

Recibido: 16 mayo 2024
Aceptado: 16 septiembre 2024
Disponible: 15 octubre 2024

©Instituto Tecnológico Metropolitano
Este trabajo está licenciado bajo
una Licencia Internacional
Creative Commons Atribución
(CC BY-NC-SA)



Bloque de baja conductividad térmica a partir de un concreto geopolimérico híbrido basado en cenizas volantes y otros residuos industriales

Low Thermal Conductivity Block from a Hybrid
Geopolymer Concrete based on Fly Ash and other
Industrial Wastes

 Fabio Martínez-Gutiérrez¹;
 William Gustavo Valencia-Saavedra²;
  Ruby Mejía-de-Gutiérrez³

¹Universidad del Valle, Cali – Colombia
fabio.martinez@correounivalle.edu.co

²Universidad del Valle, Cali - Colombia
william.gustavo.valencia@correounivalle.edu.co

³Universidad del Valle, Cali - Colombia
ruby.mejia@correounivalle.edu.co

Cómo citar / How to cite

F. Martínez-Gutiérrez, W. G. Valencia-Saavedra, and R. Mejía-de-Gutiérrez, “Bloque de baja conductividad térmica a partir de un concreto geopolimérico híbrido basado en cenizas volantes y otros residuos industriales,” *Tecnológicas*, vol. 27, no. 61, e3102, 2024.
<https://doi.org/10.22430/22565337.3102>

Resumen

La utilización de cementantes alternativos y el aprovechamiento de residuos industriales, como materiales suplementarios o agregados en la producción de concretos y elementos estructurales que garanticen buenas prestaciones mecánicas, disminución de la carga muerta y un elevado confort térmico, están en concordancia con los principios de economía circular en el sector de la construcción. Por ello, el objetivo de esta investigación fue desarrollar un cemento híbrido basado en la activación alcalina con sulfato de sodio (NS) de una mezcla de ceniza volante (CV), humo de sílice (HS) y cemento portland de uso general (OPC, por sus siglas en inglés), en proporciones (CV+HS)/OPC del 70/30 %. La metodología empleada consistió en desarrollar el cementante híbrido, el cual fue clasificado como de moderado calor de hidratación (tipo MCH), y posteriormente utilizarlo, en proporciones de 500 kg/m³ y 600 kg/m³ para producir concretos estructurales incorporando en la mezcla agregados reciclados gruesos (AGR) y finos (AFR), obtenidos a partir de residuos de construcción y demolición (RCD). La mezcla 600 R a 28 días de curado alcanzó un valor de 18,9 MPa, y reportó un módulo de elasticidad de 27 GPa. Este concreto se validó en la producción de bloques perforados estructurales y, con el fin de mejorar el confort térmico de los concretos, se realizó sustitución del 10 % y 20 % en volumen de agregado fino reciclado por corcho reciclado. La introducción de corcho en la mezcla, aunque redujo la resistencia a compresión del bloque en un 29 %, permitió disminuir la conductividad térmica en un 32 %. Basado en los resultados obtenidos, se concluye que el uso de un 10 % en volumen de corcho como reemplazo del agregado fino en la mezcla de concreto híbrido permite obtener un bloque estructural con características de confort térmico. Las proporciones de la mezcla considerada óptima fueron de 52,5 CV+17,5 HS+30 OPC, 4 % NS, 70 % AGR, 20 % AFR, y 10 % corcho.

Palabras clave

Geopolímero, ceniza volante, sulfato de sodio, bloque estructural, conductividad térmica.

Abstract

The use of alternative cementitious materials and the use of industrial waste as supplementary materials or aggregates in the production of concrete and structural elements that guarantee good mechanical performance, reduced dead load, and high thermal comfort are in line with the principles of circular economy in the construction sector. Therefore, the objective of this research was to develop a hybrid cement based on alkaline activation with sodium sulfate (NS) of a mixture of fly ash (CV), silica fume (HS) and ordinary Portland cement (OPC), in proportions (CV+HS)/OPC of 70/30 %. The methodology used consisted of developing the hybrid cementitious material, which was classified as having moderate heat of hydration (MCH type), and subsequently using it, in proportions of 500 and 600 kg/m³, to produce structural concretes incorporating coarse recycled aggregates (AGR) and fine recycled aggregates (AFR) in the mixture, obtained from construction and demolition waste (CDW). The 600 R concrete mixture reached a compressive strength of 18.9 MPa after 28 days of curing and reported a modulus of elasticity of 27 GPa. This concrete was validated in the production of perforated structural blocks, and to improve the thermal comfort of the concrete, 10 % and 20 % of the volume of recycled fine aggregate was replaced with recycled cork. The introduction of cork in the mixture, although it reduces the compressive strength of the block (29 %), allows to reduce the thermal conductivity by 32 %. Based on the results obtained, it is concluded that the use of 10 % of cork volume as a replacement for fine aggregate in the hybrid concrete mix allows the obtaining of a structural block with thermal comfort characteristics. The mixture considered optimal according to the results obtained was composed of 52.5 CV+17.5 HS+30 OPC, 4 % NS, 70 % AGR, 20 % AFR, and 10 % cork.

Keywords

Geopolymer, fly ash, sodium sulfate, structural block, thermal conductivity.

1. INTRODUCCIÓN

El concreto a base de cemento Portland ordinario (OPC por sus siglas en inglés) es uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción. En promedio se produce aproximadamente una tonelada de hormigón cada año por cada ser humano en el mundo, por lo que es imperativo considerar el impacto ambiental generado en su proceso de producción, y de manera especial las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y el consumo energético asociado a la producción del cemento portland (OPC) [1]. Debido a esto, en los últimos años se viene investigando la opción de reemplazar parcial o totalmente el cemento por otros materiales aglutinantes alternativos que, contribuyendo a un mayor sostenimiento ambiental y energético, reportan un desempeño igual o superior al del OPC. Entre estos materiales han surgido los cementos activados alcalinamente y geopoliméricos.

El término geopolímero surgió en 1970 y se asoció al producto de la reacción química de silicatos alcalinos con algunos precursores tipo aluminosilicatos que dan lugar a la formación de cadenas poliméricas de Si-O-Al [2]. Estos materiales se destacan por la baja permeabilidad, buena resistencia mecánica, buena durabilidad (resistencia a altas temperaturas, resistencia a la corrosión química y al medio ambiente), entre otras propiedades. En la actualidad, se han realizado estudios sobre los mecanismos y cinética de reacción de la síntesis geopolimérica, las microestructuras y propiedades mecánicas, así mismo se han estudiado diversos tipos de materiales precursores que se pueden utilizar para sintetizar un geopolímero, tales como cenizas volantes, lodos rojos, cenizas de biomasa, desechos de la industria metalúrgica, vidrio reciclado, entre otros [3]-[6]. El número de aplicaciones de los geopolímeros se ha ampliado en estos últimos diez (10) años a muchos campos, tales como la ingeniería, medicina, mineralogía, geología, ciencia coloidal, química inorgánica moderna, química física, con ejemplos en diferentes sectores industriales, entre estos se han desarrollado materiales cerámicos de bajo costo, materiales de construcción sostenibles, materiales de reparación, recubrimientos, aislamiento térmico, materiales porosos, entre otros [2].

Uno de los precursores de los geopolímeros más utilizados es la ceniza volante (CV) o fly ash en inglés (FA), la cual es un subproducto de la combustión del carbón pulverizado en centrales termoeléctricas y calderas industriales; este es considerado un residuo ecológicamente problemático ya que su contacto genera cambios indeseables en las características medioambientales, lo cual afecta negativamente a los seres vivos. Existe por tanto un interés en desarrollar nuevos métodos de reciclaje para la CV, evitando que permanezcan en los depósitos donde es acumulada y ubicada al aire libre; una aplicación que se viene estudiando actualmente es la incorporación de estas cenizas volantes en concretos híbridos [7], [8]. Tal es el caso de la investigación para producir aglomerantes de bajo calor de hidratación [9], en donde se utilizaron cenizas volantes clase F (CVF) y C (CVC), con un nivel de reemplazo del OPC del 70 % en masa, y un agente activador en polvo, sulfato de sodio de grado reactivo al 3 % y 5 % en peso respecto a la masa del aglutinante, además de una relación líquido/sólido (L/S) de 0,40; los autores concluyeron que la resistencia a edad temprana fue superior para las mezclas CVC-OPC comparado con las mezclas CVF-OPC y mediante ensayos DRX confirmaron la presencia de portlandita y ettringita. Otros autores en sus investigaciones han trabajado con mezclas de activadores sólidos como sulfato de sodio e hidróxido de calcio en polvo o mezclas de hidróxido de sodio y silicato de sodio para activar cenizas volantes en sistemas híbridos con contenidos bajos de OPC (30-20 % en peso), considerando que la presencia de OPC en la mezcla favorece la disolución de la ceniza volante debido al calor liberado durante la hidratación del cemento por lo cual se alcanza endurecimiento y resistencias adecuadas a temperatura ambiente [10]-[12].

En el marco de la aplicación de los principios de economía circular, el reemplazo parcial o total del cemento Portland por diferentes materiales suplementarios, como es el caso de la ceniza volante, contribuye desde el punto de vista ambiental con un menor gasto energético, menor huella de carbono, bajo consumo de combustibles, electricidad y recursos naturales. Adicionalmente el aprovechamiento de residuos de construcción y demolición (RCD) como agregados reciclados y de residuos de corcho de la industria de aglomerados se espera garanticen buenas prestaciones mecánicas, disminución de la carga muerta y un elevado confort térmico para aplicaciones constructivas [6], [13]. En particular, el confort térmico toma en cuenta diversos factores, entre los cuales el clima exterior (humedad ambiental, temperatura, flujo de aire, radiación solar, entre otros) y la actividad física que realice la persona al interior del recinto son importantes, por tanto, la elección adecuada de materiales en el proceso constructivo, su diseño y la envolvente de la vivienda son criterios fundamentales para tomar en consideración.

El presente proyecto de investigación aplicada busca satisfacer las necesidades actuales de la sociedad, en la industria de la construcción, a un menor costo ecológico, particularmente en el desarrollo de los llamados concretos verdes que hacen uso de subproductos industriales (Residuos industriales no-peligrosos, RINP) y protegen el consumo excesivo de los recursos naturales. En este sentido se consideran los criterios de sostenibilidad planteados por el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS), el cual recomienda el manejo eficiente de materiales, residuos y la calidad del ambiente al interior de edificaciones implementando características como el confort térmico, uso de materias primas alternativas e incorporación de materiales reciclados para hacer verde un proyecto [14].

Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo de este estudio fue desarrollar un concreto híbrido, al mezclar CV en elevados porcentajes con OPC y posteriormente, utilizando un activador de carácter sólido, producir un bloque de concreto geopolimérico híbrido de tipo estructural, que garantice la obtención de las propiedades exigidas según la norma NTC 4026 [15]. Además, se propuso a partir de este tipo de concreto lograr un material prefabricado que garantice un confort térmico en las edificaciones, para lo cual se seleccionó la adición de un material con características aislantes como el corcho, el cual también es un residuo industrial.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 Selección y caracterización de materiales

En el presente estudio se utilizó como precursor de los sistemas híbridos de activación alcalina una ceniza volante (CV), procedente de una industria ladrillera de la región. La composición química de CV, determinada por fluorescencia de rayos X en un espectrómetro Phillips PANalytical MagiX-Pro PW 2440 con potencia máxima de 4 kW, es incluida en la Tabla 1. La sumatoria de los óxidos de sílice, aluminio y hierro es aproximadamente del 88,98 % y acorde a la norma NTC 3493 [16] (homóloga a ASTM C618) (70 % mínimo) se puede clasificar como una ceniza volante tipo F. La composición química del humo de sílice (HS), empleado como reemplazo de CV, está incluida en la Tabla 1, se destaca el alto contenido de sílice (87,60 %). Como fuente de calcio para la fabricación de los sistemas híbridos, se utilizó un cemento portland de uso general (OPC), cuyas características indican que corresponde a un cemento altamente adicionado, en este caso con un material calizo.

Tabla 1. Composición química y tamaño de partícula de la CV, OPC y HS (%). Fuente: elaboración propia.

Componente	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	MgO	Na ₂ O	Otros	LOI	Tamaño medio de partícula (µm)
CV	59,03	23,97	5,98	1,21	0,74	0,31	0,19	2,22	6,35	24,89
OPC	17,99	3,88	4,76	0,32	62,28	1,71	0,23	0,66	8,17	21,65
HS	87,60	0,38	0,66	2,36	0,57	3,67	1,26	0,01	3,49	21,50

El tamaño medio de partícula D (4,3), determinado por la técnica de granulometría láser en un equipo Mastersizer 2000, fue de 24,89 µm, 21,50 µm y 21,65 µm, para CV, HS y OPC respectivamente. Cabe anotar que la determinación del tamaño de partícula del HS por esta técnica arroja un valor más elevado que el reportado en la ficha técnica del producto (0,1 µm), esto se debe a la aglomeración de las partículas durante el proceso de ensayo. Como activador alcalino se utilizó sulfato de sodio (Na₂SO₄) de uso industrial.

La Tabla 2 presenta las principales características de los agregados naturales y reciclados obtenidos a partir de una muestra de residuos de construcción y demolición (RCD). Los agregados reciclados presentaron altos niveles de absorción; 8,96 % (NTC 237 [17] homóloga a ASTM C128) para el agregado fino reciclado (AFR) y 5,82 % (NTC 176 [18] homóloga a ASTM C127) para el caso del agregado grueso reciclado (AGR). El tamaño máximo del AGR fue de 25,4 mm y el módulo de finura del AFR fue de 3,17 (arena gruesa) (NTC 77 [19] homóloga a ASTM C136). La resistencia al desgaste del AGR fue del 28,2 %, siendo posible su uso en la producción de mezclas de concreto teniendo en cuenta este valor y los estipulado por la NTC 98 [20] (homóloga a ASTM C131). El contenido de materia orgánica (NTC 127 [21] homóloga a ASTM C40) del AFR fue el mínimo (organic plate No. 1), permitiendo su uso en mezclas de morteros y/o concretos.

Tabla 2. Propiedades físicas de los agregados naturales y reciclados. Fuente: elaboración propia.

Propiedad física	Agregados naturales		Agregados reciclados		Corcho
	Agregado fino, FNA	Agregado grueso, CNA	Agregado fino, FRA	Agregado grueso, CRA	
Masa unitaria compacta [kg/m ³]	1643,78	1574,49	1440,37	1520,24	79,89
Vacíos [%]	33,58	40,88	34,46	34,31	50,56
Masa unitaria suelta [kg/m ³]	1578,55	1443,81	1317,86	1343,94	70,65
Vacíos [%]	36,21	45,79	40,04	41,93	56,28
Densidad aparente [g/cm ³]	2,48	2,67	2,20	2,32	0,16
Absorción [%]	3,77	3,25	8,96	5,82	61,87

Para producir el concreto de referencia, basado en 100 % OPC, se emplearon agregados naturales, los cuales, a diferencia de los reciclados, presentan bajos porcentajes de absorción (3,8 % para el agregado fino natural (AFN) y 3,3 % para el agregado grueso natural (AGN), tal como se puede apreciar en los resultados reportados en la Tabla 2. AGN presentó un tamaño máximo de 19 mm y AFN un módulo de finura de 2,63.

Con el objeto de reducir la conductividad térmica de los especímenes de concreto se empleó corcho; este material presentó un módulo de finura de 3,59, y dadas sus características físicas un porcentaje de absorción bastante elevado (61,87 %).

2.2 Diseño de mezclas y producción de los materiales álcali-activados

A partir de la combinación del precursor (CV+HS) y el cemento (OPC) junto con una disolución compuesta por el activador alcalino, Na₂SO₄ (NS) y agua, se obtuvieron los sistemas híbridos de activación alcalina (HCV). La adición de OPC (30 % en peso) se hizo con el fin de evitar el curado térmico en los sistemas, y efectivamente los sistemas híbridos endurecieron y desarrollaron resistencias a temperatura ambiente.

En los sistemas HCV se evaluó el efecto en la resistencia a la compresión (7 y 28 días de curado) del contenido de activador NS en el rango de 2-6 %, y el porcentaje de remplazo de HS con respecto a la ceniza volante (0-35 % de la mezcla total). El ensayo de resistencia se realizó en una máquina universal INSTRON 3369 con capacidad de 50 kN y una velocidad de 1 mm/min. Para obtener las proporciones óptimas de NS y HS, en los rangos anteriormente definidos, se empleó el software Minitab 17 y un diseño experimental de superficie de respuesta que arrojó un total de 13 mezclas, tal como se muestra en la Tabla 3. La relación líquido/sólido (L/S) en todas las mezclas fue de 0,4. Para la preparación de las pastas, se utilizó una mezcladora Hobart, y el tiempo de mezclado fue de 4 minutos. Las pastas se moldearon en cubos de 20 mm de lado y se sometieron a vibración durante 30 segundos con el objeto de remover el aire naturalmente atrapado durante el mezclado y moldeo, seguido se introdujeron en una cámara húmeda a temperatura ambiente (25 ± 3 °C) en donde se realizó su proceso de curado. Para cada sistema por edad de curado se evaluaron un mínimo de 3 muestras.

Tabla 3. Dosificación basada en diseño de experimentos. Fuente: elaboración propia.

Mezcla	Sistema Híbrido			Activador NS (% en peso del activador respecto al peso total del sistema híbrido)
	CV (% peso)	HS (% peso)	OPC (% peso)	
1	52,50	17,50	30,00	4,00
2	52,50	17,50	30,00	6,83
3	52,50	17,50	30,00	1,17
4	40,00	30,00	30,00	6,00
5	52,50	17,50	30,00	4,00
6	52,50	17,50	30,00	4,00
7	70,00	0,00	30,00	4,00
8	65,00	5,00	30,00	6,00
9	40,00	30,00	30,00	2,00
10	34,82	35,18	30,00	4,00
11	52,50	17,50	30,00	4,00
12	52,50	17,50	30,00	4,00
13	65,00	5,00	30,00	2,00

Definidas las proporciones óptimas de las pastas HCV, se realizó una comparación de la evolución de la resistencia a la compresión (1-90 días de curado) con los resultados correspondientes al de una pasta basada 100 % en OPC (Tipo UG).

A partir de los sistemas óptimos se produjeron morteros, variando la relación en peso del sistema híbrido:arena en relación 1:1, 1:2 y 1:2,75 y empleado en todos los sistemas una relación constante (L/S de 0,45). Los morteros se elaboraron utilizando una mezcladora Hobart con un tiempo de mezclado de 4 minutos. Las muestras se moldearon en cubos de 50 mm de lado de acuerdo con los lineamientos definidos en la norma NTC 112 [22]. El

proceso de curado de las muestras se realizó en una cámara húmeda a temperatura ambiente (25 ± 3 °C), para posteriormente determinar la resistencia a la compresión a las edades de 7 y 28 días por medio del ensayo en una prensa hidráulica Controls CT-1500 con capacidad de 1500 kN siguiendo el procedimiento de la norma NTC 220 [23]. Complementariamente se determinaron el tiempo de fraguado y el flujo de calor. El tiempo de fraguado se determinó según el método B descrito en la norma NTC 118 [24] (homóloga a ASTM C191), y la evolución de calor (durante la activación alcalina) y calor total de reacción (48 horas) fueron evaluados por medio de un calorímetro isotérmico I-Cal 8000 (ASTM C1702).

A partir de la optimización del cementante (HCV) se produjeron concretos utilizando 100 % agregados reciclados (CHCV-AR), con una cantidad de cementante de 500 y 600 kg/m³ (500 R y 600 R respectivamente) y un concreto referencia utilizando 600 kg/m³ de HCV y agregados naturales (CHCV-AN) (600 N). La combinación granulométrica de agregado fino y agregado grueso en % en peso, ya sea reciclado o natural, se estableció en 30 % y 70 % respectivamente. La dosificación de la mezcla se realizó adaptando el “método del volumen absoluto” propuesto en la ACI 211.1 (Tabla 4).

Tabla 4. Dosificación de mezclas en seco por metro cúbico de concreto (1 m³). Fuente: elaboración propia.

Sistema híbrido	Peso (kg/m ³)						
	CV	HS	OPC	Na ₂ SO ₄	Agregado Fino AFR	Agregado Grueso AGR	Agua de mezclado
500R	252	84	144	20	383	892	225
600R	302	101	173	24	388	906	270
600N	302	101	173	24	424	990	270

Las muestras fueron moldeadas en cilindros de 75 mm de diámetro por 165 mm de alto siguiendo los lineamientos de la NTC 1377 [25]. El curado de los especímenes se realizó en cámara húmeda a temperatura ambiente (25 ± 3 °C). Una vez las muestras cumplieron edades de curado de 7, 28 y 90 días se evaluó la resistencia a la compresión empleando una prensa hidráulica Controls CT-1500 con capacidad de 1500 kN, bajo la NTC 673 [26]. Se determinó el módulo de elasticidad por medio del ensayo de pulso ultrasónico y la resistencia a la tracción indirecta (RTI) a los 28 días de curado mediante las normas ASTM C597 [27] y la NTC 722 [28], respectivamente. Adicionalmente, se realizó el ensayo de densidad, absorción y porosidad del concreto siguiendo la metodología de la norma NTC 5653 [29] a las muestras con 28 días de curado. La caracterización microestructural se llevó a cabo por medio de microscopía electrónica de barrido (MEB), utilizando un microscopio JEOL JSM-6490 LV con un voltaje de aceleración de 20 kV en bajo vacío (low vacuum mode); para ello se emplearon muestras de 1 cm³ que se extrajeron de la mezcla óptima de concreto a los 28 días de curado, luego se encapsularon en resina epóxica y posteriormente fueron pulidas en su superficie.

Finalmente, con la mezcla óptima de concreto híbrido con agregados reciclados se fabricaron bloques perforados en una máquina vibrocompactadora y bloques con la sustitución de agregado fino reciclado por corcho granular en porcentajes del 10 % y 20 % en volumen, con el objetivo de mejorar el comportamiento térmico del bloque. Estos bloques fueron caracterizados de acuerdo con lo establecido en la norma NTC 4024 [30] (homóloga a ASTM C140). El comportamiento térmico de los concretos con y sin corcho se evaluó en muestras con un espesor o altura de $1,5 \pm 0,2$ mm con 28 días de curado, por medio del método fuente de plano transitorio (TPS, por sus siglas en inglés) que se realiza conforme a la norma ASTM C518 [31] en un Analizador de Constantes Térmicas Hot Disk modelo TPS 500 S de Thermtest - Thermal conductivity instruments en un rango de trabajo de 0,03 a 100 W/mK

en conductividad térmica, empleando un sensor Kapton 5501 de radio 6,403 mm, una potencia aplicada de 0,15 y 0,20 W y un tiempo de medida de 40 segundos a una temperatura de trabajo de $25 \pm 0,5$ °C, lo anterior para evaluar si la incorporación de corcho en las mezclas de concreto favorece las propiedades de aislamiento térmico.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Caracterización del cemento híbrido basado en CV-HS

En la Figura 1 se muestran los gráficos de contorno obtenidos a partir de los resultados de resistencia de las mezclas incluidas en la Tabla 3. En esta figura se puede apreciar el efecto en la resistencia mecánica a compresión (RC) del porcentaje en peso del Na_2SO_4 (NS) en relación con la incorporación de HS. A los 7 días de curado (Figura 1a), las resistencias más altas se obtienen con NS entre 2,5 y 4,2 % y con una incorporación de HS entre 15 % y 20 %, alcanzando valores de resistencia de 15 MPa. En la Figura 1b, se observa la evolución de la resistencia a los 28 días, en este caso, se observa que las resistencias más altas (máximo 19 MPa), se obtienen con porcentajes de NS entre 0 y 2 %, con una incorporación de HS entre 25 % y 35 % en peso como reemplazo de CV. Se evidencia que la presencia de HS promueve la ganancia de RC, lo que puede estar relacionado con el aporte de sílice amorfa de HS que al reaccionar con el hidróxido de calcio producido por la hidratación del cemento da lugar a la formación de silicato de calcio hidratado (CSH) [32]-[34]. Adicionalmente el tamaño de las partículas de HS contribuye a una mayor densificación de la pasta [35], [36].

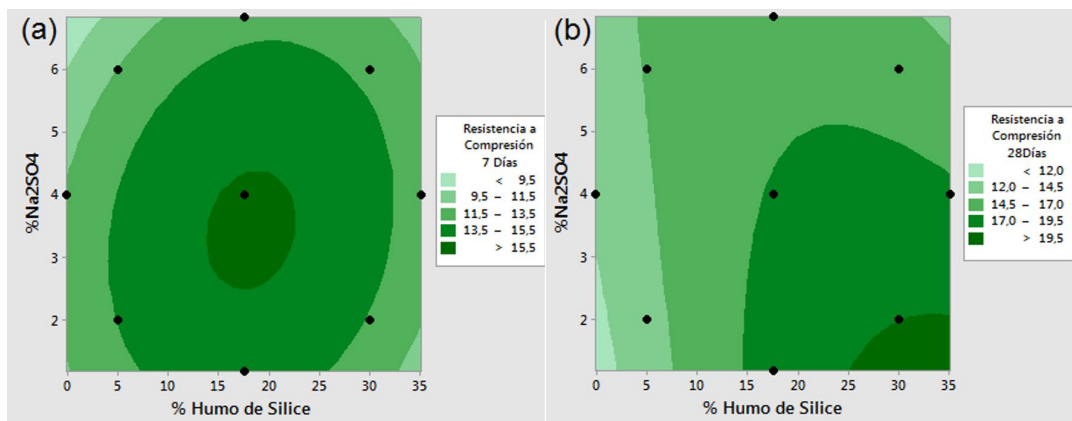


Figura 1. Gráficos de contorno para el porcentaje en peso de Na_2SO_4 y HS: (a) 7 y (b) 28 días de curado. Fuente: elaboración propia.

De los resultados reportados se seleccionaron dos sistemas HCV como óptimos, así a partir de los resultados de RC a 7 días se seleccionó la mezcla 52,50 % CV, 17,50 % HS, 30 % OPC y 4 % Na_2SO_4 (HCV-1), y con base en los resultados de 28 días se seleccionó la mezcla 40 % CV, 30 % HS, 30 % OPC y 2 % Na_2SO_4 (HCV-2) (Figura 1). La dosificación de NS obtenida en estas mezclas concuerda con reportes previos que sugieren utilizar valores entre 1 % a 5 % en peso. [8], [37]-[39].

En la Figura 2 se observa la evolución de la resistencia a compresión de los sistemas óptimos (HCV-1 y HCV-2), comparados con los reportados por una pasta de referencia basada en 100 % OPC. Se puede observar un aumento de RC para todas las muestras conforme aumenta la edad de curado. Aunque a los 7 días de curado la muestra HCV-1 presenta la

mayor RC seguida por HCV-2, a edades superiores la muestra de referencia las supera en resistencia. En general, los valores RC de HCV-1 y HCV-2 son bastante similares en las diferentes edades de curado evaluadas. La RC de los morteros producidos a partir de los sistemas híbridos óptimos (HCV-1 y HCV-2) con una relación L/S de 0,45 y diferentes relaciones sistema cementante híbrido:arena (C:A) a 7 y 28 días de curado, cuya dosificación es incluida en la Tabla 5, se presentan en la Figura 3. En general, se aprecia una disminución en la RC de cada sistema a medida que aumenta la relación C:A, no obstante, se puede apreciar un incremento de RC de 7 a 28 días de curado en todas las mezclas, así en HCV-1 del 12 %, 27 % y 24 % y para HCV-2 un incremento del 34 %, 29 % y 5 % para C:A de 1:1, 1:2 y 1:2,75, respectivamente. A partir de estos resultados se selecciona el sistema HCV-1 como cementante para producir las mezclas de concreto debido a que en la mayoría de las relaciones C:A y edades de curado evaluadas presento mayores RC, y además la proporción de HS es menor [35], [40]-[42].

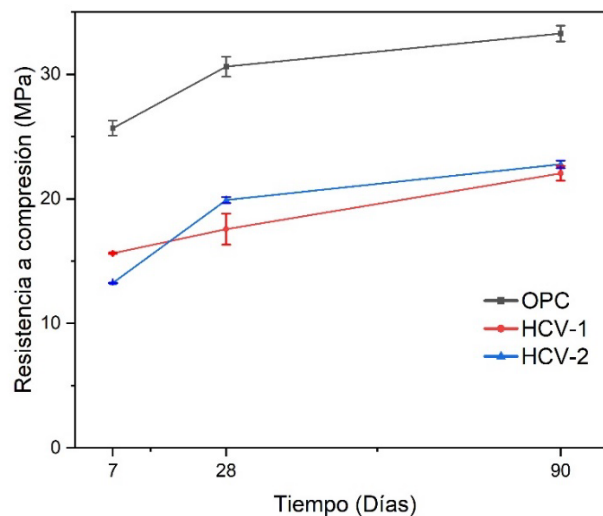


Figura 2. Evolución de la resistencia a compresión promedio de sistemas híbridos óptimos con HS comparado con muestra de 100 % OPC. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Dosificación de las mezclas de mortero para los sistemas óptimos con HS variando la relación sistema cementante híbrido:arena (C:A). Fuente: elaboración propia.

Relación C:A	HCV-1		HCV-2	
	HS (% peso)	NS (% peso)	HS (% peso)	NS (% peso)
1:1	17,50	4,00	30,00	2,00
1:2	17,50	4,00	30,00	2,00
1:2,75	17,50	4,00	30,00	2,00

El tiempo inicial de fraguado de la pasta HCV-1, compuesta por 52,5 % de CV, 17,5 % de HS y 30 % de OPC, activado con NS al 4 % y una relación L/S de 0,45 fue de 108 minutos y el final de 360 minutos. En la Figura 4 se observa el flujo de calor de HCV-1, al determinar el área bajo la curva se obtuvo un calor total acumulado de 106 kJ/kg, el cual es menor al reportado por sistemas 100 % OPC que pueden presentar valores superiores a los 200 kJ/kg, esto concuerda con reportes en la literatura [6], [8]. Acorde a estos resultados el cemento híbrido activado HCV-1 puede ser clasificado como un cemento de moderado calor de hidratación (tipo MCH) según la NTC 121 [43], teniendo en cuenta el tiempo de fraguado

inicial de 108 minutos y la RC promedio de 12,2 MPa a 7 días de curado en morteros con relación C:A de 1:2,75.

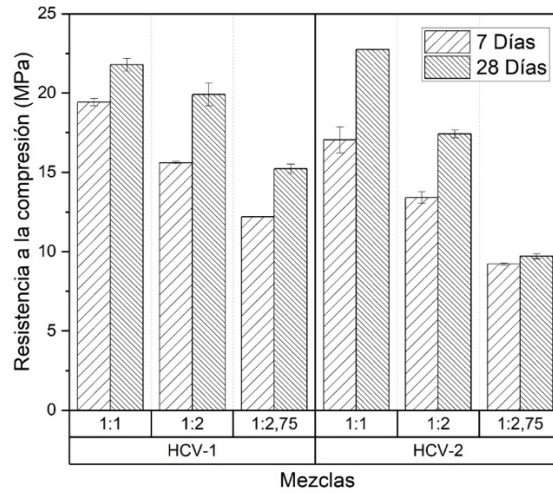


Figura 3. Resistencia a la compresión (RC) promedio a los 7 y 28 días de curado de los sistemas óptimos HCV-1 y HCV-2 con diferente relación C:A. Fuente: elaboración propia.

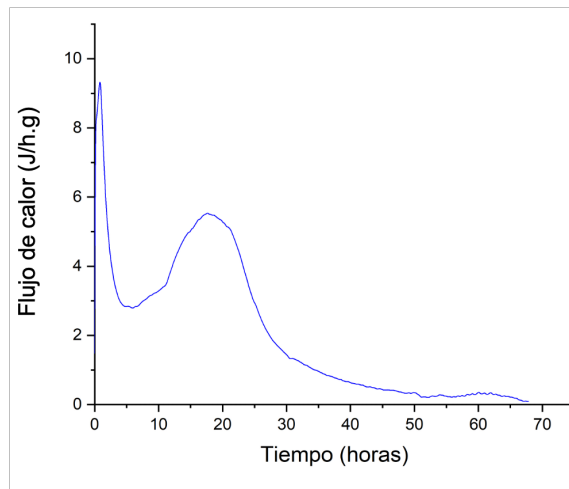


Figura 4. Curva de evolución del calor para HSV-1. Fuente: elaboración propia.

3.2 Caracterización del concreto híbrido (CHCV) basado en CV y HS, utilizando agregados reciclados

En la Figura 5 se presentan las resistencias a la compresión de los concretos híbridos para dos proporciones de cementante HCV-1 y 100 % agregados reciclados (500 R y 600 R), y el concreto híbrido de referencia, es decir conteniendo agregados naturales (600 N). En general, en todos los concretos evaluados hay un incremento en la resistencia a la compresión con el tiempo de curado, comportamiento característico de concretos basados en cemento Portland. Así mismo, se aprecia una marcada diferencia entre los concretos con 600 Kg/m³ de HCV-1 con respecto a los concretos fabricados con 500 Kg/m³. Este incremento resistente del concreto 600 R se debe al mayor contenido de cementante y por tanto a la generación de mayor cantidad de geles C-S-H, C-A-S-H y (N,C)-A-S-H. La mezcla 600 R a 28 días de curado alcanzó un valor de 18,9 MPa, superando en 11 % el límite especificado de 17 MPa como RC mínima para un concreto estructural según el título C del Reglamento Colombiano de Construcción

Sismo Resistente NSR-10 [44], basado en la normativa “Requisitos de reglamento para concreto estructural, ACI 318S-19” [45]. La mezcla 500 R a 28 días alcanzo un valor RC de 15,6 MPa, un 8 % menor que la RC mínima que estipula la norma NSR-10. Es de destacar el mejor desempeño de la RC reportado por la mezcla HCV-1 600 R comparado al reportado por la mezcla híbrida con agregados naturales (600 N), la cual reportó a 28 días un valor de RC de apenas 16,3 MPa. Lo anterior, podría deberse a que parte de los agregados reciclados (RCD), en especial la fracción más fina, podría incluso reaccionar con el activador y actuar parcialmente como aglutinante en el proceso de geopolimerización, en consecuencia, densificar la mezcla favoreciendo las resistencias mecánicas [6], [46]-[48].

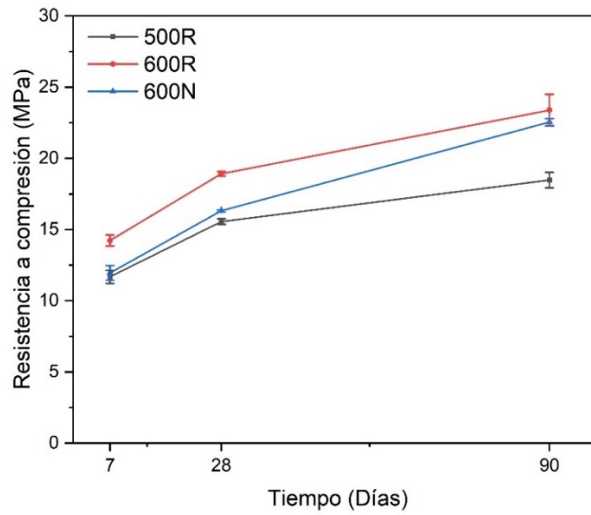


Figura 5. Resistencia a la compresión de mezclas de concreto híbrido con agregado reciclado a 7, 28 y 90 días de curado, cantidad de cementante variable. Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos en los ensayos de tracción indirecta (RTI) de las mezclas de concreto a los 28 días de curado se muestran en la Tabla 6. Se evidencia que la RTI de la mezcla 600 R, en comparación con las mezclas 500 R y 600 N, tiene un valor promedio de 1,5 MPa, probablemente esto pueda atribuirse a una mayor adhesión a la matriz por parte de los agregados reciclados. Estos resultados de RTI corroboran los obtenidos en RC en donde se presentó la misma tendencia.

Los resultados del ensayo de módulo de elasticidad de las mezclas de concreto a los 28 días de curado se muestran en la Tabla 7. Según los requerimientos de la norma ASTM C597 para el cálculo del módulo de elasticidad por medio del método de pulso ultrasónico se necesita el coeficiente o relación de Poisson, para lo anterior la NSR-10 recomienda un valor de 0,2 en concretos de peso normal, este valor se consideró apropiado teniendo en cuenta los valores encontrados en la literatura para diferentes concretos geopoliméricos basados en ceniza volante, valores que fluctúan entre 0,192 y 0,203 [49]-[52]. El incremento de la proporción del cementante híbrido dio lugar a un incremento en el módulo de elasticidad, de 25,1 GPa para la mezcla 500 R a 27,0 GPa para la mezcla 600 R. A su vez, la mezcla 600 N presentó un módulo de elasticidad mayor (27,6 GPa) comparado con el módulo de la mezcla 600 R, que puede deberse a la naturaleza de los agregados.

Tabla 6. Resistencia a la tracción indirecta (RTI) promedio de las mezclas de concreto a 28 días de curado.

Fuente: elaboración propia.

Cantidades (kg/m ³)	Resistencia a la tracción indirecta promedio (MPa)	
	28 días	
500R	1,0 ± 0,1	
600R	1,5 ± 0,1	
600N	1,3 ± 0,3	

Tabla 7. Resultados del ensayo de módulo de elasticidad en mezclas de concreto. Fuente: elaboración propia.

Módulo de elasticidad	V prom	t prom	E promedio
Muestra	(m/s)	(s)	(GPa)
500R	3270,89	46,55	25,1
600R	3414,00	44,53	27,0
600N	3383,78	45,02	27,6

En la Tabla 8 se muestran los resultados de las propiedades físicas evaluadas en las mezclas de concreto a los 28 días de curado como lo son densidad aparente, porcentaje de absorción y porosidad determinados mediante la norma NTC 5653 [29]. Los valores de densidad aparente de las mezclas evaluadas se encuentran en el rango de los reportados para concretos convencionales basados en OPC. La mezcla 600 N tiene la mayor densidad entre las tres mezclas de concreto, con un valor de 2680 kg/m³, esto se debe a que la densidad de los agregados naturales es mayor comparada a la de los agregados reciclados.

Para las mezclas con agregados reciclados se observa que la densidad de la mezcla 600 R es mayor comparada con la mezcla 500 R, con valores de 2610 kg/m³ y 2570 kg/m³ respectivamente. Se evidencia que los concretos fabricados con agregados reciclados presentan una mayor absorción, lo cual se ajusta a los resultados de absorción de los agregados reportados previamente y coincide con lo reportado por diversos autores [53]-[57]. Por último, se observa un comportamiento similar en el porcentaje de volumen de vacíos en las mezclas 500 R y 600 R. En general, el mejor comportamiento se obtuvo en los concretos fabricados con agregados naturales, menor absorción y volumen de espacios vacíos.

Tabla 8. Resultados del ensayo densidad, absorción y porosidad en mezclas de concreto a los 28 días de curado.

Fuente: elaboración propia.

Mezcla	Absorción (%)	Densidad aparente (kg/m ³)	Volumen de espacios vacíos (%)
500R	20,79	2570	35,11
600R	18,79	2610	32,59
600N	12,99	2680	25,80

El análisis de la microestructura del concreto 600 R se llevó a cabo mediante microscopía electrónica de barrido (MEB), en la Figura 6a se aprecia una superficie densa, homogénea y con baja porosidad. En la zona de interfaz agregado-matriz se identifica que la matriz aporta una buena densificación y se observa una buena adhesión entre estas dos fases del concreto (Figura 6b), ratificando el buen comportamiento mecánico obtenido anteriormente.

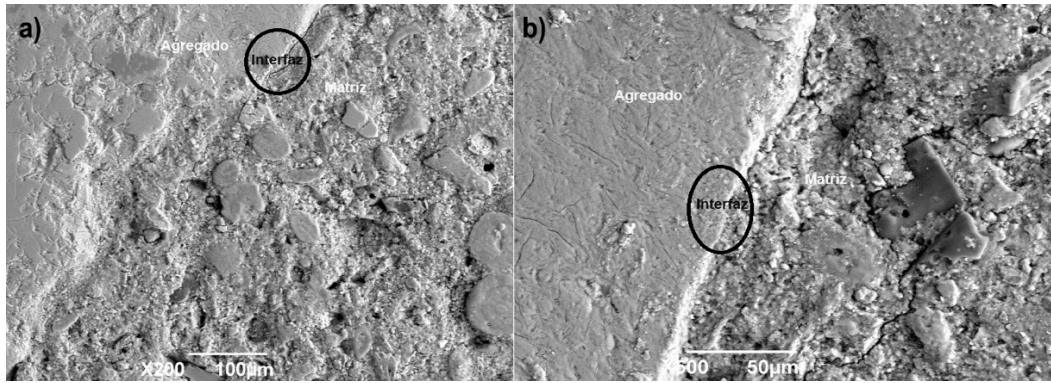


Figura 6. Microestructura de concreto 600R: (a) 100 μm y (b) 50 μm. Fuente: elaboración propia.

3.3 Producción y caracterización de una aplicación constructiva (tipo bloque perforado) a partir del CHCV con remplazo de corcho

A partir del concreto CHCV-600R fueron producidos bloques perforados de concreto (Figura 7), con sustitución de AFR por corcho en un 10 % y 20 % en volumen (CHCV-F1 y CHCV-F2 respectivamente) y los resultados se compararon con el bloque sin corcho, es decir con 100 % AFR (CHCV-F0). La caracterización físico-mecánica se llevó a cabo de acuerdo con lo establecido en la norma NTC 4024, NTC 4026 y NTC 4076 [30], [15], [58]. En la Tabla 9 se muestran las especificaciones que deben de cumplir los bloques para ser clasificados como estructurales y no estructurales.



Figura 7. Bloques después de ser liberados por la máquina vibrocompactadora. Fuente: elaboración propia.

Tabla 9. Requisitos de resistencia a la compresión, absorción de agua y clasificación del peso de unidades de concreto para mampostería estructural y no estructural según las normas NTC 4026 [15] y NTC 4076 [58].

Fuente: elaboración propia.

Clase	Resistencia a la compresión a los 28 días, evaluada sobre el área neta promedio		Absorción de agua % según el peso (densidad) del concreto secado en horno, kg/m ³		
	Mínimo, MPa	Promedio de 3 unidades, máximo, %	Peso liviano, menos de 1680 kg/m ³	Peso mediano, de 1680 kg/m ³ hasta menos de 2000 kg/m ³	Peso normal, 2000 kg/m ³ o más
Alta	13		15	12	9
Baja	8		18	15	12
NE	6		18	15	12

La Tabla 10 presenta las propiedades y características de los bloques perforados, en donde se destaca la resistencia a la compresión a los 28 días del bloque perforado CHCV-F0 la cual fue de 10,2 MPa, valor que supera en un 27 % el límite inferior de resistencia (8 MPa) establecido por la norma NTC 4026 para ser clasificado como “bloque estructural de clase baja”, para el caso de los bloques CHCV-F1 y CHCV-F2, se obtuvieron resistencias a la compresión de 7,2 MPa y 6,2 MPa respectivamente, con lo que se clasifican como elementos no estructurales [58]. La caída de la RC de los bloques con adición de corcho concuerda a lo encontrado en la literatura donde se informa que a medida que se aumenta el contenido en volumen de corcho las propiedades mecánicas se reducen [13], [59]. Cómo se evidenció en los resultados obtenidos anteriormente, los concretos fabricados a partir del sistema de activación alcalina siguen aumentando considerablemente sus resistencias a compresión a mayores edades de curado (90 días), por esta razón se evaluaron los bloques a 90 días de curado. Considerando las RC de los bloques a los 90 días de curado, CHCV-F0 se clasifican como estructural clase alta superando la RC que establece la norma. Con respecto a los resultados obtenidos del bloque CHCV-F1 y CHCV-F2 se clasifican como estructural clase baja al obtener resultados de RC de 11,6 y 9,6 respectivamente, superando hasta en un 45 % lo exigido por la norma. De acuerdo con la norma NTC 4026, el máximo porcentaje de absorción de agua permitido para bloques de peso mediano (1680-2000 kg/m³) es del 15 %; condición que no cumple ninguno de los tres tipos de bloques, los cuales están alrededor del 17 % absorción de agua, lo cual podría estar relacionado al tipo de agregado utilizado para la fabricación de los bloques, el cual fue de naturaleza reciclado (RCD). Cabe anotar que la norma NTC 4024 establece que, estos límites de absorción de agua y resistencia a la compresión deben cumplirse dentro de los 12 meses posteriores a la producción de las unidades, lo cual se considera es posible dado el continuo incremento en las propiedades mecánicas y en la densificación del material. Los resultados obtenidos (28 y 90 días) permitieron validar el uso potencial que posee el CHCV en la fabricación de aplicaciones constructivas de tipo prefabricadas.

Tabla 10. Propiedades obtenidas según las normas NTC 4026 [15] y NTC 4076 [58] para bloques a 28 días de curado. Fuente: elaboración propia.

Bloque	% en volumen de corcho, reemplazo de agregado fino	Resistencia a la compresión (MPa)		Densidad en seco (kg/m ³)	Absorción (%)	Humedad (%)
		28 días	90 días			
F0	0	10,2 ± 1,7	13,0	1785,51	17,16	6,67
F1	10	7,2 ± 0,9	11,6	1759,86	17,58	6,99
F2	20	6,2 ± 1,2	9,6	1759,22	17,04	7,19

3.4 Evaluación del efecto de la incorporación de corcho sobre el comportamiento térmico en concretos

Los resultados del ensayo de propiedades térmicas en los concretos con 600 kg/m³ de cementante HCV-1 se presentan en la Tabla 11, para las mezclas con agregados naturales y reciclados (CHCV-F0N y CHCV-F0R respectivamente) y con la sustitución del corcho por agregado fino reciclado en 10 % y 20 % (CHCV-F1 y CHCV-F2 respectivamente). Adicionalmente, se calculó la capacidad calorífica volumétrica como el producto de la densidad de la muestra por su calor específico.

Tabla 11. Propiedades térmicas de las muestras a 28 días de curado. Fuente: elaboración propia.

Muestra	Corcho (%)	Conductividad térmica (W/mK)	Difusividad térmica (mm ² /s)	Capacidad calorífica volumétrica (MJ/m ³ K)
F0N	0	1,0888	0,8238	1,3337
F0R	0	1,0267	0,8035	1,3050
F1	10	0,6934	0,6290	1,1044
F2	20	0,7239	0,5829	1,2420

Se observa que los concretos F0N presentan la mayor conductividad y difusividad, esto puede deberse a que los agregados naturales no son tan porosos como los agregados reciclados y transmiten el calor con menor resistencia. Comparando con las muestras con agregados reciclados y con corcho, hay una reducción de la conductividad térmica con respecto a F0N del 5 %, 36 % y 33 % para los concretos F0R, F1 y F2, respectivamente. Los resultados de difusividad muestran una tendencia similar, donde los concretos que presentan los menores valores son los concretos F1 y F2. Al comparar F0R con F1 y F2 se genera una reducción de la conductividad térmica del 32 % y 29 % respectivamente. Acorde a estos resultados se corrobora que el contenido de corcho provoca una reducción de la conductividad térmica y que se relaciona con la reducción de la resistencia mecánica en las muestras, tal como se afirma en estudios previos [13], [59].

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en la presente investigación demuestran que es posible obtener un bloque de uso estructural a partir de un concreto geopolimérico híbrido activado con Na₂SO₄ al 4 % basado en cenizas volantes, al combinar 52,5 CV+17,5 HS+30 OPC y utilizar agregados reciclados, obtenidos a partir de Residuos de Construcción y Demolición (RCD).

Las resistencias de los concretos híbridos a edad temprana (7 días) está en el orden de 12 MPa a 15 MPa. Esta resistencia es satisfactoria si consideramos que es un material geopolimérico basado en un residuo industrial, ceniza volante con mínima cantidad de OPC y activado con sulfato de sodio, en el cual además se está utilizando agregado reciclado.

El uso de subproductos industriales, el activador sólido alternativo y el reducido consumo de OPC en la mezcla, así como su proceso y endurecimiento a temperatura ambiente hace suponer que este ecoproducto es un elemento de baja huella de carbono comparado a otros bloques estructurales producidos a partir de 100 % OPC con agregados naturales o bloques basados en arcilla cocida.

La introducción de corcho en la mezcla, aunque reduce la resistencia a compresión del bloque, beneficia positivamente las propiedades térmicas. Sin embargo, cabe anotar, que las resistencias de estos materiales activados alcalinamente continúan incrementando en el tiempo, es así como se pudo apreciar que la RC a edad de 90 días comparada a la reportada a 28 días permitió que el bloque con la adición de corcho pasara de ser clasificado como no-estructural a estructural al cumplir con los valores exigidos por las normas para su clasificación como bloques estructurales.

Basado en lo anterior, se recomienda el uso de un 10 % en volumen de corcho como reemplazo del agregado fino en la mezcla para obtener un bloque estructural con características de confort térmico.

5. AGRADECIMIENTO Y FINANCIACIÓN

Los autores miembros del Grupo de Investigación Materiales Compuestos (CENM) agradecen a la Universidad del Valle (Cali) por el apoyo para la realización de este trabajo.

CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses económicos, profesionales o personales que puedan influir de forma inapropiada en los resultados obtenidos en este artículo.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Fabio Martínez-Gutiérrez: Diseño y desarrollo de la investigación, redacción y revisión final del manuscrito.

William Gustavo Valencia-Saavedra: Conceptualización, supervisión, diseño de la investigación, redacción y revisión final del manuscrito.

Ruby Mejía de Gutiérrez: Conceptualización, diseño de la investigación, supervisión, redacción y revisión final del manuscrito.

6. REFERENCIAS

- [1] P. V. Den Heede, and N. De Belie, “Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and ‘green’ concretes: Literature review and theoretical calculations,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 4, pp. 431–442, Apr. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.01.004>
- [2] Y. Wu *et al.*, “Geopolymer, green alkali activated cementitious material: Synthesis, applications and challenges,” *Construction and Building Materials*, vol. 224, pp. 930–949, Nov. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.112>
- [3] J. L. Provis, A. Palomo, and C. Shi, “Advances in understanding alkali-activated materials,” *Cement and Concrete Research*, vol. 78, pp. 110–125, Dec. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.04.013>
- [4] O. Rojas-Duque, L. M. Espinosa, R. A. Robayo-Salazar, and R. Mejía de Gutiérrez, “Alkali-activated hybrid concrete based on fly ash and its application in the production of high-class structural blocks,” *Crystals (Basel)*, vol. 10, no. 10, p. 946, Oct. 2020. <https://doi.org/10.3390/cryst10100946>
- [5] M. A. Villaquirán-Caicedo, “Studying different silica sources for preparation of alternative waterglass used in preparation of binary geopolymer binders from metakaolin/boiler slag,” *Construction and Building Materials*, vol. 227, p. 116621, Dec. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.002>
- [6] R. A. Robayo-Salazar, W. Valencia-Saavedra, and R. M. de Gutiérrez, “Construction and demolition waste (Cdw) recycling—as both binder and aggregates—in alkali-activated materials: A novel re-use concept,” *Sustainability*, vol. 12, no. 14, p. 5775, Jul. 2020. <https://doi.org/10.3390/su12145775>
- [7] Z. T. Yao *et al.*, “A comprehensive review on the applications of coal fly ash,” *Earth-Science Reviews*, vol. 141, pp. 105–121, Feb. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.016>
- [8] W. Valencia-Saavedra, R. Robayo-Salazar, and R. M. de Gutiérrez, “Alkali-activated hybrid cements based on fly ash and construction and demolition wastes using sodium sulfate and sodium carbonate,” *Molecules*, vol. 26, no. 24, Dec. 2021. <https://doi.org/10.3390/molecules26247572>
- [9] A. Dakhane, S. Tweedley, S. Kailas, R. Marzke, and N. Neithalath, “Mechanical and microstructural characterization of alkali sulfate activated high volume fly ash binders,” *Materials & Design*, vol. 122, pp. 236–246, May. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.021>
- [10] A. Fernández-Jiménez, I. García-Lodeiro, S. Donatello, O. Maltseva, and Á. Palomo, “Specific examples of hybrid alkaline cement,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 11, p. 01001, Apr. 2014. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20141101001>

- [11] I. García-Lodeiro, A. Fernández-Jiménez, and A. Palomo, "Variation in hybrid cements over time. Alkaline activation of fly ash-portland cement blends," *Cement and Concrete Research*, vol. 52, pp. 112–122, Oct. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.03.022>
- [12] I. Wilińska, B. Pacewska, and A. Ostrowski, "Investigation of different ways of activation of fly ash–cement mixtures: Part 1. Chemical activation by Na₂SO₄ and Ca (OH)₂," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 138, no. 6, pp. 4203–4213, Dec. 2019. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08485-1>
- [13] R. M. Novais, L. Senff, J. Carvalheiras, M. P. Seabra, R. C. Pullar, and J. A. Labrincha, "Sustainable and efficient cork - inorganic polymer composites: An innovative and eco-friendly approach to produce ultra-lightweight and low thermal conductivity materials," *Cement and Concrete Composites*, vol. 97, pp. 107–117, Mar. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.12.024>
- [14] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, "Construcción sostenible," minambiente.gov.co, Accessed: Feb. 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/construccion-sostenible/>
- [15] NTC 4026, Ingeniería civil y arquitectura. Unidades (bloques y ladrillos) de concreto, para mampostería estructural, ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Bogotá, Colombia, 1997. [Online]. Available: <https://tienda.icontec.org/gp-ingenieria-civil-y-arquitectura-unidades-bloques-y-ladrillos-de-concreto-para-mamposteria-estructural-ntc4026-1997.html>
- [16] NTC 3493, Cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, para uso en el concreto, ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Bogotá, Colombia, 2019. [Online]. Available: <https://tienda.icontec.org/gp-ntc-cenizas-de-carbon-y-puzolanas-naturales-calcinadas-o-crudas-para-uso-en-el-concreto-ntc3493-2023.html>
- [17] NTC 237, Método de ensayo para determinar la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado fino, ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Bogotá, Colombia, 2020. [Online]. Available: <https://tienda.icontec.org/gp-metodo-de-ensayo-para-determinar-la-densidad-relativa-gravedad-especifica-y-la-absorcion-del-agregado-fino-ntc237-2020.html>
- [18] NTC 176, Método de ensayo para determinar la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso, ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Bogotá, Colombia, 2019. [Online]. Available: <https://tienda.icontec.org/gp-metodo-de-ensayo-para-determinar-la-densidad-relativa-gravedad-especifica-y-la-absorcion-del-agregado-grueso-ntc176-2019.html>
- [19] NTC 77, Concretos. Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos, ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Bogotá, Colombia, 2018. [Online]. Available: <https://tienda.icontec.org/gp-concretos-metodo-de-ensayo-para-el-analisis-por-tamizado-de-los-agregados-finos-y-gruesos-ntc77-2018.html>
- [20] NTC 98, Método de ensayo para determinar la resistencia al desgaste por abrasión e impacto de agregados gruesos menor de 37,5 mm, utilizando la máquina de los ángeles, ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Bogotá, Colombia, 2019. <https://tienda.icontec.org/gp-metodo-de-ensayo-para-determinar-la-resistencia-al-desgaste-por-abrasion-e-impacto-de-agregados-gruesos-menor-de-375-mm-utilizando-la-maquina-de-los-angeles-ntc98-2019.html>
- [21] NTC 127, Concretos. Método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas en agregado fino para concreto, ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Bogotá, Colombia, 2000. [Online]. Available: <https://tienda.icontec.org/gp-concretos-metodo-de-ensayo-para-determinar-las-impurezas-organicas-en-agregado-fino-para-concreto-ntc127-2000.html>
- [22] NTC 112, Cementos. Mezcla mecánica de pastas y morteros de cemento hidráulico de consistencia plástica, ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Bogotá, Colombia, 2021. [Online]. Available: <https://tienda.icontec.org/gp-cementos-mezcla-mecanica-de-pastas-y-morteros-de-cemento-hidraulico-de-consistencia-plastica-ntc112-2021.html>
- [23] NTC 220, Cementos. Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico a la compresión, usando cubos de 50 mm o 2 pulgadas de lado, ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Bogotá, Colombia, 2021. <https://tienda.icontec.org/gp-ntc-cementos-determinacion-de-la-resistencia-de-morteros-de-cemento-hidraulico-a-la-compresion-usando-cubos-de-50-mm-o-2-pulgadas-de-lado-ntc220-2022.html>
- [24] NTC 118, Cementos. Método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante aguja de Vicat, ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Bogotá, Colombia, 2000. [Online]. Available:

- <https://tienda.icontec.org/gp-ntc-cementos-metodo-de-ensayo-para-determinar-el-tiempo-de-fraguado-del-cemento-hidraulico-mediante-aguja-de-vicat-ntc118-2022.html>
- [25] NTC 1377, Ingeniería civil y arquitectura. Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos en el laboratorio, ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Bogotá, Colombia, 2010. [Online]. Available: <https://tienda.icontec.org/gp-ntc-concretos-elaboracion-y-curado-de-especimenes-de-concreto-para-ensayos-en-el-laboratorio-ntc1377-2021.html>
- [26] NTC 673, Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto, ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Bogotá, Colombia, 2010. [Online]. Available: <https://tienda.icontec.org/gp-concretos-metodo-de-ensayo-de-resistencia-a-la-compresion-de-especimenes-cilindricos-de-concreto-ntc673-2021.html>
- [27] C597-22 Committee, Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023. [Online]. Available: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/114547/76b24324371c4c068e761ba60d8f40e7/ASTM-C597-22.pdf>
- [28] NTC 722, Concreto. Método de ensayo para determinar la resistencia a la tensión indirecta de especímenes cilíndricos de concreto, ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Bogotá, Colombia, 2000. [Online]. Available: <https://tienda.icontec.org/gp-ntc-concretos-metodo-de-ensayo-para-determinar-la-resistencia-a-la-tension-indirecta-de-especimenes-cilindricos-de-concreto-ntc722-2021.html>
- [29] NTC 5653, Determinación de la gravedad específica, absorción y vacíos en el concreto endurecido, ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Bogotá, Colombia, 2008. [Online]. Available: <https://tienda.icontec.org/gp-determinacion-dela-gravedad-especifica-absorcion-y-vacios-en-el-concreto-endurecido-ntc5653-2008.html>
- [30] NTC 4024, Prefabricados de concreto. Muestreo y ensayo de prefabricados de concreto no reforzados, vibrocompactados, ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Bogotá, Colombia, 2001. [Online]. Available: <https://tienda.icontec.org/gp-ntc-prefabricados-de-concreto-muestreo-y-ensayo-de-prefabricados-de-concreto-no-reforzados-vibrocompactados-ntc4024-2001.html>
- [31] ASTM C518-21: Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus, ASTM-American Society for Testing and Materials, Pensilvania, Estados Unidos, 2021. https://standards.iteh.ai/catalog/standards/astm/fcd5f52a-9dd7-431d-a171-1e83f99aa51f/astm-c518-21?srltid=AfmBOop_M1xwYqveTaVkrI9KGNyGmC2ScIGY9pO2Pzjz1q8tnQtHWiQZ
- [32] R. Siddique, "Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties," *Resources, Conservation and Recycling* vol. 55, no. 11, pp. 923–932, Sep. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.012>
- [33] M. Nili, and A. Ehsani, "Investigating the effect of the cement paste and transition zone on strength development of concrete containing nanosilica and silica fume," *Materials & Design*, vol. 75, pp. 174–183, Jun. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.03.024>
- [34] D. Siang Ng *et al.*, "Influence of SiO₂, TiO₂ and Fe₂O₃ nanoparticles on the properties of fly ash blended cement mortars," *Construction and Building Materials*, vol. 258, p. 119627, Oct. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119627>
- [35] A. Mehta, and D. K. Ashish, "Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review," *Journal of Building Engineering*, vol. 29, p.100888, May. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100888>
- [36] Y. Yue, J. J. Wang, and Y. Bai, "Tracing the status of silica fume in cementitious materials with Raman microscope," *Construction and Building Materials*, vol. 159, pp. 610–616, Jan. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.015>
- [37] G. Yang, T. Wu, C. Fu, and H. Ye, "Effects of activator dosage and silica fume on the properties of Na₂SO₄-activated high-volume fly ash," *Construction and Building Materials*, vol. 278, p. 122346, Apr. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122346>
- [38] J. Mei *et al.*, "Effect of sodium sulfate and nano-SiO₂ on hydration and microstructure of cementitious materials containing high volume fly ash under steam curing," *Construction and Building Materials*, vol. 163, pp. 812–825, Feb. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.159>
- [39] D. F. Velandia, C. J. Lynsdale, J. L. Provis, F. Ramirez, and A. C. Gomez, "Evaluation of activated high volume fly ash systems using Na₂SO₄, lime and quicklime in mortars with high loss on ignition fly ashes," *Construction and Building Materials*, vol. 128, pp. 248–255, Dec. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.076>
- [40] M. Saridemir, "Effect of silica fume and ground pumice on compressive strength and modulus of elasticity of high strength concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 49, pp. 484–489, Dec. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.091>

- [41] M. Mazloom, A. A. Ramezani-pour, and J. J. Brooks, "Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 26, no. 4, pp. 347–357, May. 2004. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00017-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00017-9)
- [42] S. M. Motahari Karein, A. A. Ramezani-pour, T. Ebadi, S. Isapour, and M. Karakouzian, "A new approach for application of silica fume in concrete: Wet granulation," *Construction and Building Materials*, vol. 157, pp. 573–581, Dec. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.132>
- [43] NTC 121, Especificación de desempeño para cemento hidráulico, ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Bogotá, Colombia, 2021. [Online]. Available: <https://tienda.icontec.org/gp-especificacion-de-desempeno-para-cemento-hidraulico-ntc121-2021.html>
- [44] NSR-10, Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial-Asociación Colombiana de ingeniería sísmica, Bogotá, Colombia, 2010. [Online]. Available: <https://www.unisdr.org/campaign/resilientcities/uploads/city/attachments/3871-10684.pdf>
- [45] ACI 318-19 requisitos de Reglamento de Construcción para Concreto Estructural ya disponible, Comité American Concrete Institute (ACI) 318, American Concrete Institute, Indiana, Estados Unidos, 2019. [Online]. Available: <https://www.prnewswire.com/news-releases/aci-318-19-requisitos-de-reglamento-de-construccion-para-concreto-estructural-ya-disponible-866732703.html>
- [46] C. Lampris, R. Lupo, and C. R. Cheeseman, "Geopolymerisation of silt generated from construction and demolition waste washing plants," *Waste Management*, vol. 29, no. 1, pp. 368–373, Jan. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.04.007>
- [47] N. Cristelo, A. Fernández-Jiménez, C. Vieira, T. Miranda, and Á. Palomo, "Stabilisation of construction and demolition waste with a high fines content using alkali activated fly ash," *Construction and Building Materials*, vol. 170, pp. 26–39, May. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.057>
- [48] A. de Rossi, M. J. Ribeiro, J. A. Labrincha, R. M. Novais, D. Hotza, and R. F. P. M. Moreira, "Effect of the particle size range of construction and demolition waste on the fresh and hardened-state properties of fly ash-based geopolymer mortars with total replacement of sand," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 129, pp. 130–137, Sep. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.06.026>
- [49] F. Farooq *et al.*, "Geopolymer concrete as sustainable material: A state of the art review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 306, no. 124762, p. 124762, Nov. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124762>
- [50] B. Joseph, and G. Mathew, "Influence of aggregate content on the behavior of fly ash based geopolymer concrete," *Scientia Iranica*, vol. 19, no. 5, pp. 1188–1194, Oct. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2012.07.006>
- [51] K. Neupane, and S. A. Hadigheh, "Sodium hydroxide-free geopolymer binder for prestressed concrete applications," *Construction and Building Materials*, vol. 293, p. 123397, Jul. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123397>
- [52] K. T. Nguyen, N. Ahn, T. A. Le, and K. Lee, "Theoretical and experimental study on mechanical properties and flexural strength of fly ash-geopolymer concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 106, pp. 65–77, Mar. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.033>
- [53] S. Malazdrewicz, K. Adam Ostrowski, and Ł. Sadowski, "Self-compacting concrete with recycled coarse aggregates from concrete construction and demolition waste – Current state-of-the art and perspectives," *Constr Build Mater*, vol., 370, p. 130702, Mar. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130702>
- [54] H. Sasanipour, and F. Aslani, "Durability properties evaluation of self-compacting concrete prepared with waste fine and coarse recycled concrete aggregates," *Construction and Building Materials*, vol. 236, p. 117540, Mar. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117540>
- [55] A. Katz, "Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 33, no. 5, pp. 703–711, May 2003. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01033-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01033-5)
- [56] S. C. Kou, and C. S. Poon, "Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates," *Cement and Concrete Composites*, vol. 31, no. 9, pp. 622–627, Oct. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.06.005>
- [57] Z. J. Grdic, G. A. Toplicic-Curcic, I. M. Despotovic, and N. S. Ristic, "Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 7, pp. 1129–1133, Jul. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.029>
- [58] NTC 4076, Unidades de concreto para mampostería no estructural, ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Bogotá, Colombia, 2017. [Online]. Available: <https://tienda.icontec.org/gp-unidades-de-concreto-para-mamposteria-no-estructural-ntc4076-2017.html>
- [59] S. Merabti, S. Kenai, R. Belarbi, and J. Khatib, "Thermo-mechanical and physical properties of waste granular cork composite with slag cement," *Construction and Building Materials*, vol. 272, p. 121923, Feb. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121923>