

Estudio del impacto ambiental de geopolímeros de arcilla

Calderón-Peñañiel J.C.^a, Palumbo M.^b, Rosell J.R. ^a

^a Departamento de Tecnología de la Arquitectura, Universitat Politècnica de Catalunya UPC, Campus Sud, Barcelona, Spain;

^b Departament d'Enginyeria Química, Universitat Rovira i Virgili, Av. Paisos Catalans 26, Tarragona, Spain.
juan.carlos.calderon@upc.edu

En los últimos años, la problemática ambiental ha impulsado la investigación de materiales alternativos que ayuden a aminorar el impacto derivado de la construcción. En este contexto, los materiales alcalinamente activados se han presentado como una alternativa interesante a materiales convencionales que incorporan gran cantidad de energía. A diferencia de trabajos previos, el objetivo de esta investigación fue evaluar el impacto ambiental incorporado de bloques experimentales de arcilla “geopolimerizada”, tomando en cuenta su resistencia a la compresión y comparándolos con ladrillos de arcilla cocida y bloques de tierra comprimida (BTC). Para la fabricación de los bloques experimentales de arcilla “geopolimerizada” se usó arcilla natural, no expuesta a procesos previos de deshidroxilación, con un contenido de 49% en peso de caolinita y un activador alcalino basado en NaOH. En el proceso de fabricación, las mezclas fueron expuestas a temperaturas que oscilaron entre 80 y 120°C durante 2 a 24 horas. Los ladrillos experimentales de arcilla “geopolimerizada”, con la formulación adecuada, alcanzaron resistencias a la compresión superiores a 20MPa con una reducción del 80-90% del impacto ambiental en comparación con los ladrillos comunes de arcilla cocida.

Palabras clave: geopolímeros de arcilla, activación alcalina, resistencia a la compresión, impacto ambiental, análisis del ciclo de vida.

1. Introducción

La energía ha sido y es el principal recurso para la fabricación de materiales modernos. Durante siglos, las materias primas naturales se han transformado en productos procesados invirtiendo cada vez más energía y produciendo mayores impactos ambientales. Hoy, la actividad en el sector de la construcción representa una grave amenaza para el medio ambiente. Consume la mayoría de los recursos naturales y es responsable del 30% de las emisiones de dióxido de carbono [1]. Desde su construcción hasta su demolición, los edificios consumen el 40% de la energía producida en todo el mundo [2].

Para la reducción del impacto ambiental inherente a la construcción, es importante reducir no solo la demanda de energía operativa sino también su energía incorporada, eligiendo con precisión los materiales de construcción [3]. En este contexto, el creciente énfasis en la conservación y protección del medio ambiente ha impulsado la búsqueda de alternativas para reemplazar los materiales que incorporan grandes cantidades de energía.

Por otra parte, la resistencia a la compresión es una de las propiedades mecánicas más importantes de los materiales de construcción [4]. Por tanto, el desafío ha sido (y sigue siendo) desarrollar materiales resistentes con un menor costo ambiental. En este sentido, los geopolímeros se presentan como una alternativa a los materiales convencionales de construcción, ya que ofrecen características de

resistencia sobresalientes con menor energía incorporada [5].

Este estudio se centró en la evaluación del impacto ambiental incorporado de bloques experimentales de arcilla fabricados mediante procedimientos análogos a la geopolimerización. Geopolimerización es el término utilizado para referirse a la reacción química que ocurre cuando se mezclan aluminosilicatos con activadores alcalinos concentrados (o menos comúnmente con ácidos), generalmente hidróxidos alcalinos, que forman una nueva red molecular y un nuevo material: “geo-polí-mero” [6]. Para la fabricación de geopolímeros se utilizan aluminosilicatos (materias primas ricas en Al_2O_3 y SiO_2). Estos materiales juegan un papel importante como fuentes de iones Al^{3+} y Si^{4+} . Comúnmente es preferible que la fuente de aluminosilicatos esté compuesta por más del 70% de alúmina y sílice en fase amorfa[7].

Así, para la fabricación de geopolímeros se han utilizado diferentes tipos de materia prima. Las más utilizadas hasta la fecha son las cenizas volantes, la escoria de alto horno y otros materiales ricos en aluminosilicatos altamente reactivos. Los geopolímeros fabricados a partir de estos materiales precursores generalmente tienen un rendimiento mecánico sobresaliente con bajo impacto ambiental[8].

La arcilla también es una fuente alternativa de aluminosilicatos para la fabricación de geopolímeros.

En la mayoría de los casos, se le somete a un proceso previo de alteración térmica que amplifica las características reactivas naturales del material. Este es el caso del metacaolín, caolín calcinado a temperaturas que oscilan entre 550 y 700°C [9].

Los estudios sobre geopolimerización de arcilla natural no calcinada son escasos porque los aluminosilicatos en arcillas crudas son menos reactivos que en arcillas calcinadas. Sin embargo, la alta disponibilidad de arcilla justifica su estudio como fuente de aluminosilicatos en la fabricación de geopolímeros. Si bien existen múltiples investigaciones previas sobre "activación alcalina" de arcillas, en ninguna se consideró el impacto ambiental incorporado de los materiales precursores en el diseño y la selección de formulaciones y métodos de fabricación.

Esta investigación se centró en la evaluación del impacto ambiental causado por la fabricación de bloques experimentales de arcilla geopolimerizada, fabricados en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona. Se utilizó la resistencia a la compresión como unidad funcional y se compararon los datos obtenidos con los de materiales de construcción de arcilla comúnmente utilizados: ladrillos cocidos y bloques de tierra comprimida (BTC).

2. Materiales y métodos

La arcilla (Clay BEIG PEN/F) suministrada por *Argiles Colades S.A., de La Bisbal d'Empordà*, (Girona-España) fue el material base que se utilizó como fuente de aluminosilicatos inorgánicos. Las composiciones químicas obtenidas por análisis de Fluorescencia de Rayos X (FRX) se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química de la arcilla (expresado en %)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂
59.87	22.87	6.33	0.02	1.04
CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	MgO	Na ₂ O
0.73	1.38	0.06	0.61	0.32

El tamaño de partícula fue igual o inferior a 125µm y fue determinado mediante análisis del tamaño de partículas por difracción láser (ADL). Como material de relleno se utilizó arena (arena silíceo –estándar– L-105115, suministrada por Àrids per a la Indústria i la Depuració, S.L., Barcelona), con el objetivo de mejorar la trabajabilidad de las mezclas. Su contenido de SiO₂ fue ≥ 98,5% y su tamaño de partícula inferior a 250µm.

Para propiciar la reacción química que da paso a la geopolimerización se usó una solución alcalina. Esta se preparó usando agua desionizada (conductividad eléctrica $\sigma = 5,49 \text{ uSm}^{-1}$), gránulos de hidróxido de sodio NaOH y, en algunos casos, Na₂SiO₃. Se preparó una solución alcalina disolviendo gránulos de NaOH en agua desionizada (con una concentración molar que varió entre 5M y 10M). La solución se mezcló durante 5 minutos a 2000 rpm usando un agitador magnético y luego se dejó enfriar a temperatura ambiente durante 24 horas en recipientes herméticos. En algunas mezclas, se añadió Na₂SiO₃ después del tiempo de enfriamiento siguiendo el procedimiento descrito anteriormente.

La arcilla y la arena fueron mezcladas durante 2 minutos a 140 rpm usando un mezclador de mortero automático. Luego, se añadió la solución alcalina y se mezcló todo durante cinco minutos adicionales a 285 rpm. La mezcla se colocó en moldes de acero inoxidable de 4x4x16cm y se expuso a temperatura según cada caso. Las mezclas se retiraron del horno, se desmoldaron y se dejaron enfriar. Luego de estar expuestas a 25°C y a 60% de humedad relativa durante 14 días, las probetas fueron sometidas a ensayos de resistencia a compresión. Para los ensayos de resistencia a la compresión, se realizaron pruebas en todas las muestras (con 6 réplicas de cada muestra) y se utilizaron como referencia las normas UNE-EN (196-1, 772-1, 12390-3, 1015-11 y 12390-4).

El impacto ambiental incorporado de los bloques experimentales de arcilla geopolimerizada se midió utilizando la metodología de evaluación del ciclo de vida (ACV). El objetivo del ACV era doble. Primero, evaluar qué combinación de las composiciones y los procesos de producción probados en el laboratorio, simultáneamente, tuvieron un mejor desempeño ambiental y mecánico. En segundo lugar, evaluar los impactos ambientales asociados a la producción de bloques experimentales en comparación con productos de construcción de arcilla existentes, como ladrillos de arcilla cocida y bloques de tierra comprimida (BTC). Por lo tanto, el alcance del análisis ACV se limitó al proceso de producción, teniendo en cuenta los impactos asociados con las materias primas utilizadas en cada caso y la energía consumida durante el proceso de producción. La energía consumida durante el proceso de producción se estimó bajo la hipótesis de que los bloques experimentales se fabricaron a escala industrial. Estas estimaciones se basan en la producción industrial de ladrillos calcinados pero están adaptados a las temperaturas y tiempos necesarios para garantizar la geopolimerización de los bloques experimentales en

el laboratorio. Para determinar los impactos ambientales asociados se utilizó el modelo del sistema de punto de sustitución en la base de datos 3.4 de Ecoinvent. Los resultados obtenidos se expresaron utilizando el método de ponderación ReCiPe (puntos finales). En la Tabla 2 se observan las formulaciones de las muestras que obtuvieron los mejores resultados. Las mezclas GEO-B se fueron expuestas a 80°C durante 24h, las mezclas P06-03 y P06-04 fueron expuestas a 110°C durante 7 y 24 horas respectivamente, las muestras P07 fueron expuestas a 100°C durante 4 horas.

Tabla 2. Cuadro de mezclas de las muestras que obtuvieron los mejores resultados

Muestra	Arcilla	Arena	Agua	NaOH	Na ₂ SiO ₃
GEO-B01	1.00	1.00	0.30	0.12	0.00
GEO-B02	1.00	1.00	0.30	0.06	0.00
P06-03	1.00	1.00	0.30	0.12	0.08
P06-04	1.00	1.00	0.30	0.12	0.08
P07-01	1.00	1.00	0.30	0.12	0.08
P07-04	1.00	1.00	0.30	0.12	0.08

3. Resultados

Los resultados del análisis del comportamiento ambiental de los bloques de arcilla geopolimerizada se presentan en el gráfico de la Fig. 1. Las diversas mezclas y métodos de fabricación que se incluyeron en el análisis se compararon en cuanto a su impacto ambiental (eje y) y resistencia a la compresión (eje x). Los resultados se presentan utilizando los puntos totales del método de ponderación ReCiPe para facilitar la comparación. Las formulaciones óptimas, es decir, aquellas formulaciones a partir de las cuales no es posible mejorar uno de los parámetros sin empeorar uno de los otros dos, constituyen la frontera de Pareto. Estas se resaltan utilizando marcadores más oscuros en el gráfico de la Fig. 1.

Se encontró que 3 formulaciones experimentales son óptimas (marcas más oscuras en la Fig. 1). El impacto ambiental que se toma en cuenta incluye dos fuentes principales: el impacto incorporado de las materias primas y el impacto del uso de energía durante la fabricación. Se encontró que el primero era más significativo que el último, siendo la mayor parte del impacto debido a los aditivos utilizados (NaOH y Na₂SiO₃). De las soluciones óptimas, GEO-B02 es la muestra que presenta el menor impacto ambiental, ya que se produce a 80°C e incorpora bajas cantidades de NaOH (3% de peso seco). Sin embargo, también es la muestra en la frontera de Pareto con menor resistencia a la

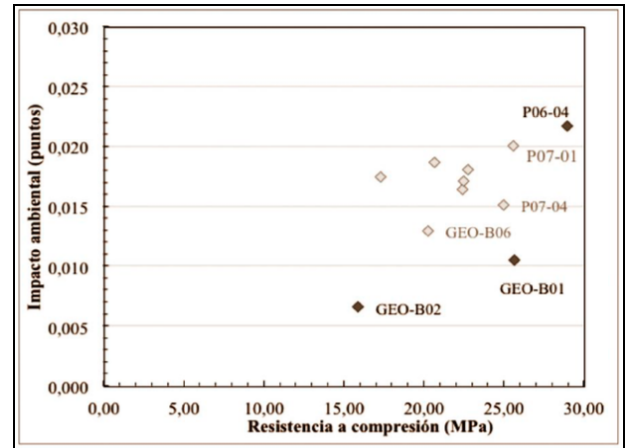


Figura 1. Comparación del impacto ambiental en relación a la resistencia a compresión de las diferentes muestras analizadas.

compresión (15.9MPa). GEO-B01 es la muestra que tiene un rendimiento más equilibrado, ya que su impacto ambiental sigue siendo bajo y su resistencia a la compresión es de 25.8MPa, lo que es más alta que el promedio de ladrillos de arcilla cocida. La muestra P06-04 es la que tiene la mayor resistencia a la compresión (29MPa) y también el mayor impacto ambiental. Con respecto a GEO-B01, la resistencia a la compresión se incrementa en un 11% y el impacto ambiental en un 52%. Las principales diferencias en el proceso de producción entre las muestras GEO-B01 y P06-04 fueron la adición de Na₂SiO₃ en la mezcla y el cambio de temperatura de 80°C a 110°C. Los resultados muestran que la mejora de las propiedades mecánicas no está vinculada con un aumento del impacto ambiental incorporado, lo que demuestra el interés en integrar el análisis ACV desde las etapas iniciales en el diseño del material.

En la Fig. 2, se exponen las formulaciones de los bloques de arcilla geopolimerizada de acuerdo su contenido de aditivos (eje X) y a su energía incorporada (eje y). El tamaño de las burbujas corresponde a la resistencia a la compresión; Las soluciones óptimas se destacan en naranja. Los resultados muestran que la energía incorporada depende en gran medida del contenido de aditivos. Es notable que dos de las soluciones óptimas (GEO-B02 y P06-04) sean soluciones extremas, con el contenido más bajo y más alto de aditivos y el impacto ambiental más bajo y más alto, respectivamente. Esto revela el rol que desempeñan los aditivos en el impacto ambiental de las muestras.

En la Fig. 3 se compara la cantidad total de aditivos (eje x) con la resistencia a la compresión (eje y). El tamaño de las burbujas corresponde al tiempo de exposición a temperatura: parámetro que se

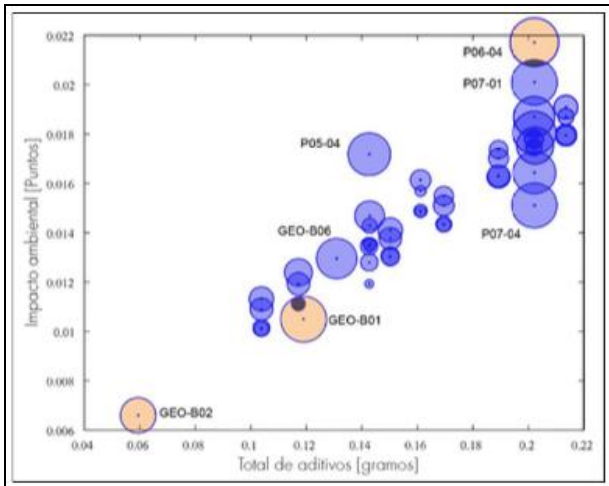


Figura 2. Efecto de la dosificación de aditivos sobre el impacto ambiental.

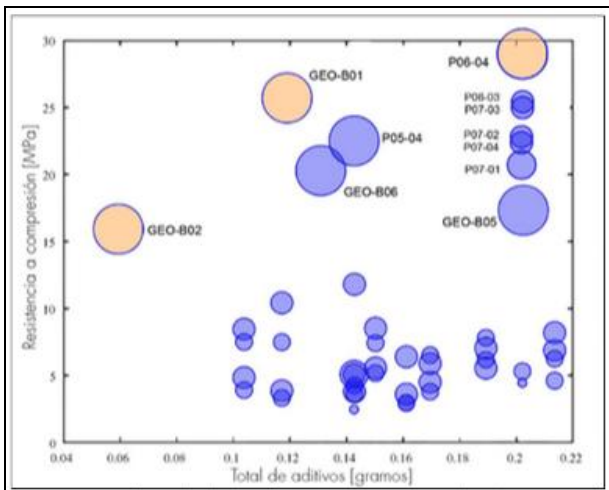


Figura 3. Efecto de la dosificación de aditivos sobre la resistencia a la compresión.

encontró que tuvo una influencia significativa en los resultados. Las muestras se dividen en dos grupos: las burbujas más pequeñas representan las muestras expuestas a temperatura durante 2, 4 y 7 horas y corresponden a las muestras con resistencias a la compresión inferiores a 15MPa. Estas caen en la parte inferior del gráfico. Las burbujas más grandes, que son las que se exponen a temperatura durante 24 horas, se ubican en la parte superior del gráfico (>15MPa). Todas las soluciones óptimas están en este segundo grupo. Solo cinco muestras expuestas a temperatura menos de 24 horas mostraron una buena resistencia a la compresión (P07-01 a P07-04 y P06-03). Esto se debe al menor contenido de agua de estas muestras.

Las mezclas y los métodos de fabricación óptimos se compararon con productos de construcción similares en el mercado por ser fabricadas a base de arcilla, es

decir, un ladrillo de arcilla cocida promedio y un bloque de tierra comprimida (BTC). Para esta comparación, la unidad funcional se normalizó con la resistencia a la compresión para comparar el impacto de las unidades del material que ofrecen el mismo rendimiento (es decir el impacto ambiental de un muro macizo que soporta 200 kg/mL).

En los resultados que se muestran en la Fig. 4, el impacto ambiental (eje y) se divide en cuatro categorías: salud humana, ecosistema, agotamiento de recursos y cambio climático (con respecto a puntos finales de ReCiPe). Para cada categoría, se distinguen los impactos correspondientes a las materias primas (barras sólidas) y al consumo de energía durante la fabricación (barras rayadas).

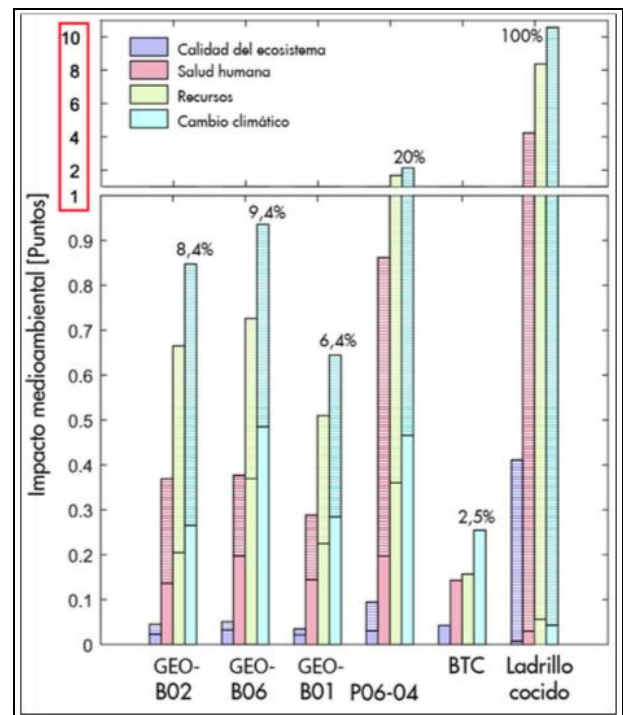


Figura 4. Impacto ambiental de un muro macizo que soporta 200kg/mL.

Por unidad funcional el bloque de tierra comprimida (BTC) fue la mejor opción ambiental. Sin embargo, la resistencia mecánica, notablemente más baja, implicaría muros de gran espesor que representarían un problema en lugares en donde se necesita optimizar el área de construcción y/o soportar grandes cargas. El impacto ambiental de ladrillos cocidos es el más alto. Por lo tanto, cualquiera de las formulaciones óptimas de los bloques de arcilla geopolimerizada sería una mejor opción que el ladrillo común de arcilla cocida.

4. Conclusiones

Mediante el análisis del impacto ambiental se determinó que los bloques experimentales de arcilla geopolimerizada presentan bajos niveles de energía incorporada en comparación con bloques de arcilla cocida. El uso de materiales de arcilla geopolimerizada se traduce en una reducción del 80% al 94% del impacto ambiental en comparación con los ladrillos de arcilla cocida.

El bloque de tierra comprimida (BTC) fue el material con menor impacto ambiental de la comparativa hecha con el ladrillo cocido, sin embargo, su resistencia es baja (3-4MPa).

También se observó que la mejora en el rendimiento mecánico de los bloques de arcilla polimerizada no está necesariamente vinculada a un aumento en su impacto ambiental, lo que demuestra la importancia de incluir el análisis de este parámetro en una etapa temprana en el diseño del material. Se podría obviar el uso de Na_2SiO_3 o controlar la temperatura y el tiempo de exposición para reducir aún más el impacto ambiental. Es importante señalar que, en comparación con los materiales de construcción fabricados a temperaturas superiores a 1000°C , los ladrillos experimentales de arcilla geopolimerizada requieren una temperatura diez veces menor (80°C - 100°C), alcanzable incluso con energía solar.

Mediante los resultados del análisis del impacto ambiental se confirma la hipótesis de esta investigación: los principios de geopolimerización pueden ser aplicados a la fabricación de materiales de arcilla natural, incrementando notablemente su desempeño mecánico (25-30MPa) con una gran reducción de los niveles de impacto ambiental en comparación a los ladrillos de arcilla cocida (80-94%).

Agradecimientos

Este estudio ha sido apoyado por la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) – Ecuador, el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y la *Universitat Rovira i Virgili* (URV) (FJCI-2016-28789). Los autores desean agradecer el apoyo financiero del Ministerio de Economía y Competitividad español

BIA2017-83912-C2-1-R, RTI2018-093849-B-C33 (MINECO / FEDER) y CTQ2016-77968 (MINECO / FEDER)) y el Agencia Estatal de Investigación (BIA2017-88401-R). Los autores desean agradecer al Gobierno catalán por la acreditación de calidad otorgada a sus grupos de investigación (2017SGR1758 y 2017 SGR 1409).

Referencias

- [1] Sinha, R., Lennartsson, M., & Frostell, B. (2016). *Environmental footprint assessment of building structures: A comparative study*. Building and Environment, pp. 104, 162–171.
- [2] Thormark, C. (2006). *The effect of material choice on the total energy need and recycling potential of a building*. Building and Environment, 41(8), 1019–1026. p. 1025.
- [3] Cabeza, LF, Barreneche, Miró, L., Morera, JM, Bartolí, E, & Fernández, A. Inés. (2013). *Low carbon and low embodied energy materials in buildings: a review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 23, 536–542. p. 538
- [4] Komnitsas, K. A. (2011). *Potential of geopolimer technology towards green buildings and sustainable cities*. Procedia Engineering, 21, 1023–1032.
- [5] Davidovits, J. (2015). *Geopolymer, Chemistry and Applications*. (J. Davidovits, Ed.) (4th ed.). Saint-Quentin: Institut Géopolymère.
- [6] Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2009). *Geopolymers. Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*. CRC Press, Woodhead Publishing, Great Abington, Cambridge, UK.
- [7] Liew, Y. M., Heah, C. Y., Mohd Mustafa, A. B., & Kamarudin, H. (2016). *Structure and properties of clay-based geopolimer cements: A review*. Progress in Materials Science, 83, 595–629. p. 597
- [8] Passuello, A., Rodríguez, E. D., Hirt, E., Longhi, M., Bernal, S. A., Provis, J. L., & Kirchheim, A. P. (2017). *Evaluation of the potential improvement in the environmental footprint of geopolymers using waste-derived activators*. Journal of Cleaner Production, 166, 680–689.
- [9] Wan, Q., Rao, F., & Song, S. (2017). *Reexamining calcination of kaolinite for the synthesis of metakaolin geopolymers - roles of dehydroxylation and recrystallization*. Journal of Non-Crystalline Solids, 460, 74–80.