Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
47(184)505-519, junio-septiembre de 2023. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.1892

Artículo original

Residuos de construcción y demolición como materia prima de concretos y elementos de construcción obtenidos mediante activación alcalina

Construction and demolition waste as raw material for concrete and construction elements obtained through alkaline activation

Ruby Mejía-de-Gutiérrez*, Rafael Robayo-Salazar, William Valencia-Saavedra

Grupo de Investigación en Materiales Compuestos (GMC-CENM), Universidad del Valle, Cali, Colombia

Artículo de posesión de Ruby Mejia como miembro correspondiente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Resumen

El cemento Portland (OPC) es el cementante comúnmente utilizado en la producción de concreto. Sin embargo, su uso se ha cuestionado por el excesivo consumo energético y de recursos naturales, y por las elevadas emisiones durante su proceso de producción. Por otra parte, el sector de la construcción también contribuye al impacto ambiental con la generación de residuos de construcción y demolición (RCD) que no están siendo aprovechados. Ello ha motivado el desarrollo de cementantes alternativos de menor huella de carbono y la reutilización de los RCD para dar cumplimiento a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y a los principios de economía circular. Se demuestra aquí la viabilidad de producir concretos de naturaleza híbrida activados alcalinamente a partir de la mezcla de polvos provenientes de la trituración de los RCD. Se emplearon dos tipos de activadores alcalinos, $NaOH+Na_2SiO_3$, y Na_2SO_4, con una proporción de OPC de 10 y 30 %, respectivamente. Para el aprovechamiento integral de los RCD, en las mezclas el 100 % de los agregados eran reciclados. Los concretos diseñados cumplieron las resistencias mecánicas requeridas por la norma sismo resistente NSR-10, lo que los clasifica como de tipo estructural. Además, su potencial de calentamiento global (PCG) fue hasta un 68 % inferior al de un concreto de igual especificación basado en OPC. Los concretos obtenidos se utilizaron en la producción de elementos prefabricados, tales como bloques macizos y bloques de perforación vertical y adoquines, que satisfacen las especificaciones requeridas en las normas técnicas colombianas.

Palabras clave: Residuos de construcción y demolición; Activación alcalina; Cementos híbridos; Concretos; Bloques; Adoquines.

Abstract

Portland cement (OPC) has been commonly used in concrete production. However, it has been questioned for its excessive consumption of natural resources and energy, and the high emissions generated in its production process. On the other hand, the construction sector also contributes to the environmental impact by generating construction and demolition waste (CDW) that is not used. This has motivated the development of alternative cements with a lower carbon footprint and the reuse of CDW to comply with the Sustainable Development Goals (SDG) and the principles of Circular Economy. Here we demonstrated the feasibility of producing alkali-activated hybrid concrete using a mixture of powders from CDW grinding. As alkaline activators, we used a solution of sodium hydroxide and silicate ($NaOH+Na_2SiO_3$) and sodium sulfate (Na_2SO_4). The OPC proportion was 10% and 30%, respectively. For an integral CDW use, we used 100% recycled aggregates. The designed concrete had the mechanical strength required by the NSR-10 Seismic Resistant Standard to be classified as structural. Additionally, its global warming potential (GWP) was 68% lower than that of an OPC-based concrete with the same specification. This concrete was used in the production of precast elements such as solid blocks, vertical perforation blocks, and paving stones that met the specifications required by the Colombian technical standards.

Keywords: Construction and demolition waste; Alkaline activation; Hybrid cements; Concrete; Blocks; Pavers.

Citación: Mejía-de-Gutiérrez R, Robayo-Salazar R, Valencia-Saavedra W. Residuos de construcción y demolición como materia prima de concretos y elementos de construcción obtenidos mediante activación alcalina. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 47(184)505-519, junio-septiembre de 2023. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.1892

Editor: Pedro Prieto

***Correspondencia:**
Ruby Mejía de Gutiérrez;
ruby.mejia@correounivalle.edu.co

Recibido: 20 de marzo de 2023
Aceptado: 22 de agosto de 2023
Publicado en línea: 31 de agosto de 2023

Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
47(184)505-519, junio-septiembre de 2023. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.1892

Introducción

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible y sus 17 objetivos (ODS), aprobada en septiembre del 2015 por la Asamblea General de las Naciones Unidas, establece una visión transformadora orientada a la sostenibilidad económica, social y ambiental de los Estados que la suscribieron, entre ellos, Colombia. En los ODS 11, "Ciudades Sostenibles", y 12, "Producción y Consumo Sostenible", se propone para el 2030 reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, con énfasis en la calidad del aire y la gestión de los desechos generados (**Naciones Unidas**, 2018). Se pretende lograr ciudades sostenibles a través de la innovación tecnológica, ciudades en las que se sustituya la "economía lineal" por una "economía circular" que reincorpore los residuos una y otra vez en los procesos de producción de nuevos productos y materiales con miras al objetivo de "cero residuos", ciudades que respondan al cambio climático con una economía baja en carbono para alcanzar la sostenibilidad (**Coaffee**, 2008; **Ortiz *et al*.**, 2009). El desarrollo sostenible se ha definido, precisamente, como "aquel que satisfaga las necesidades del presente sin poner en peligro la capacidad de las generaciones futuras para atender sus propias necesidades".

En general, el crecimiento industrial y económico mundial durante las últimas décadas ha traído un incremento en la generación de residuos provenientes de las actividades industriales y agroindustriales, por lo cual su gestión, manejo, reciclado y aprovechamiento son aspectos importantes en el saneamiento ambiental. Los residuos de construcción y demolición (RCD), en particular, representan un problema de contaminación ambiental grave en la mayoría de los países, sobre todo los subdesarrollados, debido a su inadecuada gestión y a los bajos índices de reciclaje o aprovechamiento. En efecto, la generación de RCD a nivel mundial representa aproximadamente 25 a 30 % del total de residuos sólidos generados, superando la cifra de 3 billones de toneladas anuales (**Akhtar & Sarmah**, 2018; **European Comission**, 2016).

La puesta en marcha de estrictas políticas de regulación, manejo, gestión y aprovechamiento en diferentes países impulsó el desarrollo de sistemas y tecnologías de reciclaje para este tipo de residuos que hoy se reconocen como modelos eficientes y ejemplares. En Estados Unidos, Dinamarca, Corea del Sur, Singapur y Japón, el aprovechamiento de RCD alcanza entre el 70 y el 95 % (**Huang *et al.***, 2018), en tanto que en la Unión Europea el reciclaje de RCD se sitúa entre el 10 y el 90 % (**European Comission**, 2016). Algunos de los instrumentos económicos implementados son, por ejemplo, el pago de una "tasa por vertimiento" en Holanda (**Deloitte**, 2015), el cobro de un "impuesto por utilizar material virgen" en la República Checa (**Deloitte**, 2015), y la denominada "fianza" vinculada al otorgamiento de la licencia municipal de obra al generador de los residuos en España (**Gobierno de España**, 2008; 2011). Estos instrumentos y la normalización han sido elementos clave para impulsar la reutilización de los RCD pétreos, en particular en la producción de agregados (**Ministerio de Transporte**, 2016; **Deutsches Institut fur Normung E.V.**, 2017).

En Latinoamerica, el primer país en fomentar estrategias para la adecuada gestión de los RCD fue Brasil, cuyo Consejo Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) estableció en el 2002 los criterios y procedimientos para la gestión del RCD (**CONAMA**, 2002). A Brasil le siguieron otros países como Chile y México, y, recientemente, Colombia.

En Colombia el documento CONPES 3874 (**Departamento Nacional de Planeación**, 2016) propuso avanzar hacia una economía circular, buscando que los productos y materiales permanezcan durante el mayor tiempo posible en el ciclo productivo. En el 2019 el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) publicó el documento "Estrategia Nacional de Economía Circular" (**MADS**, 2019). Allí se afirma que en Colombia el sector de la construcción consume el 60 % de los recursos naturales no renovables extraídos de la tierra y el 40 % de la energía del país, y que genera el 30% de las emisiones de CO_2 y más del 20 % de los residuos del total de materiales empleados en las obras de infraestructura civil. Se estima que de los 100 millones de toneladas de materiales de construcción consumidos a nivel nacional, un 7 % corresponde a RCD; a lo que se

suma los 22 millones de toneladas de escombros generados por actividades de demolición y restauración de infraestructura ya existente; sin embargo, la tasa de aprovechamiento es apenas del 2 %, y aproximadamente un 30 % es llevado de forma ilegal a botaderos o campos abiertos (**Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, MADS**, 2019).

En la Resolución No. 0472 de 2017 (**MADS**, 2017), el MADS reglamentó la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición en Colombia, la cual fue actualizada en el 2021 mediante la Resolución 1257 (**MADS**, 2021), que modificó las metas de aprovechamiento de RCD para el 2030 según la categoría del municipio donde la obra se localice: en municipios pequeños hasta un 40 % y en ciudades grandes hasta un 75 %. En el marco de las Resoluciones 0472 y 1257, los generadores son los responsables de la correcta separación en la fuente y el adecuado almacenamiento de los diferentes tipos de materiales que componen los RCD antes de su recolección, transporte y disposición final. Así mismo, es un compromiso de los grandes generadores de RCD formular, implementar y mantener actualizado el programa de manejo ambiental (PMA) de los RCD y cumplir con las metas de aprovechamiento.

En un reciente estudio del Grupo de Materiales Compuestos de la Universidad del Valle se determinó que en el 2022 la generación de RCD en el departamento del Valle del Cauca fue de aproximadamente 4.287 m^3/día, lo que considerando una densidad de 1.648,9 kg/m^3 equivale a 7.069 t/día. Cabe resaltar que la capital del Valle del Cauca (Santiago de Cali) y su área urbana (municipios aledaños con un elevado proceso de urbanización) aportan un total de 1.778.742 t/año (equivalente a 1.078.745 m^3/año), lo que representa el 83,9 % de lo que se genera a nivel departamental (**CVC-Univalle**, 2022).

Los RCD se pueden dividir en dos categorías: residuos susceptibles de aprovechamiento y lo no aprovechables (**MADS**, 2017). En el grupo de residuos aprovechables se encuentran algunos materiales pétreos como concretos, trozos de ladrillo y bloques, cerámicas, y morteros, entre otros. El aprovechamiento de los RCD se inicia con un proceso de trituración a partir del cual se obtienen tres tamaños de fracciones: fracción gruesa (4,75 – 50 mm), fracción fina (0,075 – 4,75 mm) y polvos. Las fracciones gruesas y finas pueden utilizarse como agregados reciclados, tal como dicta la norma en los países europeos. Recientemente las Normas Técnicas Colombianas (NTC) avalaron la incorporación de agregados reciclados en mezclas de concreto estructural y no estructural mediante las especificaciones establecidas en la NTC 6421 (**ICONTEC**, 2021), aunque se definen algunos porcentajes límites para su uso, en especial en concretos estructurales (20 %). Sin embargo, en algunas regiones la producción de agregados reciclados no compite económicamente con los agregados naturales, por lo que es necesario el desarrollo de nuevos productos con mayor valor comercial que logren aumentar el interés de la industria.

Cabe anotar que en el proceso de trituración de los RCD se genera una cantidad importante (5-25 %) de material particulado de alta finura (inferior a 75 μm). Estos polvillos se consideran un subproducto y, dada su elevada capacidad de absorción de agua, no pueden emplearse como agregados o rellenos, ya que generan incrementos en la demanda de agua de mezclado y afectan la fluidez, resistencia y sorptividad de morteros y concretos (**Caneda-Martínez *et al.***, 2021; **Kim & Choi**, 2012). Por ello estos polvos de RCD no se reutilizan y terminan acumulándose al aire libre en las plantas de reciclaje o en los vertederos.

Una de las tecnologías más novedosas que se posiciona como una alternativa sostenible para el aprovechamiento integral de los RCD en materiales de construcción y sus aplicaciones, es la activación alcalina o geopolimerización, que consiste en la síntesis de materiales cementicios a partir de la interacción físicoquímica de aluminosilicatos (precursores geopoliméricos) y soluciones altamente alcalinas (activadores), a temperaturas relativamente bajas (25-100 °C) (**Provis & van Deventer**, 2009). Al utilizar el polvillo como precursor geopolimérico y los agregados reciclados se logra un aprovechamiento integral de los RCD (**Robayo-Salazar *et al.***, 2020), Cabe resaltar que al aplicar AA es posible dar utilidad a aquellos residuos pétreos de carácter mixto cuando el proceso de separación en la fuente no ha sido el adecuado. Una ventaja de la AA es su menor impacto

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
47(184)505-519, junio-septiembre de 2023. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.1892

ambiental en comparación con la producción de cemento Portland (OPC), debido a que, además de usar subproductos y residuos industriales en los materiales cementantes, estos pueden obtenerse a temperatura ambiente (**Habert *et al.***, 2011; **Turner & Collins**, 2013; **Amran *et al.***, 2020; **Komkova & Habert**, 2023).

Varios autores han investigado el uso de residuos de concreto, ladrillo y cerámica como precursores en sistemas de activación alcalina y reportan valores de resistencia a la compresión a los 28 días hasta de 80 MPa dependiendo del tipo de precursor y del activador utilizados en la mezcla cementante (**Komnitsas *et al.*,** 2015; **Allahverdi**, 2013; **Zaharaki *et al.*,** 2016; **Dadsetan *et al.***, 2019). Sin embargo, los reportes de la utilización de RCD mixtos son escasos y relativamente recientes y, en algunos casos, mencionan el uso del curado térmico (**Yıldırım *et al.***, 2021; **Tan *et al.***, 2022a; **Tan *et al.***, 2022b; **Ozcelikci *et al.***, 2023).

En estudios recientes se ha demostrado que, dependiendo del tipo de activador, la incorporación de 10 a 30 % de OPC permite producir los cementantes híbridos a temperatura ambiente (**Robayo-Salazar *et al.***, 2022; **Valencia-Saavedra *et al.***, 2021); otros autores han utilizado adiciones de escoria siderúrgica de alto horno e hidróxido de calcio como reemplazo del OPC (**Ozcelikci *et al.***, 2023).

En el presente estudio se presentan las características de concretos y elementos de construcción activados alcalinamente que incorporan, además de un precursor mixto de RCD (mezcla del polvillo de residuo de concreto, cerámica y ladrillo), los agregados reciclados gruesos y finos obtenidos a partir del RCD, en aplicación de los conceptos de la economía circular.

Materiales y métodos experimentales

La muestra de RCD se recolectó en un sitio de disposición ubicado en Cali. Posteriormente la muestra se sometió a un proceso de separación de sus componentes (**Figura 1 a, b, c, d**). Después de un procesamiento mecánico, se obtuvieron los agregados gruesos

Figura 1. RCD pétreos: **a)** Sitio de disposición. **b)** Residuo de mampostería. **c)** Residuo de concreto. **d)** Retales de ladrillo

(AGR) a partir de los residuos de concreto, y los finos a partir de los residuos de ladrillo o mampostería y de cerámica (blanca y roja) (AFR); de esos procesos se obtuvo también un polvillo, tal como se aprecia en la **figura 2**.

El tamaño máximo y máximo nominal de AGR fue de ¾" (19 mm), con 2,24 % de humedad, 5,9 % de absorción y 25,5 % de desgaste en la máquina de abrasión de Los Ángeles. Con base en la NTC 6421 (**ICONTEC**, 2021), los AGR se clasifican en la categoría T1, correspondiente a un "AGR fundamentalmente de concreto". El módulo de finura de AFR fue de 3,17.

El tamaño medio de las partículas de los polvos de concreto (Co), cerámica (Ce), y ladrillo (M), determinado por granulometría laser en un equipo Mastersizer-2000 de Malvern Instruments, fue de 57,3, 40,4 y 75,3 µm, respectivamente (**Figura 3**). Para reducir el tamaño de partícula del polvillo a un valor cercano al del cemento Portland (21,7 µm), se sometió el material a un proceso de molienda secundaria en un molino de bolas. La composición química de los polvos, determinada por fluorescencia de rayos-X (FRX) utilizando un espectrómetro MagiX-Pro PW-2440 Phillips equipado con un tubo de rodio de una potencia máxima de 4 KW, se presenta en la **tabla 1**. Así se confirmó la naturaleza de aluminosilicato ($SiO_2 + Al_2O_3$) de los residuos, lo que permite su utilización como precursor cementante en los concretos activados alcalinamente. El cemento Portland (OPC) utilizado en la producción de las mezclas, se clasifica como de uso general (tipo UG).

Figura 2. Agregados gruesos y finos obtenidos a partir de RCD

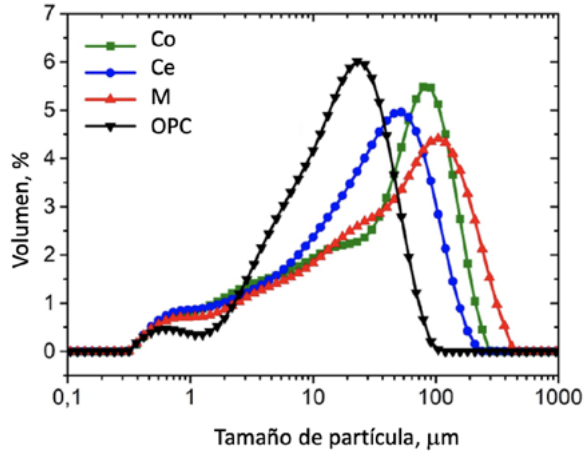

Figura 3. Distribución de tamaño de partícula de los polvos Co, Ce, M

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
47(184)505-519, junio-septiembre de 2023. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.1892

Como precursor de RCD en la producción de los concretos se empleó una mezcla de Co, Ce, y M en proporciones de peso iguales, y como activadores se utilizaron dos tipos, una solución de hidróxido de sodio y silicato de sodio (NaOH/SS), y un activador sólido, el sulfato de sodio (Na_2SO_4). La composición del silicato de sodio empleado fue SiO_2 = 32,1 %, Na_2O = 11,9 %, H_2O = 56,0 %. En estudios previos se habían determinado las proporciones del activador y de la adición de OPC (10 a 30 %); este último se utilizó para producir cementantes híbridos que fraguan y adquieren resistencia a temperatura ambiente, con lo que se evitaron los procesos de curado térmico (**Robayo-Salazar *et al.***, 2022; **Valencia-Saavedra *et al.***, 2021).

Los concretos activados alcalinamente a partir de RCD y agregados 100 % reciclados (AFR y AGR), se diseñaron y produjeron adaptando el método de volumen absoluto propuesto en la norma 211.1 del American Concrete Institute (ACI). En los concretos el contenido del precursor se fijó con respecto al material cementante, así: para los fabricados con cemento de 90 % RCD+10 % OPC-NaOH/SS fue de 550 kg/m^3 y para los fabricados con material cementante de 70 % RCD+30 % OPC-Na_2SO_4 fue de 500 kg/m^3, lo que dio una resistencia de diseño (28 días de curado a temperatura ambiente de 25 °C) de 21 MPa y 17,5 MPa, respectivamente. La relación de líquidos y sólidos utilizada en los concretos fue de 0,30 y 0,37, respectivamente. Cabe anotar que con miras a la comparación, se produjo un concreto de referencia basado 100% en el OPC. En la **tabla 2** se presenta la dosificación de los concretos producidos, en la cual se tuvieron en cuenta las proporciones óptimas del activador reportadas en **Robayo-Salazar *et al.*** (2022) y **Valencia-Saavedra *et al.*** (2021); así, en el primer sistema se utilizaron relaciones NaOH/SS de 0,25 y (NaOH+SS) / (precursor cementante) de 0,4; en el caso del Na_2SO_4, la proporción utilizada fue de 4 % del activador con respecto al precursor cementante que incluía la proporción de OPC en la mezcla (RCD+OPC).

Tabla 1. Composición química de residuo de concreto (Co), cerámica (Ce), mampostería (M), residuo mixto (RCD), y cemento (OPC)

Residuo	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	Pérdidas por ignición
Co	36,13	6,78	8,33	0,53	28,66	1,85	0,64	0,63	1,16	15,94
Ce	59,63	5,48	16,10	0,72	9,79	0,77	0,45	1,56	0,35	4,07
M	59,04	7,76	18,42	0,80	5,37	2,39	1,05	1,53	0,21	2,92
RCD	51,60	6,67	14,28	0,68	14,61	1,67	0,71	1,24	0,57	7,64
OPC	19,13	4,32	4,42	-	57,70	1,60	-	-	2,32	9,78

Tabla 2. Dosificación (kg/m^3) de los concretos de referencia (OPC) y los concretos activados alcalinamente basados en RCD, con agregados 100 % reciclados (AFR y AGR)

Material	Tipo de concreto geopolimérico		Concreto de referencia
	90%RCD+10%OPC-NaOH/SS	70%RCD+30%OPC-Na_2SO_4	OPC
RCD	495,0	350,0	-
OPC	55,0	150,0	550,0
AFR	412,5	762,2	412,5
AGR	962,5	767,4	962,5
Agua	102,9	220,8	350,0
SS	176,0	-	-
NaOH	44,0	-	-
Na_2SO_4	-	20,0	-

Los concretos se obtuvieron en una mezcladora horizontal CreteAngle; los basados en OPC se curaron bajo agua, y los geopoliméricos se curaron a temperatura ambiente (≈25 °C), garantizando una humedad relativa (HR) superior al 80 % hasta la edad del ensayo. La resistencia a la compresión de los concretos se evaluó conforme a la norma NTC 673 en una prensa ELE International con capacidad de 1.500 KN, a una velocidad de 1 mm/min hasta la rotura y edades de curado de 7, 14 y 28 días; los valores que se reportan corresponden a un valor promedio de tres probetas. Complementariamente se analizó el impacto ambiental de los materiales utilizados en cada diseño, para lo cual se calculó el potencial de calentamiento global (PCG) asociado a las materias primas utilizando la base de datos Ecoinvent v3.6 para el análisis de las emisiones (**Swiss Centre for Life Cycle Inventories**, 2019).

Las aplicaciones constructivas desarrolladas correspondieron a bloques macizos, bloques de perforación vertical y adoquines, fabricados en una máquina vibrocompactadora. Para producir los elementos prefabricados a partir de los concretos geopoliméricos se emplearon las mezclas (90 % RCD+10 % OPC-NaOH/SS y 70 % RCD+30 % OPC-Na_2SO_4). Los elementos producidos se caracterizaron a los 7 y los 28 días de curado según las especificaciones establecidas por la norma NTC 4026 (**ICONTEC**, 1997) para el caso de los bloques y la NTC 2017 (**ICONTEC**, 2018) para el caso de los adoquines. El ensayo de compresión de los bloques se hizo en una prensa hidráulica Controls, modelo CT-1500, de 1.500 KN de capacidad a compresión, y el ensayo de flexotracción de los adoquines en una máquina universal de ensayos Tinius Olsen, modelo H50KS, de 50 KN de capacidad a compresión.

Resultados y discusión

Cementantes híbridos utilizados

Los cementos híbridos se caracterizan por la coexistencia de geles de aluminosilicato sódico hidratado (N-A-S-H) y de silicato cálcico hidratado (C-S-H y C-A-S-H), que al interactuar dan lugar a geles híbridos (C-(N)-A-S-H) (**García-Lodeiro *et al.***, 2012; **Shagñay *et al.***, 2021). En la **figura 4** se pueden observar las micrografías de los cementos híbridos con composición de 90 % RCD+10 % OPC-NaOH/SS (**Figura 4a**) y 70 % RCD+30 % OPC-Na_2SO_4 (**Figura 4b**) Los resultados de los análisis de microscopía electrónica de barrido y de energía dispersiva de rayos X (EDS) permitieron determinar la composición elemental de los geles, la cual se representa en un diagrama ternario plano, SiO_2-Al_2O_3-CaO; en este diagrama se aprecian dos zonas correspondientes a geles del tipo C-S-H y C-A-S-H, de composición media alta en Ca^{2+} (zona inferior izquierda), y geles del tipo (N,C)-A-S-H, de composición baja o intermedia en Ca^{2+} (zona central y superior derecha), lo que concuerda con lo reportado por otros autores para cementos híbridos basados en precursores como cenizas volantes, escorias siderúrgicas de alto horno y puzolanas naturales (**Djobo *et al.***, 2016; **García-Lodeiro *et al.***, 2013). En sistemas de ceniza volante de 70% CV+30 %OPC-NaOH/SS, **García-Lodeiro *et al.*** (2013) reportaron relaciones de CaO/SiO_2 entre 0 y 0,3, con contenidos de Al_2O_3 de hasta un 30 % para los geles (N,C)-A-S-H. A partir de mezclas de geles sintetizados en laboratorio, para el gel C-A-S-H se han sugerido relaciones de $0{,}72<CaO/SiO_2<1{,}94$ y de $0<Al_2O_3/SiO_2<0{,}1$, con un contenido de sodio mínimo; para el gel (N,C)-A-S-H, relaciones de $0<CaO/SiO_2<0{,}3$ y $0{,}05<Al_2O_3/SiO_2<0{,}43$, en tanto que el contenido de sodio en esta fase está determinado por la relación $0{,}00<Na_2O/Al_2O_3<1{,}85$ **(García-Lodeiro *et al.***, 2011). Ppara el sistema de composición 90 % RCD+10 % OPC-NaOH/SS (**Figura 4a**), en el presente estudio se obtuvieron geles C-S-H y C-A-S-H con relaciones de $0{,}66<CaO/SiO_2<1{,}44$ ($1{,}01<Ca/Si<2{,}20$) y contenidos de CaO y Al_2O_3 de hasta 55 % y12 %, respectivamente, mientras que en los geles de tipo (N,C)-A-S-H las relaciones fueron de $0{,}03<CaO/SiO_2<0{,}31$ ($0{,}04<Ca/Si<0{,}48$), con porcentajes de CaO inferiores (2-20 %) y un contenido de Al_2O_3 de hasta 30 %, para una relación de $0{,}06<Al_2O_3/SiO_2<0{,}56$, es decir, valores cercanos a los sugeridos por **García-Lodeiro *et al.*** (2011). En **figura 4 l**os geles con menor proporción de Ca se identifican como (N,C)-A-S-H y aquellos con Ca alto, como (C, N)-A-S-H.

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
47(184)505-519, junio-septiembre de 2023. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.1892

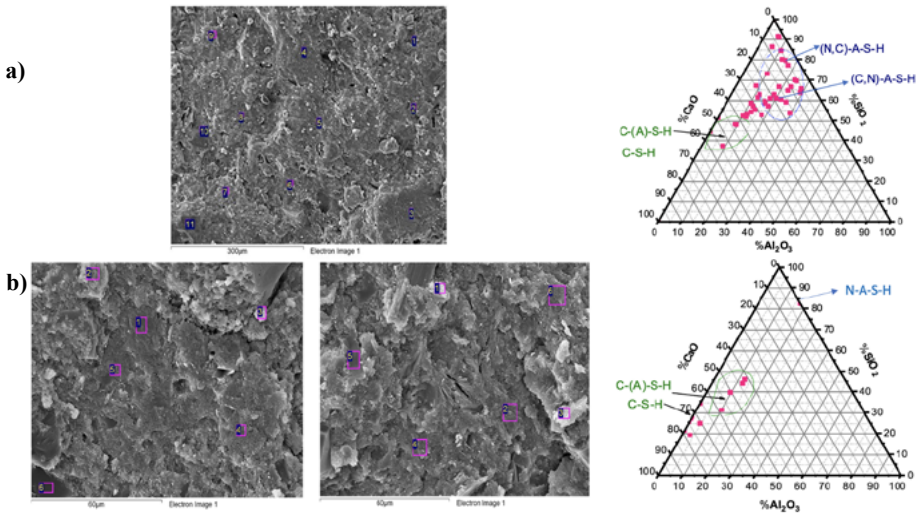

Figura 4. Observación SEM y microanálisis composicional (EDS) de los sistemas híbridos: **a)** 90%RCD+10%OPC-NaOH/SS; **b)** 70%RCD+30%OPC-Na_2SO_4

Debido a la mayor proporción de OPC presente en la mezcla (30 %), en el sistema de 70 % RCD+30 % OPC-Na_2SO_4 se apreciaron composiciones ricas en calcio ubicadas en la zona inferior izquierda (**Figura 4b**), lo cual indica, además de una mayor proporción de geles C-S-H y C-A-S-H, la presencia de otros componentes ricos en calcio, probablemente hidróxido, carbonato o sulfato cálcicos; los porcentajes de CaO en esta zona variaron entre 41 y 78 %, y el Al_2O_3 fue inferior al 12,8 %. En la región superior izquierda (**Figura 4b**) se aprecian puntos muy cercanos a la línea SiO_2-Al_2O_3, que confirman la presencia de geles N-A-S-H; por el contrario, no se observaron geles del tipo (N,C)-A-S-H o (C,N)-A-S-H, lo que concuerda con lo expresado por **García-Lodeiro *et al.*** (2011, 2013) en el sentido de que la estabilidad del gel (N,C)-A-S-H se reduce en presencia de los altos contenidos de calcio en la mezcla y de un pH>12, favoreciendo la formación de C-A-S-H. En general, se obtuvieron las relaciones $0{,}00<Al_2O_3/SiO_2<0{,}33$ y $CaO/SiO_2>0{,}90$.

Caracterización de las mezclas de concreto híbrido

La resistencia a la compresión reportada para el concreto activado alcalinamente producido con el cementante de 90 % RCD+10 % OPC-NaOH/SS, 100 % de AFR y 100 % de AGR, fue de 10,9 MPa y 21,1 MPa a los 7 y 28 días, respectivamente. El concreto de 70 % RCD+30 % OPC-Na_2SO_4 reportó una resistencia a la compresión a los 7 días de curado de 10 MPa, exhibiendo un incremento del 73 % a los 28 días (18 MPa), en tanto que a los 90 días alcanzó una resistencia de 24,2 MPa.

La menor resistencia a la compresión de los sistemas activados con Na_2SO_4 en edades cortas, se puede atribuir al menor pH del sulfato (8,0) comparado con el pH de la solución NaOH/SS (pH SS 13,4 y pH NaOH 13,8) (**Rashad *et al.***, 2013). Sin embargo, en el proceso de hidratación del OPC se genera hidróxido de calcio o portlandita, que al reaccionar con el sulfato de sodio, produce NaOH incrementando el pH y contribuyendo a la disolución del precursor, a la par que se genera sulfato cálcico hidratado (yeso, $CaSO_4.2H_2O$), el cual se transforma posteriormente en ettringita ($3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$), lo que densifica la matriz; estos dos factores contribuyen positivamente a la resistencia (**Adesina & Rodrigue Kaze**, 2021), tal como se observó en el presente estudio. Las reacciones propuestas por **García-Lodeiro *et al.*** (2018) para explicar este comportamiento al utilizar bentonita como precursor y Na_2SO_4 al 5 % son las siguientes:

Según la norma sismo resistente colombiana (NSR-10) (**MADS**, 2010), equivalente al Reglamento ACI 318 del **American Concrete Institute** (2019), la resistencia a la compresión mínima para clasificar un concreto como estructural debe ser 17,5 MPa. En este

sentido, los concretos evaluados cumplieron con la resistencia mínima para ser catalogados como estructurales a los 28 días de curado. Cabe anotar que la norma técnica colombiana NTC 6421 (**ICONTEC**, 2021) avala el uso de agregados gruesos reciclados (AGR) en mezclas de concreto; para usos estructurales (máx. 35 MPa) se permite la incorporación de un 20 % de AGR, y para usos no estructurales (máx. 21 MPa), se puede incorporar hasta un 100 % de AGR; sin embargo, la norma no autoriza el uso de AFR. A pesar de estos límites, los resultados obtenidos en este estudio demuestran la posibilidad de lograr resistencias estructurales (>17,5 MPa) no solo con la incorporación de un 100 % de AGR, sino también un 100 % de AFR y un cemento híbrido activado alcalinamente basado en RCD-mixto (90 %), siendo el contenido máximo de OPC del 30 %.

La huella de carbono asociada a los materiales utilizados en los concretos híbridos se presenta en la **tabla 3** y se la compara con su equivalente basado 100 % en OPC. Para el cálculo del potencial de calentamiento global (PCG), la unidad funcional fue de 1 m^3 de concreto. Se apreció que el PCG de los concretos activados alcalinamente con NaOH/SS y Na_2SO_4 (261 y 147 kg CO_2 eq/m^3, respectivamente) fue notablemente inferior al de los concretos basados en OPC (470 kg CO_2 eq/m^3), con una huella de carbono de hasta 68,7 % menor que los concretos de referencia. Esta reducción los cataloga como concretos amigables con el medio ambiente comparados con los concretos convencionales. Algunos autores han reportado en concretos activados alcalinamente basados en GBFS reducciones del PCG de hasta 57 % (**Komkova & Habert**, 2023).

Entre los factores que influyen en el valor de PCG en un concreto activado alcalinamente y en los elementos diseñados, el tipo de activador tiene un aporte significante (**Turner & Collins**, 2013; **Ouellet-Plamondon & Habert**, 2015; **Alsalman *et al.***, 2021), por lo cual el diseño de mezclas con el uso de activadores sólidos alternativos como el sulfato de sodio (Na_2SO_4), que, a diferencia del silicato y del hidróxido de sodio, se puede obtener a partir de salmueras naturales, depósitos de evaporación cristalina o como subproducto de la fabricación de diversos productos, permitiría disminuir aún más la huella de carbono de este tipo de materiales. Esto se corrobora en los resultados presentados en la **tabla 3**, donde el PCG del concreto activado con Na_2SO_4 fue inferior en un 43,7 % al activado con NaOH/SS, y un 68,7 % inferior al concreto de referencia, aun conteniendo una adición del 30 % de OPC. Sin embargo, una limitante de este tipo de concreto podría ser su menor desarrollo resistente. Cabe anotar que el valor utilizado como PCG para el Na_2SO_4 ($6{,}39 \times 10^{-1}$ kg CO_2 eq/kg) corresponde a su obtención a partir de anhidrita, pero cuando se obtiene de fuentes naturales este valor se reduce significativamente ($1{,}82 \times 10^{-1}$

Tabla 3. Inventario ambiental de los concretos (unidad funcional: 1 m^3) (PGC)

Material	PGC (kg CO_2 eq/kg)	Concreto activado alcalinamente		Concreto de referencia OPC
		90%RCD+10%OPC-NaOH/SS	70%RCD+30%OPC-Na_2SO_4	
RCD	$3{,}80 \times 10^{-3}$	1,88	1,33	–
OPC	$8{,}45 \times 10^{-1}$	46,48	126,75	464,75
Na_2SiO_3	$8{,}12 \times 10^{-1}$	142,91	-	–
NaOH	$14{,}6 \times 10^{-1}$	64,24	-	–
Na_2SO_4	$6{,}39 \times 10^{-1}$	-	12,78	-
Water	$5{,}50 \times 10^{-4}$	0,02	0,12	0,19
AFR	$3{,}98 \times 10^{-3}$	1,64	3,03	1,64
AGR	$3{,}98 \times 10^{-3}$	3,83	3,05	3,83
TOTAL PGC (kg CO_2 eq/m^3)		261,00	147,07	470,42

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
47(184)505-519, junio-septiembre de 2023. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.1892

kg CO_2 eq/kg). **Adesina & Rodrigue Kaze** (2021) mencionan que en comparación con el SS, el aporte a la huella de carbono del sulfato de sodio es inferior en un 63,4 % y tiene un costo más bajo (un 83,2 % menos).

Alsalman *et al.* (2021) afirman que el PCG de concretos activados alcalinamente de resistencia 40 MPa es un 73 % menor al de concretos equivalentes a base de OPC; cabe anotar que en estos sistemas se utiliza NaOH/SS como activador, al cual le atribuyen un aporte al PCG del 87 %. Según los diseños de mezcla y el PCG de los activadores utilizados, el aporte del activador NaOH/SS al PCG del concreto en el presente estudio fue de 79,4 %, mientras que en el caso del activador Na_2SO_4 fue apenas del 8,7 %, tal como se muestra en la **figura 5**. En este último el mayor aporte al PCG (86,2 %) corresponde al OPC debido a la proporción utilizada en la mezcla de concreto (30 %).

Al relacionar el PCG con la resistencia mecánica del concreto a los 28 días, se obtuvieron valores de 12,4, 8,2 y 27,6 kg·CO_2 eq/MPa para las mezclas de 90% RCD+10 % OPC-NaOH/SS, 70 % RCD+30 % OPC-Na_2SO_4 y OPC, respectivamente. **Ozcelikci *et al.*** (2023) reportan valores en el rango de 8 a 12 kg·CO_2 eq/MPa para morteros activados con NaOH/SS y adicionados con un 20 % de escoria siderúrgica. Este índice de eficiencia indica que, desde el punto de vista ambiental, los dos tipos de concretos activados alcalinamente son competitivos frente al concreto OPC para la manufactura de elementos constructivos tales como bloques o adoquines de tipo estructural.

Diseño, producción y caracterización de elementos prefabricados

La NTC 4026 clasifica los bloques estructurales dependiendo de la resistencia a la compresión en clase alta o baja, además establece tres clases de unidades de mampostería de concreto según su peso: de peso normal (2.000 kg/m³ o más), de peso medio (entre 1.680 kg/m³ y menos de 2.000 kg/m³) y de peso liviano (<1.680 kg/m³). En la **figura 6** se muestran los concretos y elementos prefabricados del tipo de bloques perforados, bloques macizos y adoquines producidos con OPC y con los concretos activados alcalinamente.

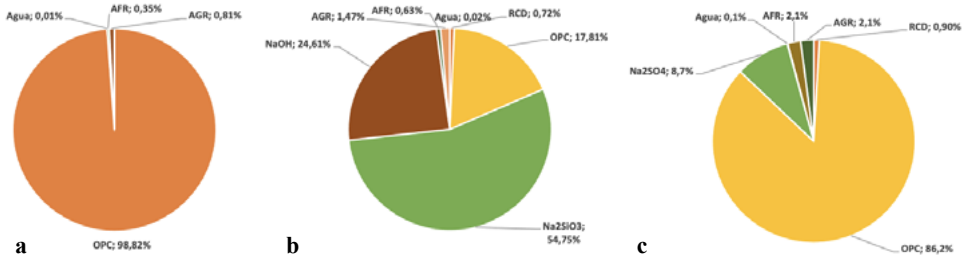

Figura 5. Contribución (%) de las materias primas en la huella de carbono (PCG: kg·CO_2·eq/m³). **a)** Concreto de referencia, 100 % OPC; **b)** 90%RCD+10%OPC-NaOH/SS; **c)** 70%RCD+30%OPC-Na_2SO_4

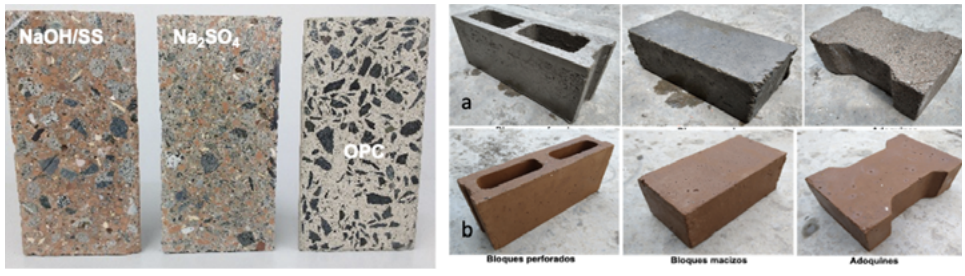

Figura 6. Concretos y elementos prefabricados. **a)** Elementos a base de OPC; **b)** elementos a base de concretos activados alcalinamente

De acuerdo a los resultados presentados en la **tabla 4**, el bloque perforado de OPC fabricado a partir del aprovechamiento de los RCD como AFR (100 %) y AGR (100 %), puede clasificarse como un bloque estructural de clase baja de peso liviano (1.671,9 kg/m^3), con un valor de resistencia a la compresión de 23,8 %, superior al mínimo establecido por la NTC 4026 (8 MPa) para esta clasificación. Con respecto al porcentaje de absorción, el bloque perforado reportó un valor de 16,7 %, por debajo del máximo especificado por la norma (18 %). Por su parte, el bloque de OPC macizo se clasificó como un bloque estructural clase alta de peso normal (2.056,1 kg/m^3), con una resistencia a la compresión a los 28 días de 24,3 MPa y una absorción de 7,28 %. Para este tipo de bloque la norma NTC 4026 especifica un mínimo de resistencia de 13 MPa y máximo un 9 % de absorción.

Según los resultados de resistencia, los bloques activados alcalinamente acorde podrían clasificarse como unidades estructurales de clase alta; sin embargo, la NTC 4026 establece un límite de absorción de agua de máximo 12 % para la clase alta y de 15 % para la clase baja cuando el bloque es de peso mediano. Con base en esto, el bloque perforado activado con Na_2SO_4 (13,6 %) se puede clasificar como bloque estructural de clase baja, y el bloque perforado activado con NaOH/SS clasificaría como bloque estructural de alta resistencia. El bloque macizo activado con NaOH/SS cumplió con todos los requisitos físico-mecánicos especificados en la norma para ser clasificado como bloque estructural de clase alta.

En cuanto a los adoquines de concreto para pavimentos, la norma NTC 2017, los clasifica dependiendo de los requisitos físico-mecánicos en adoquines para tráfico peatonal, tráfico vehicular (incluyendo patios de puertos y terminales de carga, aeropuertos, terminales de transporte, estaciones de servicio, bodegas, etc.), y cargas estáticas distribuidas (de almacenamiento a granel). La norma NTC 2017 considera además la geometría o forma; en este estudio la geometría de los adoquines producidos fue tipo 2, "hueso de perro", con forma de "I".

En la **tabla 5** se presentan los resultados de caracterización obtenidos para los adoquines. Se puede apreciar que los adoquines basados en OPC y los RCD activados alcalinamente con NaOH/SS y Na_2SO_4 reportaron un módulo de rotura de 4,25, 4,20 y 4,60 MPa, respectivamente, valores que se encuentran dentro del rango especificado en la norma NTC 2017.

Tabla 4. Resultados y especificaciones técnicas para los bloques estructurales

Tipo de Bloque	Material (Clase)	(Rc 28), evaluada sobre el área neta promedio (Anp) (MPa)		Peso (kg/m^3)	Absorción de agua (%) según el peso	
		NTC 4026 (mínimo)	Resultado experimental		NTC 4026 (máximo)	Resultado experimental
Bloque perforado	OPC - (Clase baja)	8	9,90 ± 0,02	1,671,9	18	16,70
	AA - NaOH+SS (Clase alta)	13	19,8 ± 1,5	1951,2	12	11,3
	AA - Na_2SO_4 (Clase baja)	8	9,6 ± 0,6	1880,0	15	13,6
Bloque macizo	OPC - (Clase alta)	13	24,29 ± 0,61	2056,1	9	7,28
	AA - NaOH+SS (Clase alta)	13	22,6 ± 0,7	1938,7	12	11,6
	AA - Na_2SO_4 (Clase baja)	13	22,5 ± 0,8	1790,0	15	14,1

AA: activado alcalinamente

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
47(184)505-519, junio-septiembre de 2023. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.1892

Tabla 5. Resultados y especificaciones técnicas para los adoquines según la NTC 2017

Tipo de adoquín	Módulo de rotura (Mr) 28 días (MPa)		Absorción de agua (%)	
	NTC 2017 (mínimo)	Resultado experimental	NTC 2017 (máximo)	Resultado experimental
OPC	4,2 − 5,0	4,25 ± 0,05	7	11,17 ± 0,10
AA - NaOH+SS		4,20 ± 0,4		10,10± 0,10
AA - Na_2SO_4		4,60 ± 0,5		10,80± 0,10

No obstante, el porcentaje de absorción de agua fue de 11,17 % (OPC), 10,10 % (NaOH/SS) y 10,80 % (Na_2SO_4), resultados que superan el máximo establecido por la NTC, que se sitúa en un 7 %. Cabe resaltar que el nivel de absorción de agua de las unidades prefabricadas producidas se vio influenciado por el proceso de colocación y compactación que se empleó, que en este caso fue semiautomático. Además, la utilización de agregados reciclados en órdenes del 100 % promueve una mayor absorción de agua; por lo tanto, al reducir el porcentaje de sustitución de los agregados naturales por los reciclados, o al aumentar el nivel de compactación y vibrado durante el proceso de conformación de estos elementos, el porcentaje de absorción de agua puede ajustarse a lo especificado en la norma.

Conclusiones

A partir de la combinación del precursor RCD (polvillo mixto, fracción fina) y una disolución compuesta por el activador alcalino (hidróxido de sodio (NaOH) + silicato de sodio (SS) y sulfato de sodio (Na_2SO_4)) con adición de OPC en pequeñas proporciones (10 - 30 % en peso) y agregados reciclados (100 % AGR y 100 % AFR), fue posible obtener concretos híbridos activados alcalinamente que cumplen con las normas colombianas para ser clasificados como concretos estructurales. Este tipo de concreto permite un aprovechamiento integral de los RCD.

La reutilización de RCD en la producción de elementos de construcción tales como bloques estructurales y no estructurales mediante la tecnología de activación alcalina es una opción para minimizar el impacto ambiental por los elevados volúmenes de RCD generados, y reducir el consumo de recursos naturales, energéticos y la huella de carbono, contribuyendo así a una economía circular del sector de la construcción.

Se recomienda el uso del sulfato de sodio como activador debido a su menor contribución al PCG, así como por las facilidades tecnológicas que brinda tanto en su manejo como en su utilización en la producción de concretos y elementos de construcción.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad del Valle la financiación del estudio.

Contribución de los autores

R.M. de G.: conceptualización, recursos financieros, supervisión del trabajo, análisis y escritura del documento. R.R-S. y W.V-S análisis de laboratorio y redacción del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

Adesina, A. & Rodrigue Kaze, C. (2021). Physico-mechanical and microstructural properties of sodium sulfate activated materials: A review. *Construction and Building Materials*, *295*, 123668. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123668.

Akhtar, A., Sarmah, A.K. (2018). Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. *Journal Cleaner Production, 186*, 262–281. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085

Allahverdi, A. (2013). Use of construction and demolition waste (CDW) for alkali- activated or geopolymer cements. In F. Pacheco Torgal, V. Tam, J.A. Labrincha, Y. Ding y J. de Brito (Eds.), *Handbook of recycled concrete and demolition waste*, Woodhead Publishing Series.

Alsalman, A., Assi, L.N., Kareem, R.S., Carter, K., Ziehl, P. (2021). Energy and CO_2 emission assessments of alkali-activated concrete and Ordinary Portland Cement concrete: A comparative analysis of different grades of concrete. *Cleaner Environmental Systems, 3*, 100047. https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100047

American Concrete Institute. (2019). ACI 318, Requisitos del código de construcción para concreto estructural. https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/51687637

Amran, Y.H.M., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., El-Zeadani, M. (2020). Clean production and properties of geopolymer concrete; A review. *Journal of Cleaner Production*, *251*, 119679. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119679.

Caneda-Martínez, L., Monasterio, M., Moreno-Juez, J., Martínez-Ramírez, S., García, R., Frías, M. (2021). Behaviour and Properties of Eco-Cement Pastes Elaborated with Recycled Concrete Powder from Construction and Demolition Wastes. *Materials*, *14* (5), 1299 , https://doi.org/10.3390/ma14051299

Coaffee, J. (2008). Risk, resilience, and environmentally sustainable cities. *Energy Policy*, *36* (12), 4633-4638. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.048.

CONAMA. (2002). Resolução CONAMA No 307 Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. https://cetesb.sp.gov.br/licenciamento/documentos/2002_Res_CONAMA_307.pdf

CVC-Univalle. (2022). Convenio Interadministrativo 0146-2020, Cali, Colombia.

Dadsetan, S., Siad, H., Lachemi, M., Sahmaran, M. (2019). Construction and demolition waste in geopolymer concrete technology: a review. *Magazine of Concrete Research*, *71* (23), 1232-1252. https://doi.org/ 10.1680/jmacr.18.00307.

Deloitte. (2015). Construction and Demolition Waste management in the Czech Republic. https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/studies/deliverables/CDW_Czech%20Republic_Factsheet_Final.pdf.

Deloitte. (2015). Screening template for Construction and Demolition Waste management in The Netherlands. https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/studies/deliverables/CDW_The%20Netherlands_Factsheet_Final.pdf

Departamento Nacional de Planeación. (2016). Documento CONPES 3874, Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos. https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3874.pdf

Deutsches Institut fur Normung E.V. (2017). DIN EN 4226-101/102. Recycled Aggregates for concrete in accordance with DIN EN 12620. https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=DIN%204226%2D102&item_s_key=00728457

Djobo, J.N.Y., Tchakouté, H.K., Ranjbar, N., Elimbi, A., Tchadjié, L.N., Njopwouo, D. (2016). Gel Composition and Strength Properties of Alkali-Activated Oyster Shell-Volcanic Ash: Effect of Synthesis Conditions. *Journal of American Ceramic Society, 99*, 3159-3166. https://doi.org/10.1111/jace.14332

European Commission. (2016). Construction and demolition waste (CDW). https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/construction-and-demolition-waste_en#overview

García-Lodeiro, I., Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., Macphee, D.E. (2011). Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram Na_2O–CaO–Al_2O_3–SiO_2–H_2O. *Cement and Concrete Research*, *41*, 923–931. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.05.006

García-Lodeiro, I., Maltseva, O., Palomo, A., Fernández-Jiménez, A. (2012). Hybrid alkaline cements. Part I: Fundamentals. *Romanian Journal of Materials*, *42*(4), 330-335.

García-Lodeiro, I., Fernández-Jiménez, A., Palomo, A. (2013). Variation in hybrid cements over time. Alkaline activation of fly ash-portland cement blends. *Cement and Concrete Research*, *52*, 112-122. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.03.022

García-Lodeiro, I., Fernández-Jiménez, A., Palomo, A. (2018). Hybrid alkaline cements: Bentonite-OPC binders. *Minerals*, *8*, 137. https://doi.org/10.3390/min8040137

Gobierno de España. (2008). Real Decreto 105/2008 por el cual se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición. https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2008-2486

Gobierno de España. (2011). Ley 22/2011, Residuos y Suelos Contaminados. https://www.boe.es/buscar/pdf/2011/BOE-A-2011-13046-consolidado.pdf

Habert, G., D'Espinose De Lacaillerie, J.B., Roussel, N. (2011). An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: Reviewing current research trends. *Journal of Cleaner Production*, *19* (11) 1229–1238, https://doi.org/ 10.1016/j.jclepro.2011.03.012

Huang, B., Wang, X., Kua, H., Geng, Y., Bleischwitz, R., Ren, J. (2018). Construction and demolition waste management in China through the 3R principle. *Resources, Conservation and Recycling, 129*, 36-44. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.029

ICONTEC. (1997). NTC 4026, Unidades (bloques y ladrillos de concreto), para mampostería estructural. https://tienda.icontec.org/gp-ingenieria-civil-y-arquitectura-unidades-bloques-y-ladrillos-de-concreto-para-mamposteria-estructural-ntc4026-1997.html

ICONTEC. (2018). NTC 2017, Adoquines de concreto para pavimentos. https://tienda.icontec.org/gp-adoquines-de-concreto-para-pavimentos-ntc2017-2018.html

ICONTEC. (2021). NTC 6421, Agregados gruesos reciclados para uso en el concreto hidráulico. https://tienda.icontec.org/gp-agregados-gruesos-reciclados-para-uso-en-el-concreto-hidraulico-ntc6421-2021.html

Kim Y.J., Choi, Y.W. (2012). Utilization of waste concrete powder as a substitution material for cement. *Construction and Building Materials*, *30*, 500-504. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.042

Komkova, A., Habert, G. (2023). Environmental impact assessment of alkali-activated materials: Examining impacts of variability in constituent production processes and transportation. *Construction and Building Materials*, *363*, 129032. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129032

Komnitsas, K., Zaharaki, D., Vlachou, A., Bartzas, G., Galetakis, M. (2015). Effect of synthesis parameters on the quality of construction and demolition wastes (CDW) geopolymers. *Advanced Powder Technology*, *26*(2), 368-376. https://doi.org/10.1016/j.apt.2014.11.012

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo-Resistente (NSR-10). https://nuevalegislacion.com/files/susc/cdj/conc/nsr_10.pdf

MADS. (2017). Resolución No. 0472, Reglamento para la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición - RCD. https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-0472-de-2017/.

MADS. (2019). Estrategia Nacional de Economía Circular. https://economiacircular.minambiente.gov.co/index.php/lineas-de-accion/flujo-materiales-de-construccion/

MADS. (2021). Resolución No. 1257, Por la cual se modifica la Resolución 0472 de 2017 sobre la gestión integral de los residuos de construcción y demolición – RCD y se adoptan otras disposiciones. https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-1257-de-2021/

Ministerio de Transporte. (2016). Code on Structural Concrete EHE-08, España. http://asidac.es/asidac-en/wp-content/uploads/2016/07/EHE-ENG.pdf

Naciones Unidas. (2018, diciembre). Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40155/24/S1801141_es.pdf

Ortiz, O., Castells, F., Sonnemann, G. (2009). Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. *Construction and Building Materials*, *23* (1), 28–39. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.012.

Ouellet-Plamondon, C., Habert, G. (2015). Life cycle assessment (LCA) of alkali-activated cements and concretes. In F. Pacheco-Torgal, J.A. Labrincha, C. Leonelli, A. Palomo, P. Chindaprasirt (Eds), *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*, Woodhead Publishing.

Ozcelikci, E., Kul, A., Gunal, M.F., Ozel, B.F., Yildirim, G., Ashour, A., Sahmaran, M. (2023). A comprehensive study on the compressive strength, durability-related parameters and microstructure of geopolymer mortars based on mixed construction and demolition waste. *Journal of Cleaner Production*, *396*, 136522, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136522

Provis, J., van Deventer, J.S.J. (2009). *Geopolymers: Structure, processing properties and industrial applications*, Woodhead Publishing Ltda.

Rashad, A.M., Bai, Y., Basheer, P.A.M., Milestone, N.B., Collier, N.C. (2013). Hydration and properties of sodium sulfate activated slag. *Cement and Concrete Composites, 37*, 20-29. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.12.010

Robayo-Salazar, R., Valencia-Saavedra, W., Mejía de Gutiérrez, R. (2022). Recycling of concrete, ceramic, and masonry waste via alkaline activation: Obtaining and characterization of hybrid cements. *Journal of Building Engineering, 46*, 103698. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103698.

Robayo-Salazar, R.A., Valencia-Saavedra, W. Mejía de Gutiérrez, R. (2020). Construction and Demolition Waste (CDW) Recycling — As Both Binder and Aggregates — In Alkali-Activated Materials: A Novel Re-Use Concept. *Sustainability*, *12*, 5775, https://doi.org/10.3390/su12145775

Shagñay, S., Bautista, A., Velasco, F., Torres-Carrasco, M. (2021). Hybrid cements: Towards their use as alternative and durable materials against wear. *Construction and Building Materials*, *312*, 125397, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125397.

Swiss Centre for Life Cycle Inventories. (2019). Ecoinvent OpenLCA database version 3.6. https://www.ecoinvent.org/database.html

Tan, J., Cai, J., Li, J. (2022a). Recycling of unseparated construction and demolition waste (UCDW) through geopolymer technology. *Construction and Building Materials, 341*, 127771. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127771.

Tan, J., Cizer, Ö., De Vlieger, J., Dan, H., Li, J. (2022b). Impacts of milling duration on construction and demolition waste (CDW) based precursor and resulting geopolymer: Reactivity, geopolymerization and sustainability. *Resources, Conservation and Recycling*, *184*, 106433, https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106433.

Turner, L.K., Collins, F.G. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO2-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials*, *43*, 125–130. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023

Valencia-Saavedra, W., Robayo-Salazar, R.A., Mejía de Gutiérrez, R. (2021). Alkali-Activated Hybrid Cements Based on Fly Ash and Construction and Demolition Wastes Using Sodium Sulfate and Sodium Carbonate. *Molecules, 26* (24), 7572. https://doi.org/10.3390/molecules26247572

Yıldırım, G., Kul, A., Özçelikci, E., Sahmaran, M., Aldemir, A., Figueira, D., Ashour, A. (2021). Development of alkali-activated binders from recycled mixed masonry-originated waste. *Journal of Building Engineering, 33*, 101690. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101690

Zaharaki, D., Galetakis, M., Komnitsas, K. (2016). Valorization of construction and demolition (C&D) and industrial wastes through alkali activation. *Construction and Building Materials*, *121*, 686–693. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.051