicos para reemplazar los precursores tradicionales empleados en la elaboración de ladrillos.

La investigación sobre el uso de residuos (cenizas volantes [8], desperdicios de mármol [9], piedra pómez [10] o materiales reciclados de la industria de la construcción y la demolición [11], ha ido en aumento en los últimos años en razón del esfuerzo por preservar las materias primas naturales existentes y reducir el efecto negativo de estos desechos, especialmente los no biodegradables, como residuos de vidrio y plástico, en el medio ambiente [12]. Se ha reportado que solo en los Estados Unidos se producen anualmente decenas de millones de toneladas de residuos de vidrio y de estos

alrededor del 60 % se eliminan a través de los rellenos sanitarios, disminuyendo el espacio disponible para su disposición [13]. Cada año se generan 6.5 billones de toneladas de desechos plásticos a escala mundial y la eliminación de estos representa una amenaza considerable para el medio ambiente debido a sus largos períodos de degradación [14].

Diferentes investigaciones han reportado sobre sustitutos, como los residuos de vidrio o plástico, de los componentes tradicionales en la elaboración de ladrillos, buscando obtener ladrillos modificados que conserven propiedades mecánicas similares o superiores al tradicional, además de generar un abanico de posibilidades para hacer frente a los desechos producidos por diferentes industrias. Akinyele y colaboradores [15] reportaron el uso de pellets de tereftalato de polietileno (conocido comúnmente con el nombre de PET) como material de adición en porcentajes del 5 %, 10 %, 15 % y 20 % en la elaboración de ladrillos cocidos. Los autores mostraron que los ladrillos mezclados con PET en porcentajes mayores al 15 % se desintegran durante el proceso de cocción, efecto asociado al aumento en la temperatura por encima del punto de fusión del PET (entre 245 °C y 260 °C); asimismo, reportaron que el material con un reemplazo del 5 % alcanzó la mejor resistencia a la compresión (2.30 MPa), sin embargo, esta solo representa el 66 % del valor recomendado por la BDA (Brick Development Association) (3.5 MPa) [16] y la norma técnica colombiana NTC 4205 [17]. Con respecto a la densidad de los especímenes, se encontró una relación inversa con el porcentaje de plástico; este comportamiento fue atribuido al peso ligero del PET. Para resolver el problema asociado con la desintegración de los ladrillos, Akinyele y colaboradores [18] investigaron la adición de residuos de vidrio en porcentajes de 1 %, 2 %, 3 %, 4 %, y 5 % en la preparación de ladrillos. Los autores reportaron que este material evita la desintegración de los especímenes durante su proceso de elaboración. El valor más alto en la resistencia a la compresión se observó para los ladrillos con adiciones del 5 % de vidrio (11.02 MPa), el cual fue 1.79 y 3.14 veces mayor que el espécimen de control (6.15 MPa) y el recomendado por la BDA, respectivamente. Kumi y colaboradores [19] reportaron el efecto del tamaño de

DOI: <https://doi.org/10.21501/21454086.3725>

partícula (0.25 mm, 0.75 mm, 1.68 mm y 3.55 mm) y el contenido (50 – 90 % en masa) de agregados sobre la densidad y la resistencia a la compresión de cubos de 50 mm preparados a partir de PET (de residuos de bolsas plásticas). Los autores reportaron que un aumento en el tamaño de partícula genera una disminución en la densidad y en la resistencia a la compresión; de hecho, muestras con tamaños de partícula de 3.55 mm presentaron la mayor resistencia a la compresión (alrededor de 27.5 MPa). Con respecto al efecto del contenido de agregados, los autores reportaron que en el rango entre 50 % y 90 % se observó un aumento en la densidad entre 1460 Kg/m³ a 1910 Kg/m³, respectivamente. Asimismo, la resistencia a la compresión mejoró con el contenido de agregados, alcanzando un óptimo de 27.3 MPa para una adición del 75 %.

La industria de la construcción afecta en gran medida las emisiones de dióxido de carbono; de hecho, el consumo de energía durante la fabricación y transporte de materiales tiene un efecto significativo sobre el medio ambiente, por tanto, la correcta selección de materiales es fundamental para ayudar a ahorrar energía y reducir las emisiones de CO₂ [20]. Uno de los retos de la industria de la construcción es desarrollar estructuras ambientalmente amigables que generen menores emisiones de dióxido de carbono a lo largo de todo el proceso de extracción, transporte y producción de materiales [21]. En respuesta a este reto, se ha probado la incorporación de diferentes sustitutos tales como cenizas volantes, humo de sílice y escoria granulada de alto horno que han sido incorporados en la preparación de materiales, específicamente concretos, y han permitido reducir las emisiones de dióxido de carbono [22]. Crossin y colaboradores [23] reportaron que la sustitución del 70 % del cemento con escoria de acero reduciría, solo en los Estados Unidos, hasta un 47.5 % la emisión de gases de dióxido de carbono. Asimismo, se ha reportado que la sustitución del 25 % y 40 % del cemento por cenizas volantes reduce las emisiones de dióxido de carbono en un 13 % y un 22 %, respectivamente [24]. De manera similar, el uso de cenizas volantes en concreto prefabricado permitió una reducción del 18 % en los aportes de cemento, lo que llevó a una reducción del 25 % de los gases de efecto invernadero [25].

El proceso tradicional de elaboración de ladrillos implica la emisión de gases (CO₂, vapor de H₂O, CO, SO₂ y NO entre otros) contaminantes a la atmósfera, que contribuyen de manera negativa al deterioro del medio ambiente [26]. La concentración de las emisiones varía de acuerdo al tipo de proceso, horno utilizado, combustible, tiempo de cocción y tecnología empleada en el proceso de elaboración de los ladrillos y, debido al rápido crecimiento en la producción de ladrillos en todo el mundo, se ha generado una gran preocupación por los aspectos ambientales asociados a este proceso, los cuales deben ser atendidos de manera inmediata.

La huella de carbono relacionada con las emisiones de gases de efecto invernadero (expresada comúnmente como emisiones de CO₂ equivalente) es un parámetro ampliamente estudiado en diversas industrias para mejorar la calidad en la toma de decisiones de un proceso con respecto a su impacto ambiental [27]; sin embargo, la literatura sobre factores de emisión para el proceso de elaboración de ladrillos es muy limitada, especialmente con la perspectiva de los países en desarrollo, lo cual requiere que se aborden estudios relacionados que permitan abordar esta brecha en el conocimiento del proceso.

Dada la problemática ambiental asociada con la elevada producción de residuos de vidrio y plástico, y su efecto positivo individual en las propiedades de ladrillos preparados a partir de estos residuos, en este trabajo se presentan los resultados del estudio de las propiedades físicas y mecánicas de bloques preparados a partir de mezclas de plástico, vidrio y agregados, así como el estudio de las emisiones de dióxido de carbono durante el proceso.

2. METODOLOGÍA

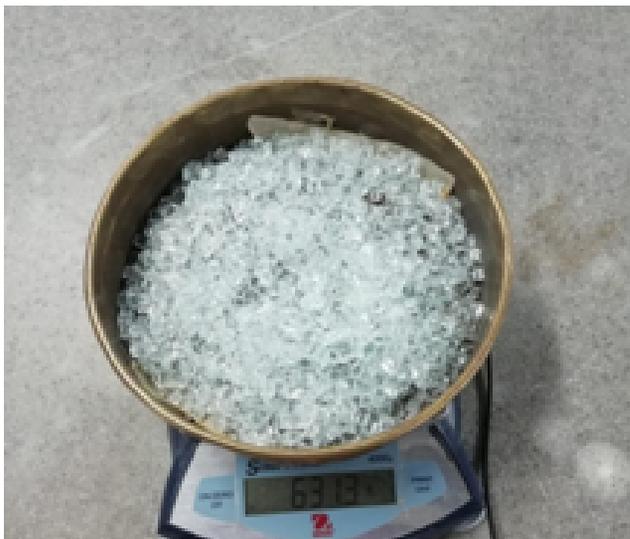
Preparación de los especímenes

Para la elaboración de los ladrillos se utilizaron pellets de plástico reciclado (Figura 1a) suministrado por la empresa MAGU Industrias Plásticas SAS, con tamaño

de partícula comprendido entre 2.00 mm y 2.38 mm, y una densidad aparente de 1360 Kg/m³. Los residuos de vidrio (Figura 1b) fueron suministrados por la empresa Alco SA. Los agregados (Figura 1c) y los residuos de vidrio se clasificaron por análisis granulométrico acorde a la Norma Técnica Colombiana NTC 77, utilizando una agitadora eléctrica de tamices RO-TAP Gilson. Para la elaboración de los ladrillos se utilizó el material con tamaños de partícula comprendidos entre 3/4–1/4 de pulgada.



(a) Residuos de PET



(b) Residuos de Vidrio



(c) Agregados

Figura 1. Materiales utilizados en la elaboración de los especímenes. a. Residuos de PET, b. Residuos de vidrio, c. Agregados.

Las relaciones de plástico reciclado (P), vidrio (V) y agregados (A) de las muestras elaboradas se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Relaciones en masa de PET, vidrio y agregado utilizadas en la elaboración de ladrillos.

Referencia	Relación P:V:A*	% agregados
M1	1:0:0	0
M2	1:3.3:0	0
M3	1:1.8:0.7	20
M4	1:1.3:1.1	32
M5	1:0.8:1.9	51
M6	1:0:2.9	74

*P:V:A, representan relación PET:Vidrio:Agregado

Las relaciones P:V:A fueron calculadas con base en la masa del plástico, que siempre se mantuvo constante en todos los especímenes. Las diferencias en las proporciones se presentan debido a la diferencia en las densidades entre el PET, el vidrio y los agregados; se procura mantener el mismo volumen del espécimen y evitar que las diferencias en las propiedades sean asociadas a diferencias en la geometría.

DOI: <https://doi.org/10.21501/21454086.3725>

Para la elaboración de los especímenes, las cantidades de plástico, vidrio y agregados se mezclaron uniformemente utilizando el fondo de un juego de tamices en una agitadora eléctrica RO-TAP Gilson por 5 minutos. Con la mezcla homogénea, se rellenaron y enrasaron los moldes de acero con geometría prismática de 0.124m×0.07m×0.100m, previamente recubiertos con un desmoldante (Figura 2a). La mezcla dispuesta en el molde se fundió en un horno eléctrico BINDER FD 115, calentado a una rampa de temperatura 5°C/min hasta alcanzar 240 °C; una vez alcanzada esta temperatura, el espécimen se mantuvo por 1.5 h. Finalmente, el horno se apagó y el espécimen se enfrió en el mismo molde por convección natural hasta temperatura ambiente; después de este tiempo, se desmoldó (Figura 2b). Para cada una de las muestras se prepararon tres especímenes. Los especímenes preparados se pulieron con una pulidora makita HPGK para eliminar posibles imperfecciones en los bloques durante el proceso de elaboración y garantizar la misma geometría.



(a) Molde para preparación de los especímenes



(b) Especimen preparado

Figura 2. (a) Molde para preparación de los especímenes. (b) Especimen preparado.

Evaluación de las propiedades mecánicas

El ensayo de resistencia a la compresión f'_c se realizó en una prensa hidráulica HM de compresión simple de 1500 KN, con una velocidad de carga de 0,6 MPa/s., tal como lo muestra la Figura 3.



Figura 3. Pruebas de resistencia de los especímenes elaborados.

La densidad ρ (Kg/m^3) de los especímenes se evaluó tal como se describe en la ecuación 1.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde m y V representan la masa (Kg) y el volumen (m^3) del espécimen, respectivamente.

Calculo de las emisiones de dióxido de carbono

El cálculo de la huella de carbono CF (*Carbon Footprint*) busca cuantificar la cantidad de emisiones de dióxido de carbono equivalentes generadas para valorar el impacto de los gases de efecto invernadero GHG (*Greenhouse Gases*) sobre el medio ambiente. Se emplea el CO_2 dado que es el gas de mayor repercusión entre los GHG emitidos durante un proceso o bien generado [28]. El cálculo de la huella de carbono (Ecuación 2) tiene en cuenta la emisión en cada una de las operaciones unitarias, tal como fue descrito previamente por Hong y colaboradores [29].

$$CF = \sum EF * W_i \quad \text{Ec. 2}$$

Donde CF representa la huella de carbono (*Carbon Footprint*), EF representa el factor de emisión (*Emission Factor*) y W_i representa la carga de la fuente de emisión.

Las emisiones de gases durante el proceso de producción de los ladrillos dependen del tipo de horno, el combustible utilizado y las condiciones de funcionamiento del horno. Se pueden derivar dos factores de emisión, a saber, el factor de emisión basado en la energía (EFE) y el factor de emisión basado en la producción (EFP) [30]. Comparar las emisiones de diferentes combustibles o las condiciones de operación requiere normalización, ya sea a la unidad de combustible consumido o la unidad de energía consumida, o una comparación basada en la producción de ladrillos. En este trabajo se tomó en consideración la emisión de dióxido de carbono durante: 1) El proceso de formación de los pellets de plástico reciclado; 2) La clasificación granulométrica de los agregados y el vidrio; 3) La mezcla de

los componentes precursores; y 4) El proceso de cocción de los ladrillos. Para el procedimiento 1 (efectuado por la empresa MAGU SAS) se consideró un factor de emisión de $4 \text{ Kg CO}_2/\text{Kg}$ de plástico procesado. Los procedimientos 2 y 3 se efectuaron en una agitadora eléctrica RO-TAP (750 W de potencia), mientras que el procedimiento 4 se llevó a cabo en un horno eléctrico BINDER FD 115 (potencia nominal 1100 W a $300 \text{ }^\circ\text{C}$). Para el caso de los equipos eléctricos la emisión se calculó tal como el producto de la potencia por el tiempo de uso por el factor de emisión de la energía eléctrica. El factor de emisión de energía eléctrica tomado en este trabajo fue de $0.21 \text{ Kg CO}_2/\text{Kwh}$ [31].

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La Figura 4 muestra los resultados de la densidad de cada uno de los especímenes preparados.

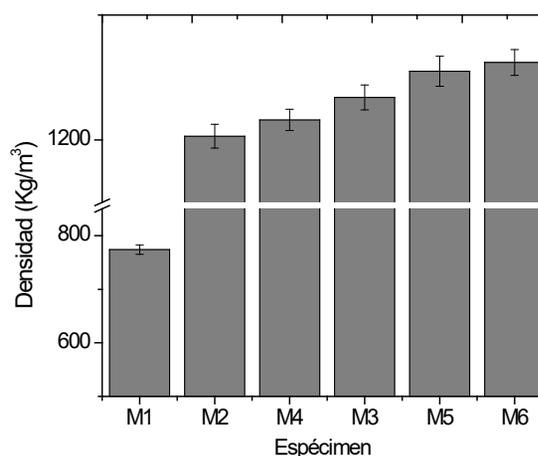


Figura 4. Densidad de los especímenes elaborados

Los resultados de la Figura 4 muestran que el espécimen M1 tiene la densidad más baja ($774 \text{ Kg}/\text{m}^3$), dado que este contiene solo PET (muestra de control), por tanto, debido al peso ligero de este material, entre mayor sea su presencia, menor será la densidad del espécimen resultante. Los especímenes que contienen

DOI: <https://doi.org/10.21501/21454086.3725>

agregados y residuos de vidrio, ya sea de manera individual o combinada, presentan un aumento en la densidad con respecto a la muestra de control. Los resultados revelaron que las muestras individuales M2 (preparada con plástico y vidrio) y la muestra M6 (preparada con plástico y agregados) presentan el menor (57 %) y el mayor (67 %) aumento, respectivamente, en comparación con la muestra de control. Este comportamiento en la densidad de las muestras individuales está asociado con la menor gravedad específica de los residuos de vidrio (2420 Kg/m^3) en comparación con los agregados (2780 Kg/m^3). Este comportamiento está en línea con los reportados previamente por Valencia y colaboradores [32], quienes reportaron que el aumento en la densidad de concretos preparados a partir de adiciones individuales de microesferas y plásticos es función del tipo de sustituto, siendo mayor para los concretos preparados con microesferas. Los resultados de la Figura 4 también muestran que en los especímenes preparados a partir de la combinación de residuos de vidrio y agregados, existe un aumento en la densidad, la cual es directamente proporcional al aumento en el contenido de agregados; de hecho, los especímenes combinados M3, M4 y M5, presentaron aumentos en la densidad de los especímenes del 57 %, 60 % y 62 %, respectivamente, en comparación con la muestra de referencia. La tendencia observada en la densidad por la adición de agregados y vidrio se asocia a la fusión de los pellets de plástico, los cuales ocuparon los espacios existentes entre las partículas de vidrio y agregados durante la elaboración de los materiales. El comportamiento en las muestras combinadas sigue la misma tendencia que las muestras individuales, siendo proporcional al componente dominante. Nuestros resultados son acordes con los trabajos previos de Kumi y colaboradores [19], quienes evidenciaron un aumento en la densidad directamente proporcional el contenido de agregados durante la preparación de bloques elaborados a partir de agregados finos enlazados con plástico.

La Figura 5 muestra los resultados de la resistencia a la compresión de los especímenes preparados. Como es sabido, la resistencia a la compresión es la medida más relevante para determinar la calidad de los ladrillos, cuanto mayor sea esta, más duradero es el ladrillo.

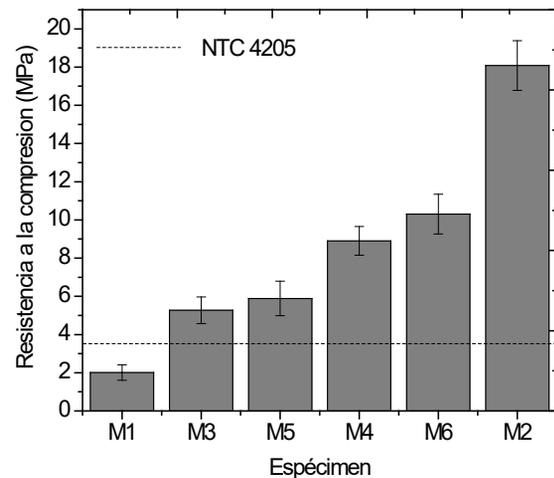


Figura 5. Resistencia a la compresión de los especímenes elaborados

Los resultados de la Figura 5 muestran que la adición de residuos de vidrio o agregados genera un efecto positivo en la resistencia a la compresión de los especímenes preparados exclusivamente a partir de residuos plásticos. Se encontró que la resistencia a la compresión está por encima del valor mínimo necesario (3.5 MPa) exigido por la norma técnica colombiana NTC 4205. Con respecto al espécimen preparado a partir de la adición individual de vidrio M2 se encuentra una resistencia 2.6 veces mayor (5.27 MPa) a la muestra de control, en línea con los reportes previos de Akinyele y colaboradores [18], quienes reportaron una mejora en la resistencia a la compresión fuertemente dependiente de la incorporación y del contenido de residuos de vidrio en la preparación de ladrillos de arcilla con adiciones de vidrio. Asimismo, para el material preparado con adición individual de agregados, se observó una mejora mucho más marcada en la resistencia a la compresión, alcanzando una resistencia 9 veces mayor (18.08 MPa) a la muestra de control. Los resultados encontrados en este trabajo son acordes a los reportados previamente por Kumi y colaboradores [19], quienes hallaron un aumento en la resistencia a la compresión en la preparación de bloques a partir de diferentes combinaciones de plástico y agregados; de hecho, la mejor resistencia (alrededor de 27 MPa) fue reportada para una adición del 75 % de agregados, el cual corresponde a un por-

centaje similar de reemplazo en este trabajo (74 % de contenido de agregados). El comportamiento observado en la resistencia a la compresión puede ser explicado con base en la resistencia individual de cada uno de los materiales individuales, siendo mayor en los agregados que en el vidrio, lo cual permite una mayor capacidad de carga en las muestras individuales preparadas solo con agregados. De hecho, la mayor rugosidad observada en los agregados que en el vidrio se refleja en una mejor adherencia de los agregados con el plástico fundido, mejorando la resistencia a la compresión. Para los especímenes preparados a partir de combinaciones de residuos de vidrio y de agregados, se encontró una tendencia similar a la densidad, mostrando una mejora en la resistencia a la compresión con el incremento en el contenido de agregados; de hecho, los especímenes M3, M4 y M5, que contienen 20 %, 32 % y 51 % de agregados, presentan aumentos en la resistencia del 12 %, 68 % y del 95 %, respectivamente, en comparación con el material preparado a partir de residuos de vidrio y plástico M2. Los resultados muestran el efecto sinérgico positivo que genera la adición de los agregados finos al vidrio, comportamiento asociado a la interacción con los agregados, compuestos de naturaleza inorgánica compatible, los cuales se entrelazaron entre sí durante la elaboración del material permitiendo una mejor interacción, lo que conllevó a un aumento en la resistencia a la compresión, tal como ha sido descrito previamente por otros autores [33].

La Figura 6 muestra una imagen macroscópica de un corte realizado al espécimen M6, el de mayor resistencia



Figura 6. Estructura macroscópica de un corte al espécimen M6.

Los resultados de la Figura 6 muestran que las partículas de agregados están encapsuladas y unidas mecánicamente a la matriz de plástico. De hecho, se puede observar que el aglutinante (residuos de plástico, en este caso) se une a los agregados, rellenando las irregularidades de la superficie y formando una interacción fuerte entre estas fases, lo que conlleva a una mayor resistencia. Para las muestras preparadas con PET y residuos de vidrio (no mostradas en este trabajo), se observa una interacción más débil entre estos materiales, debido a la menor rugosidad del vidrio, lo que conllevó a una menor resistencia a la compresión, sin embargo, esta fue mejorada con la inclusión de agregados en las muestras combinadas, lo que se tradujo en un aumento en la resistencia a la compresión. Este comportamiento fue previamente descrito por Kumi y colaboradores [19], quienes reportaron cambios en la estructura reticular de la matriz estructural plástico-agregados finos observada mediante microscopía electrónica de barrido.

Los resultados encontrados muestran una mejora en la propiedades mecánicas de bloques preparados a partir de residuos plásticos, con adiciones de agre-

DOI: <https://doi.org/10.21501/21454086.3725>

gados y residuos de vidrio; de hecho, se observa que estas se ven influenciadas no solo por el tipo de material añadido al bloque, sino también por el porcentaje de material y de la relación entre agregados y vidrio, mostrando una influencia más positiva sobre la resistencia a la compresión cuanto mayor sea el contenido de agregados en las muestras combinadas.

La Figura 7 muestra la emisión de dióxido del espécimen que presentó la mejor resistencia a la compresión. Se reportan datos comparativos reportados por otros autores. Los cuales representan el tipo de horno utilizado en el proceso de elaboración de los ladrillos y se describen a continuación: VSK (*Vertical Shaft Brick Kiln*), ZZ (*ZigZag Kiln*), TKI (*Tunnel Kiln India*), FCB (*Fixed Chimney Bull's Trench Kiln*), TK (*Tunnel Kiln USA*), TKU (*Tunnel Kiln United Kingdom*) y DDK (*Down Draft Kiln*) [34].

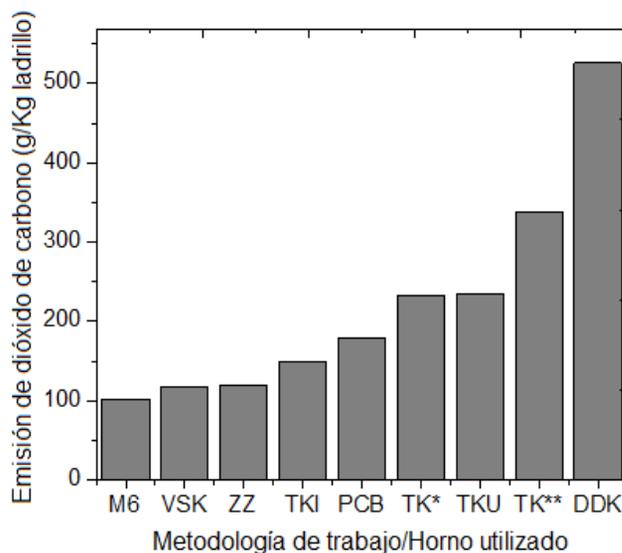


Figura 7. Emisión de dióxido de carbono g /Kg de ladrillo elaborado. TK* (utilizando gas natural como combustible) TK ** (utilizando aceites combustibles ligeros como combustible)

La Figura 7 muestra que el espécimen M6, preparado a partir de plástico y agregados, emite alrededor de 102 g de dióxido de carbono por cada kilogramo de ladrillo elaborado. La emisión de dióxido de carbono en este proceso proviene de la *pelletización* del material plástico. En esta misma figura se puede observar que el proceso de preparación de ladrillos mostrado en

este trabajo presenta menores emisiones que la metodología tradicional, la cual utiliza diferentes hornos y combustibles. De la Figura 7 se puede observar que el proceso tradicional de preparación de ladrillos muestra un rango de emisiones de dióxido de carbono bastante amplio, el cual está comprendido entre 119-526 gCO₂/Kg de ladrillo; esta emisión depende exclusivamente del tipo de horno y del combustible utilizado para el proceso de elaboración de los materiales. Cuando se compara el método utilizado en este trabajo con los métodos reportados en la literatura (VSK, ZZ, TKI, FCB, TK*, TKU y DDK) se encuentra que estos son mayores en un 15.7 %, 16.7 %, 46.1 %, 75.5 %, 127.7 %, 129.6 % y 415 %, respectivamente, con respecto al método propuesto, lo cual indica que esta metodología es ambientalmente más amigable, al mismo tiempo que plantea una alternativa de valorización para este tipo de desechos.

De la misma manera, si se realizan comparaciones entre los métodos reportados en la literatura, con respecto al uso de diferentes combustibles (TK* gas natural y TK** aceites combustibles ligeros) en un horno tipo *Tunnel Kiln* (ver Figura 7) estos, además de presentar mayores emisiones de dióxido de carbono, también generan emisiones adicionales de CO, SO₂ y material particulado. La reducción en las emisiones de dióxido de carbono puede ser explicada desde el punto de vista de la temperatura más baja a la cual se lleva esta metodología (alrededor de 240 °C), siendo menor a la reportada en la literatura para el proceso tradicional (rango entre 700 – 1500 °C) de elaboración de ladrillos [35], lo cual acarrea un mayor consumo energético que, en algunos casos, se abastece mediante la combustión de biomasa.

A partir de los resultados discutidos anteriormente, este estudio indica una diferencia significativa entre ambas técnicas de preparación de ladrillos. La metodología propuesta en este trabajo permite generar ladrillos con resistencias a compresión mayores al material tradicional y menores emisiones de dióxido de carbono. Los resultados encontrados son consistentes con estudios anteriores que presentan cómo la elección del

material puede afectar tanto a la energía incorporada como a la huella de carbono de los materiales de construcción [36].

Con respecto a la metodología reportada en este trabajo, se requieren estudios adicionales sobre el retorno de la inversión del proceso, dado el requerimiento de electricidad para su funcionamiento, lo que podría llevar a una limitación en muchos lugares donde no se disponga de un suministro eléctrico continuo. Con respecto a este trabajo se resalta el potencial que tienen los residuos de plástico y de vidrio para convertirse en un material de construcción ecológico ya que muestra un menor impacto ambiental en comparación con el método tradicional.

4. TRABAJOS FUTUROS

Los resultados de este trabajo muestran el potencial que tiene la adición de agregados sobre las propiedades físicas y mecánicas de ladrillos preparados a partir de residuos plásticos y vidrio, asociado a la sinergia entre estos dos materiales. Por tanto, se espera en trabajos posteriores, llevar a cabo estudios que permitan mejorar la discusión de los resultados encontrados hasta el momento, por lo cual se propone:

Para el espécimen m6 (el de mayor resistencia a la compresión) evaluar el efecto de la variación del contenido y el tamaño de partícula de los agregados, y en las propiedades físicas y mecánicas de los especímenes preparados.

Realizar ensayos de conductividad térmica y pruebas de resistencia al fuego de los especímenes preparados.

Evaluar la adición de aditivos sobre las mezclas preparadas y su efecto sobre las propiedades del sistema

Adelantar estudios de microscopía electrónica de barrido que permitan estudiar con detalle la interacción interfacial entre los agregados, los residuos de vidrio y el plástico fundido.

Adelantar estudios de viabilidad económica del proceso presentado en este trabajo, tomando en cuenta los costos de los materiales y el costo energético.

5. CONCLUSIONES

A partir de residuos de plástico, vidrio y agregados se prepararon mezclas binarias y ternarias, y se elaboraron bloques de las mezclas fundidas a 240 °C. Se evaluaron las propiedades físicas (densidad) y mecánicas (resistencia a la compresión) de los especímenes preparados. Los resultados mostraron que la incorporación de residuos modifica las propiedades de los materiales preparados.

Se observó un aumento en la densidad y la resistencia a la compresión, siendo mayor en las muestras individuales con agregados; mientras que en las muestras que contenían adiciones de vidrio y agregados, se encontró una relación directamente proporcional al contenido de agregados, tendencia relacionada con la mayor densidad y rigidez de estos últimos en comparación al vidrio. La mayor resistencia a la compresión (alrededor de 18 MPa) se observó en el material preparado solo a partir de agregados.

Los resultados de la observación macroscópica de los especímenes, evidenció una buena interacción entre los agregados y el plástico, asociada con la mayor rugosidad del agregado, lo cual estuvo en concordancia con los resultados de la resistencia a la compresión.

La evaluación de la huella de carbono (representada en g CO₂/Kg de ladrillo) permitió evidenciar que la producción de ladrillos a partir de residuos de plástico y de vidrio genera una menor emisión de dióxido de carbono que el proceso tradicional, efecto directamente relacionado con el proceso de fabricación, que tiene un menor requerimiento energético dada la menor temperatura a la cual se efectúa el proceso.

DOI: <https://doi.org/10.21501/21454086.3725>

Los resultados de este trabajo evidencian el potencial que tiene la incorporación de residuos de vidrio y de plástico en la elaboración de ladrillos como una estrategia de valorización de estos residuos en beneficio del medio ambiente.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al proyecto INV2824 por el apoyo financiero en el desarrollo de este trabajo de investigación. F. Cardona, L. Rengifo, J. Guarín y D. Mazo, agradecen especialmente al semillero en materiales y estructuras. Universidad Cooperativa de Colombia.

7. CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran la inexistencia de conflicto de interés con institución o asociación comercial de cualquier índole.

8. REFERENCIAS

- [1] J. Hong, G. Q. Shen, Y. Feng, W. S. T. Lau, and C. Mao, "Greenhouse gas emissions during the construction phase of a building: A case study in China", *Journal of Cleaner Production*, vol. 103, pp. 249–259, 2015, http://ira.lib.polyu.edu.hk/bitstream/10397/36019/1/Hong_Jingke_2015.pdf
- [2] 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", *Journal of Building Engineering*, vol. 21, pp. 37–54, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.09.023>
- [3] L. Zhang, "Production of bricks from waste materials—A review", *Construction and Building Materials*, vol. 47, pp. 643–655, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.043>
- [4] A. L. Murmu and A. Patel, "Towards sustainable bricks production: An overview", *Construction and Building Materials*, vol. 165, pp. 112–125, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.038>
- [5] M. Sutcu, E. Erdogmus, O. Gencel, A. Gholampour, E. Atan, and T. Ozbakkaloglu, "Recycling of bottom ash and fly ash wastes in eco-friendly clay brick production", *Journal of Cleaner Production*, vol. 233, pp. 753–764, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.017>
- [6] S. Elavarasan, A. K. Priya, and V. K. Kumar, "Manufacturing fired clay brick using fly ash and M À Sand", *Materials Today Proceedings*, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.042>
- [7] Y. Chen, Y. Zhang, T. Chen, Y. Zhao, and S. Bao, "Preparation of eco-friendly construction bricks from hematite tailings," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 4, pp. 2107–2111, April 2011. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.025>
- [8] P. Indhiradevi, P. Manikandan, K. Rajkumar, and S. Logeswaran, "A comparative study on usage of cowdung ash and wood ash as partial replacement in flyash brick", *Materials Today Proceedings*, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.355>
- [9] M. Sutcu, H. Alptekin, E. Erdogmus, Y. Er, and O. Gencel, "Characteristics of fired clay bricks with waste marble powder addition as building materials", *Constr. Build. Mater.*, vol. 82, pp. 1–8, 2015, doi: [10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.02.055](https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.02.055)
- [10] O. Gencel, "Characteristics of fired clay bricks with pumice additive", *Energy and Buildings*, vol. 102, pp. 217–224, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.031>
- [11] A. Seco, J. Omer, S. Marcelino, S. Espuelas, and E. Prieto, "Sustainable unfired bricks manufacturing from construction and demolition wastes", *Cons-*

- truction and Building Materials, vol. 167, pp. 154–165, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.026>
- [12] S. Neves, C. Maurício, and F. Vieira, “On the production of fired clay bricks from waste materials: A critical update”, *Construction and Building Materials*, vol. 68, pp. 599–610, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.006>
- [13] P. Guo, W. Meng, H. Nassif, H. Gou, and Y. Bao, “New perspectives on recycling waste glass in manufacturing concrete for sustainable civil infrastructure”, *Construction and Building Materials*, vol. 257, pp. 119–579, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119579>
- [14] I. Almeshal, B. A. Tayeh, R. Alyousef, H. Alabduljabbar, and A. M. Mohamed, “Eco-friendly concrete containing recycled plastic as partial replacement for sand”, *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 3, pp. 4631–4643, 2020, doi: [10.1016/j.jmrt.2020.02.090](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.02.090)
- [15] J. O. Akinyele, U. T. Igba, and B. G. Adigun, “Effect of waste PET on the structural properties of burnt bricks”, *Scientific African*, vol. 7, p. e00301, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00301>
- [16] J. Roberts. “How to design masonry structures using Eurocode 6”. <https://www.brick.org.uk/admin/resources/d-eurocode-6-masonry-introduction.pdf> (accessed Aug. 20, 2020).
- [17] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, *NTC 4205. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos*, Colombia: editor, 2000.
- [18] J. O. Akinyele, U. T. Igba, T. O. Ayorinde, and P. O. Jimoh, “Structural efficiency of burnt clay bricks containing waste crushed glass and polypropylene granules”, *Case Studies in Construction Materials*, vol. 13, p. e00404, December 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00404>
- [19] A. Kumi-Larbi, D. Yunana, P. Kamsouloum, M. Webster, D. C. Wilson, and C. Cheeseman, “Recycling waste plastics in developing countries: Use of low-density polyethylene water sachets to form plastic bonded sand blocks”, *Waste Management*, vol. 80, pp. 112–118, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.003>
- [20] G. Syngros, C. A. Balaras, and D. G. Koubogiannis, “Embodied CO2 Emissions in Building Construction Materials of Hellenic Dwellings”, *Procedia Environmental Sciences*, vol. 38, pp. 500–508, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.113>
- [21] M. Dabaieh, J. Heinonen, D. El-Mahdy, and D. M. Hassan, “A comparative study of life cycle carbon emissions and embodied energy between sun-dried bricks and fired clay bricks”, *Journal Cleaner Production*, vol. 275, pp. 1–14, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122998>
- [22] W. Song, J. Yi, H. Wu, X. He, Q. Song, and J. Yin, “Effect of carbon fiber on mechanical properties and dimensional stability of concrete incorporated with granulated-blast furnace slag”, *Journal Cleaner Production*, vol. 238, pp. 1–11, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117819>
- [23] E. Crossin, “The greenhouse gas implications of using ground granulated blast furnace slag as a cement substitute”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 95, pp. 101–108, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.082>
- [24] D. J. Flower and J. G. Sanjayan, “Green house gas emissions due to concrete manufacture”, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 12, pp. 282–288, 2007, doi: <https://doi.org/10.1065/lca2007.05.327>
- [25] P. Van den Heede, E. Gruyaert, N. Robeyst, and N. De Belie, “Life Cycle Assessment of a Column Supported Isostatic Beam in High-Volume Fly Ash Concrete (Hvfa Concrete),” presented at the 2nd

DOI: <https://doi.org/10.21501/21454086.3725>

- Int. Symp. Serv. Life Des. Infrastruct., Delft, The Netherlands, Oct. 4-6, 2010, pp. 437–444, <https://biblio.ugent.be/publication/1266046>
- [26] U. Javed, R. A. Khushnood, S. A. Memon, F. E. Jalal, and M. S. Zafar, “Sustainable incorporation of lime-bentonite clay composite for production of ecofriendly bricks”, *Journal Cleaner Production*, vol. 263, p. 121469, August 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121469>
- [27] D. A. Ramos Huarachi, G. Gonçalves, A. C. de Francisco, M. H. G. Canteri, and C. M. Piekarski, “Life cycle assessment of traditional and alternative bricks: A review”, *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 80, 2019, p. 106335, April 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.106335>
- [28] N. G. Kulkarni and A. B. Rao, “Carbon footprint of solid clay bricks fired in clamps of India”, *Journal Cleaner Production*, vol. 135, pp. 1396–1406, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.152>
- [29] J. Hong, G. Q. Shen, Y. Feng, W. S. T. Lau, and C. Mao, “Greenhouse gas emissions during the construction phase of a building: A case study in China”, *Journal Cleaner Production*, vol. 103, pp. 249–259, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.023>
- [30] A. Ukwatta, A. Mohajerani, S. Setunge, and N. Eshtiaghi, “A study of gas emissions during the firing process from bricks incorporating biosolids”, *Waste Management*, vol. 74, pp. 413–426, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.006>
- [31] UPME, “Factores de emisión del sistema interconectado nacional Colombia 2015”, upme 2015, http://www1.upme.gov.co/siame/Documents/Calculo-FE-del-SIN/Documento_calculo_del_FE_SIN_2015_dic_2016.pdf (consultado en Ago., 25, 2020).
- [32] J. P. Valencia Villegas, A. M. González Mesa, and O. F. Arbelaez Perez, “Evaluación de las propiedades mecánicas de concretos modificados con microesferas de vidrio y residuos de llantas”, *Lámpsakos*, no. 22, pp. 16–26, 2019, doi: <https://doi.org/10.21501/21454086.3283>
- [33] N. Tamanna, R. Tuladhar, and N. Sivakugan, “Performance of recycled waste glass sand as partial replacement of sand in concrete”, *Construction Building Materials*, vol. 239, p. 117804, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117804>
- [34] U. Rajarathnam, V. Athalye, S. Ragavan, S. Maitihel, D. Lalchandani, S. Kumar, E. Baum, C. Weyant, and T. Bond, “Assessment of air pollutant emissions from brick kilns”, *Atmospheric Environment*, vol. 98, pp. 549–553, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.08.075>
- [35] S. Iftikhar, K. Rashid, E. Ul Haq, I. Zafar, F. K. Alqahtani, and M. Iqbal Khan, “Synthesis and characterization of sustainable geopolymer green clay bricks: An alternative to burnt clay brick”, *Construction and Building Materials*, vol. 259, p. 119659, October 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119659>
- [36] L. F. Cabeza, C. Barreneche, L. Miró, J. M. Morera, E. Bartolí, and A. Inés Fernández, “Low carbon and low embodied energy materials in buildings: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 23, pp. 536–542, April 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.017>