

Fecha de presentación del Informe: Día Mes Año **1. Datos generales del Proyecto**

Código del proyecto: 21025			
Título del proyecto: VALORIZACION DE RESIDUOS DE CONSTRUCCION Y DEMOLICION (RCD) PARA LA ELABORACION DE MATERIALES DE CONSTRUCCION VIA ACTIVACION ALCALINA			
Facultad o Instituto Académico: Ingeniería			
Departamento o Escuela: Ingeniería de Materiales			
Grupo (s) de investigación: Materiales Compuestos			
Entidades: Universidad del Valle			
Palabras claves: Residuos de construcción y demolición, geopolímeros, materiales compuestos.			
Investigadores ¹	Nombre	Tiempo asignado	Tiempo dedicado
Investigador Principal	Mónica A. Villaquirán	10	10
Coinvestigadores	Ruby Mejía de Gutiérrez	8	8
Otros participantes	Ashley Bonilla, estudiante de Maestría	20	20

2. Resumen ejecutivo:Resumen

Actualmente, los residuos de construcción y demolición (RCD) son los residuos mayormente generados a nivel mundial. En Colombia, se generan ~ 22 millones de toneladas de RCD por año, de las cuales 1 millón de toneladas se generan en Santiago de Cali; por lo tanto, la mitigación y reutilización de RCD son importantes para reducir el impacto ambiental del sector

¹ Todas las personas relacionadas en el informe y que participen en el proyecto deben haber suscrito el acta de propiedad intelectual de acuerdo con los formatos establecidos.

de la construcción. Este proyecto consistió en aplicar la tecnología de activación alcalina de RCD, para preparar pastas, morteros y concretos utilizando diferentes activadores alcalinos como silicato de sodio, sulfato de sodio e hidróxido de sodio. Se produjeron diferentes tipos de pastas geopoliméricas utilizando una mezcla de 80%RCD-20% cemento Portland y variando el contenido de silicato-Na, sulfato y NaOH. Los materiales desarrollados se caracterizaron microestructural, física y mecánicamente. Los resultados de la microscopía electrónica de barrido (SEM) y de la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) mostraron que los productos de reacción eran geles N-A-S-H y (N, C) -A-S-H. Además, en las pastas activadas con sulfato de sodio, la etringita se identificó, mediante SEM y difracción de rayos X (XRD), como un producto de hidratación adicional. Los aglutinantes activados con sulfato de sodio (Na_2O al 0,8%) (activador de estado sólido) reportaron resistencias a la compresión de hasta 18 MPa en pastas y 7 MPa en morteros a los 28 días. Para las mezclas de RCD activadas alcalinamente con silicato- Na^+ NaOH, las resistencias a compresión alcanzaron hasta 40 MPa, por lo cual fueron aptas para la elaboración de concretos. Estos resultados brindan una oportunidad para la reutilización potencial de RCD en nuevos materiales de construcción ecológicos.

Abstract

Currently, construction and demolition waste (CDW) is the most generated waste worldwide. In Colombia, ~ 22 million tons of CDW are generated per year, of which 1.0 million tons are generated in Santiago de Cali; therefore, the mitigation and reuse of CDW are important for reducing the environmental impact of the construction sector. This projects presents a study on the application of CDW alkaline activation technology for the manufacture of pastes and mortars using alkaline activators with lower environmental impact, such as sodium sulfate and sodium hydroxide. Geopolymeric pastes were produced using a mixture of 80%CDW-20%OPC and activator solutions with concentrations of Na_2O between 0.44% and 1.31%. The pastes were manufactured with fine aggregate obtained from the same CDW. The materials developed were characterized microstructurally, physically and mechanically. The scanning electron microscopy (SEM) and Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy results showed that the reaction products were N-A-S-H and (N,C)-A-S-H gels. Additionally, in the sodium-sulfate-activated pastes, ettringite was identified as an additional hydration product through SEM and X-ray diffraction (XRD). Binders activated with sodium sulfate 0.8% Na_2O (solid-state activator) yielded compressive strengths up to 18 MPa for pastes, and 7 MPa in mortar at 28 days. These results provide an opportunity for the potential reuse of CDW in new eco-friendly construction materials.

3. Síntesis del proyecto:

Tema

El tema está enmarcado dentro del campo de economía circular y particularmente en la valorización de residuos de construcción y demolición (RCD). El proyecto consistió en evaluar diferentes tipos de estos materiales específicamente de origen pétreo como los residuos de ladrillos, mortero, concretos, cerámica, y vidrio. Estos materiales fueron acondicionados mecánicamente y llevados hasta tamaño impalpables para la elaboración de cementantes utilizando la tecnología de activación alcalina y soluciones de silicato de sodio, NaOH y de sulfato de sodio. También se evaluó su utilización como agregado fino reciclado en las mismas mezclas, y se evaluaron las propiedades de resistencia a compresión, densidad, porosidad y absorción de las mezclas, y se complementó con un análisis microestructural. Finalmente, con las dosificaciones óptimas, fueron producidos placas decorativas y materiales de revestimiento.

Objetivos: general y específicos

Objetivo general: Evaluar la utilización de RCD pétreos generados en la ciudad de Cali como materia prima para la síntesis de materiales cementantes de activación alcalina que puedan ser usados en el sector de la construcción en aplicaciones como morteros, concretos y/o elementos de mampostería

Objetivos específicos:

- Formular y desarrollar materiales cementicios de activación alcalina por medio de la activación de RCD teniendo en cuenta las relaciones molares de la mezcla ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$).
- Evaluar las propiedades mecánicas (resistencia a compresión), físicas (densidad, porosidad), y la microestructura usando técnicas como microscopía electrónica, espectroscopia de infrarrojo, difracción de rayos X, así como las características térmicas de los cementos desarrollados.
- Evaluar las aplicaciones de los cementos desarrollados en la fabricación de morteros, concretos y/o elementos de mampostería utilizando los cementantes alcalinos basados en RCD y los agregados reciclados procedentes de los procesos de tratamiento y adecuación de los RCD.
- Caracterizar las propiedades mecánicas, físicas y de durabilidad de los productos elaborados y realizar un estudio del ciclo de vida de cada tipo de producto.

Metodología

El proyecto se realizó en las siguientes etapas:

- Etapa 1. Selección y recolección de la materia prima (RCD)
- Etapa 2. Acondicionamiento y caracterización de RCD
- Etapa 3. Diseño, formulación y síntesis de cementos vía activación alcalina.
- Etapa 4. Caracterización de los cementos de activación alcalina producidos.

- Etapa 5. Aplicaciones de los cementos de activación alcalina.

Un esquema general de la metodología desarrollada se muestra a continuación en la Fig. 1.

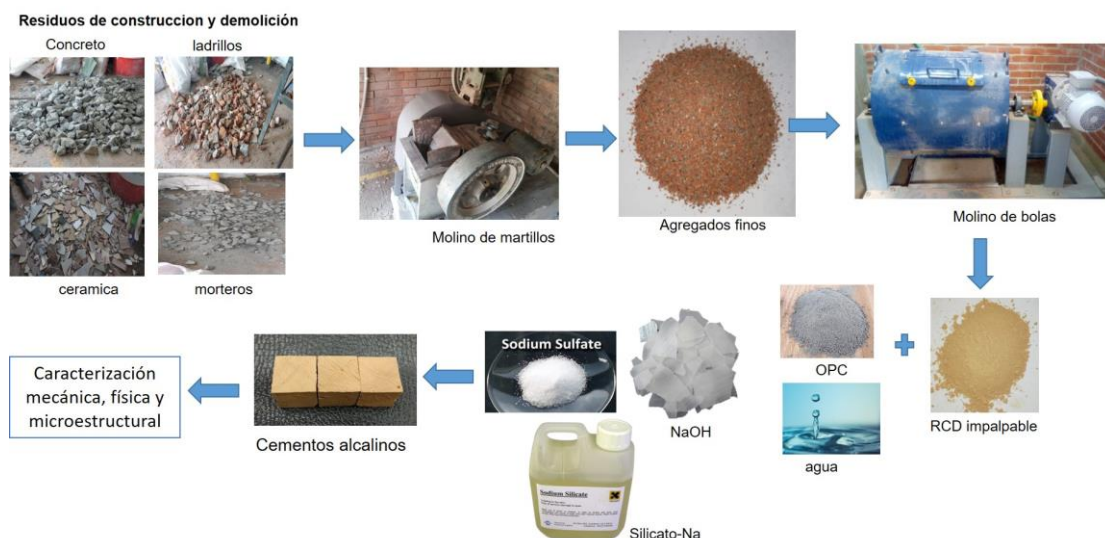


Figura 1. Procedimiento para la obtención de cementos alcalinos.

Resultados obtenidos

El acondicionamiento de los RCD consistió en someter estos materiales a un proceso de molienda para reducir el tamaño de partícula. Posteriormente, se determinó la composición química por fluorescencia de rayos X (FRX) (Tabla 1), el tamaño y distribución de partículas por medio de granulometría láser (Figura 1), y microscopía electrónica (SEM) (Figura 2). Los RCD mix se obtuvieron por mezcla en iguales proporciones de residuos de mortero-concreto-cerámica-ladrillo.

Tabla 1. Fluorescencia de rayos X de las materias primas

Componente	RCD mix (% peso)	RL (% peso)	Cerámica (% peso)	Vidrio-4h (% peso)
SiO ₂	60,84	58,89	69,07	72,27
Al ₂ O ₃	14,70	21,29	18,91	1,49
CaO	8,34	2,36	1,95	11,15
Na ₂ O	1,02	0,93	0,71	13,37
Fe ₂ O ₃	5,46	8,87	4,21	0,62
K ₂ O	1,52	1,76	2,33	0,51
MgO	1,78	3,12	0,79	0,26
CuO	0,01	0,01	0,01	-

ZnO	0,04	0,02	0,15	-
TiO ₂	0,61	0,98	0,65	-
P ₂ O ₅	0,15	0,18	-	-
SO ₃	0,68	0,12	-	-
Cl	0,02	0,01	-	-
Pérdida al fuego (1000 °C)	4,63	1,12	0,55	-
Densidad (g/cm ³)	2,71	-	2,6	2,38
Tamaño medio, μm	25,32	75,26	45,35	100,67

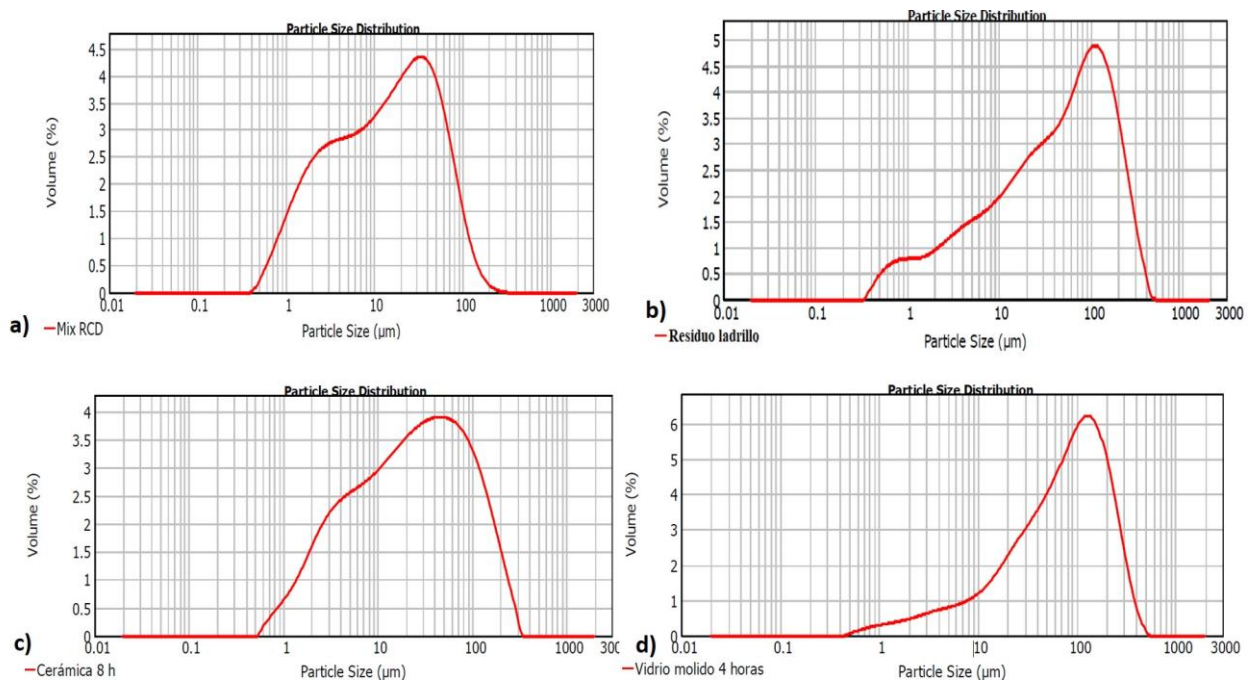


Figura 1. Granulometría láser de las materias primas. (a) RCD mix, (b) RL, (c) Cerámica y (d) vidrio.

La Figura 2 muestra las morfologías de las materias primas, es posible observar que las partículas no son de tamaño uniforme, existe una gran cantidad de material fino (Fig. 2a,b,c), y además debido a los procesos de acondicionamiento y molienda mecánica las partículas son irregulares. En el caso del vidrio se distingue su superficie lisa (Fig. 2d).

Una vez caracterizadas las materias primas se procedió a dosificar los materiales con el objetivo de producir diferentes tipos de cementantes. Para producir los cementos alcalinos, fue dosificado OPC en una cantidad no mayor al 20% en peso. Se evaluaron diferentes sistemas así:

- ✓ Cementos basados en cerámica blanca, a partir de su activación alcalina con silicato de sodio (SS)+ NaOH
- ✓ Cementos basados en RCD mix, a partir de su activación alcalina con soluciones de sulfato de

sodio y de NaOH

- ✓ Cementos basados en residuo de ladrillo (RL), a partir de su activación alcalina con soluciones de SS+NaOH.
- ✓ Cementos basados en residuos de vidrio y metacaolín, a partir de su activación alcalina con soluciones de SS + NaOH.

Para cada uno de estos sistemas, fue planteado un diseño experimental de Metodología de Superficie de Respuesta con ayuda del programa estadístico Minitab 18, con el propósito de evaluar diferentes variables que influyen en la calidad de cemento alcalino. Estas variables son relación molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ y relación alcalina $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$. En cada sistema fue optimizada la variable de respuesta de resistencia a compresión, y las mezclas óptimas fueron caracterizadas complementariamente por medio de DRX, SEM, densidad, porosidad y absorción, FTIR, entre otros.

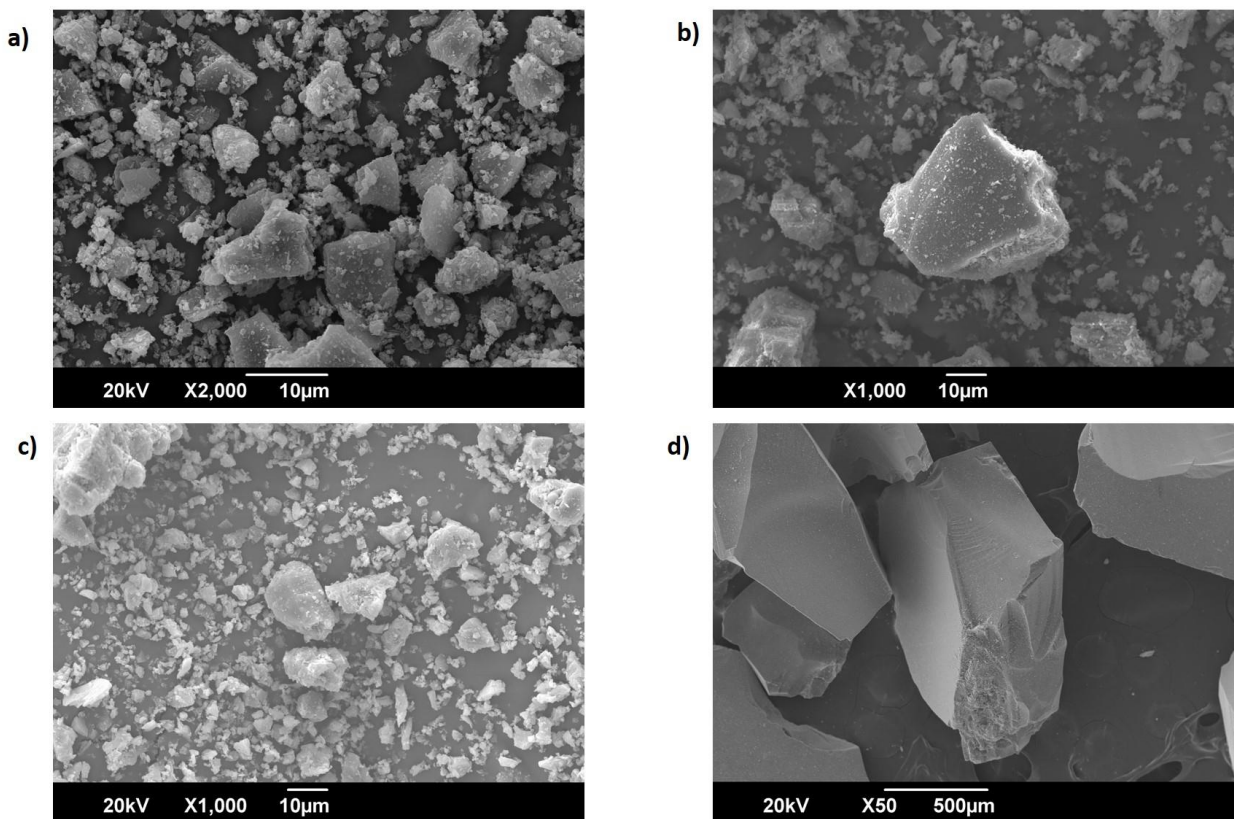


Figura 2. SEM de las materias primas. (a) RCD mix, (b) RL, (c) Cerámica y (d) vidrio usado como agregado fino.

A continuación se muestran las relaciones evaluadas para cada sistema cementante. En el caso del cementante obtenido con cerámica blanca, la relación líquida/sólido (L/S) fue de 0,26 para todas las mezclas. Las pastas fueron preparadas mezclando el 15%OPC-85%Cerámica,

seguido se prepara la solución alcalina ($SS + H_2O + NaOH$). A continuación, la solución alcalina se mezcló junto con los sólidos por 5 min hasta lograr obtener una pasta homogénea. La pasta fue vaciada en moldes cúbicos de 2 cm por cada lado, se vibró durante 1 min para eliminar las burbujas de aire atrapadas, y posteriormente se envuelve con una película plástica, para luego curar las probetas a temperatura ambiente ($HR > 90\%$); hasta completar la edad requerida para su caracterización física, mecánica y microestructural.

Tabla 2. Relaciones para la síntesis de pastas de cerámica blanca con soluciones de $SS+NaOH$

No. Mezcla	Nomenclatura	Relación Na_2O/SiO_2	Relación SiO_2/Al_2O_3
1	$Si_7Na_{0,12}$	0,12	7
2	$Si_{7,5}Na_{0,08}$	0,08	7,5
3	$Si_7Na_{0,12}$	0,12	7
4	$Si_7Na_{0,12}$	0,12	7
5	$Si_{6,5}Na_{0,08}$	0,08	6,5
6	$Si_{7,5}Na_{0,15}$	0,15	7,5
7	$Si_7Na_{0,12}$	0,12	7
8	$Si_{6,3}Na_{0,12}$	0,12	6,3
9	$Si_7Na_{0,07}$	0,07	7
10	$Si_7Na_{0,12}$	0,12	7
11	$Si_{7,7}Na_{0,12}$	0,12	7,7
12	$Si_7Na_{0,16}$	0,16	7
13	$Si_{6,5}Na_{0,15}$	0,15	6,5

Para el caso del sistema de RCD mix activado con sulfato-Na y con NaOH, las mezclas evaluadas son las mostradas en la Tabla 3. Y la dosificación para las pastas activadas con RL y con vidrio-metacaolín (MK) se muestran en la Tabla 4. Para las mezclas con RL se utilizó 90%RL-10%OPC. Todas las pastas se curaron a temperatura ambiente.

Tabla 3. Diseño de mezclas de pastas de RCD activadas alcalinamente con relación constante $L/S=0,33$. Las identificadas con S son basadas en sulfato-Na, y las identificadas como H son basadas en NaOH. O indica la cantidad de OPC evaluada.

MEZCLA	OPC (%)	RCD (%)	Na_2SO_4 (%)	MEZCLA	OPC (%)	RCD (%)	NaOH (M)
S2O20	20	80	2	H6O7,9	7,9	92,1	6
S5O7,9	7,9	92,1	5	H10O20	20	80	10
S5O15*	15	85	5	H6O15*	15	85	6
S5O15*	15	85	5	H11,6O15	15	85	11,6
S5O15*	15	85	5	H2O20	20	80	2
S9,2O15	15	85	9,2	H6O15*	15	85	6

S2O10	10	90	2	H6O15*	15	85	6
S5O22	22	78	5	H0,34O15	15	85	0,34
S8O10	10	90	8	H6O15*	15	85	6
S0,7O15	15	85	0,7	H6O22	22	78	6
S5O15*	15	85	5	H10O10	10	90	10
S8O20	20	80	8	H6O15*	15	85	6
S5O20	20	80	5	H2O10	10	90	2

*Muestra replica

Tabla 4. Dosificación pastas alternativas con 90%RL-10%OPC y 50%MK-50%vidrio.

Precursor	Muestra ID	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	Na ₂ O/SiO ₂	L/S
MK-vidrio	MK-Si5,3	5,3	0,2	0,35
	MK-Si5,6	5,6	0,2	
	MK-Si5,9	5,9	0,2	
RL-OPC	RL-Si5,4Na0.12	5,4	0,12	0,30
	RL-Si5,6 Na0.16	5,6	0,16	
	RL-Si5,9 Na0.18	5,9	0,18	

Los resultados de la resistencia a compresión de cementos alcalinos obtenidos a partir de la activación de cerámica con SS-NaOH son mostrados en la Fig.3 a edades de 7, 28 y 90 días. Las mezclas M9 y M11 alcanzaron hasta 40 MPa para 28 días de curado. En este estudio se observó que un aumento en la relación Si/Al ligado a una baja relación Na/Si aumenta la resistencia a la compresión de las pastas, especialmente cuando la relación Si/Al es superior a 7. Como el contenido de Al en las pastas proviene de la materia prima cerámica y OPC, la relación Si/Al se modifica con el activador alcalino, por lo que el aumento en la relación Si/Al también corresponde a un aumento en la cantidad de SS en la mezcla

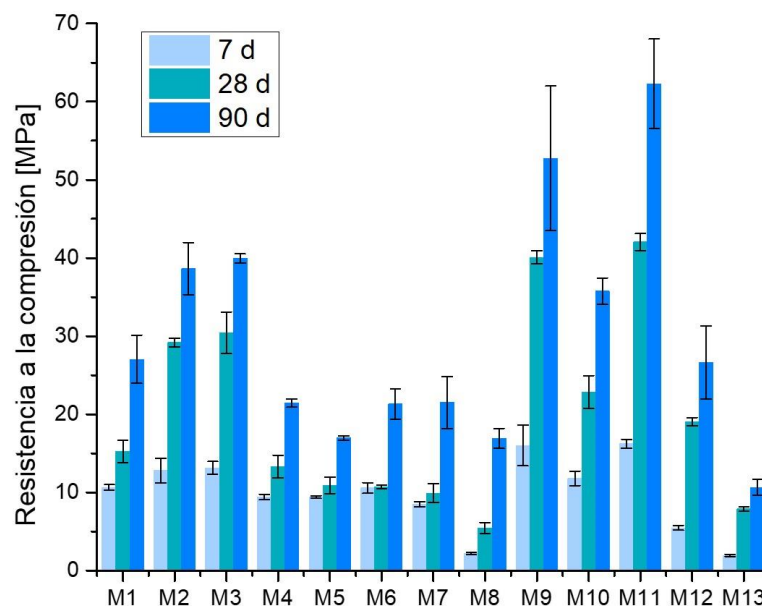


Figura 3. Resistencia a compresión a edad de 7, 28 y 90 días de curado para los cementos alcalinos basados en cerámica-SS-NaOH.

En la Fig. 4 se muestran los resultados de resistencia obtenidos para los cementos alcalinos basados en RL-OPC y vidrio-MK. En estos cementos alcalinos, para los 28 días de curado pudo encontrarse en la mezcla Si5,6Na0,16 que estos alcanzaron hasta 25 MPa y en los cementos con vidrio-MK se puede llegar hasta 16 MPa a compresión.

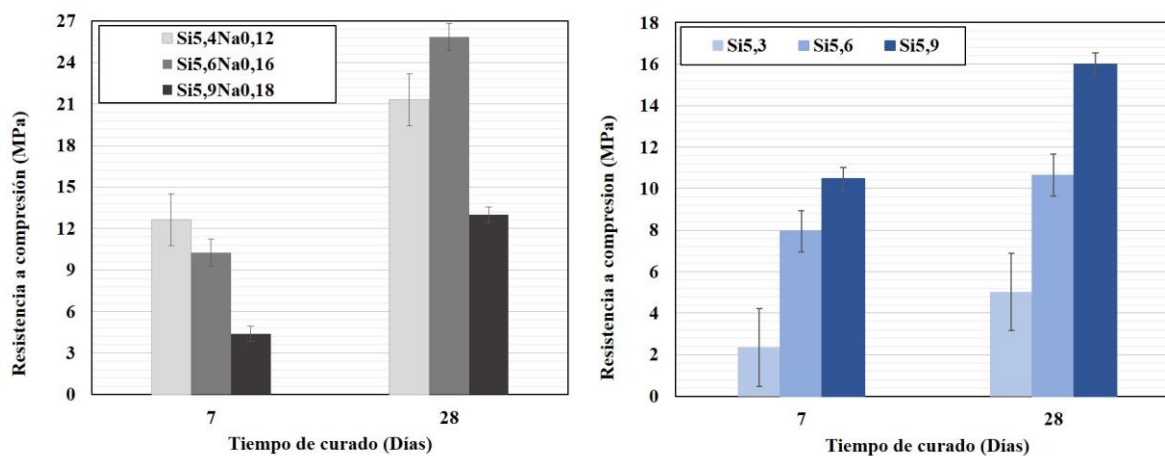


Figura 4. Resistencia a compresión a edad de 7 y 28 días de curado para los cementos alcalinos basados en (a) RL-OPC y (b) vidrio-MK.

En la Figura 5 se muestra el grafico de contorno donde se correlaciona las resistencias de los cementos alcalinos obtenidos por la activación de RCD mix con precursores sólidos como

sulfato-Na y NaOH. Para los materiales activados con NaOH (Fig. 5a), se encuentra que las mayores resistencias están en rangos para molaridades menores a 6M y en contenidos de OPC superiores al 15%. Para las activadas con sulfato-Na (Fig. 5b), existe una mayor influencia del contenido de OPC (20%). Para las muestras de este estudio activadas con NaOH las resistencias estuvieron entre 5,20-12,84 MPa, nótese que la influencia de concentraciones de NaOH mayores a 6M sobre los contenidos de OPC resulta en un deterioro de la resistencia a la compresión, ya que posiblemente las bajas cantidades de material soluble en precursor generan exceso de activador sin reaccionar que promueve eflorescencias superficiales (Fig. 6) y pérdidas en la resistencia. Las muestras activadas con Na_2SO_4 presentaron resistencias que oscilaron entre 4,13-14,39 MPa. Las resistencias más altas a 7 días de curado fueron alcanzadas en las pastas H0,3O15 y S5O22 para las activadas con NaOH y Na_2SO_4 respectivamente. Para edad de 28 días, el comportamiento encontrado fue similar, y las resistencias estuvieron entre 4,78-19,29 MPa en las pastas activadas con sulfato-Na; y entre 5,20-12,84 para pastas activadas con NaOH.

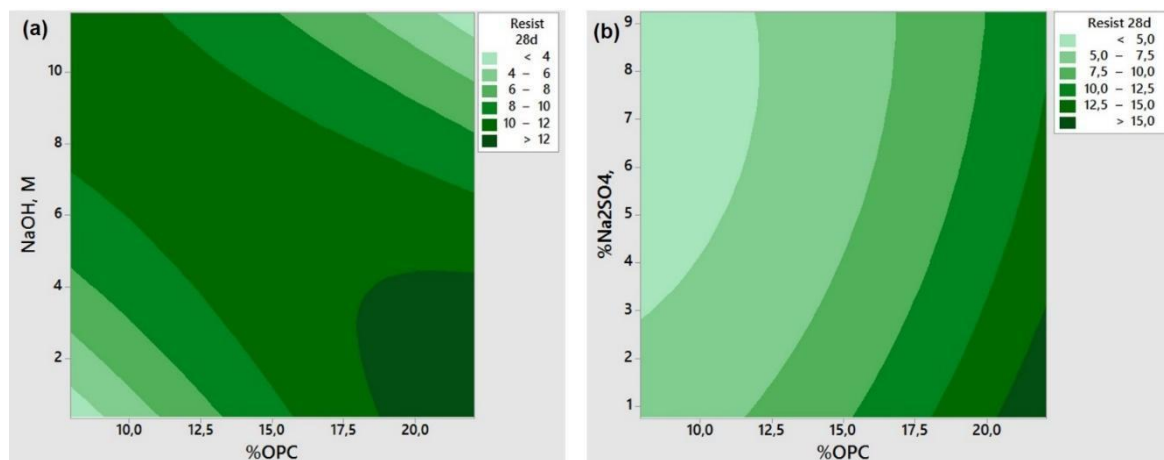


Figura 5. Gráficos de contorno a edad de 7 días de curado, donde se muestra la influencia de las concentraciones de OPC y contenidos de (a) NaOH y (b) sulfato-Na en la resistencia a la compresión.

De acuerdo a cada sistema producido se seleccionaron las mezclas optimas (Tabla 5) a las cuales se les analizó la microestructura y posteriormente se produjeron morteros. La microestructura de los cementos alcalinos reveló que una gran cantidad del precursor permanece sin reaccionar, además existe presencia de microgrietas y poros en los materiales. Aún así, para el caso de la mezcla con residuo de cerámica M11-Si7.7Na0.12 (Fig. 6a) la superficie se encuentra muy homogénea con presencia de geles. La activación del ladrillo RL-Si5.6Na0.16 (Fig. 6b) muestra una superficie con formación de geles, y partículas de RL aún sin reaccionar, similar a lo que ocurre para el cemento MK-Si5.9-Na0.2 (Fig. 6c) donde se distinguen partículas de vidrio y MK sin reaccionar, y se aprecia un ataque superficial de las partículas. Las muestras de RCDmix activadas con exclusivamente NaOH o sulfato-Na (Fig. 6d-e), mostraron una superficie muy heterogénea con un gran contenido de porosidad.

Tabla 5. Nomenclatura y contenido de mezclas óptimas.

Sistema	Contenido	Mezcla óptima ID
Sistema 1	85%Ceramica-15%OPC-SS-NaOH	M11-Si7.7Na0.12
Sistema 2	90%RL-10%OPC-SS-NaOH	RL-Si5.6Na0.16
Sistema 3	50%Vidrio-50%MK-SS-NaOH	MK-Si5.9-Na0.2
Sistema 4-OH	80%RCDmix-20%OPC- NaOH	Mix-H0.86O20
Sistema 4-Sulf	80%RCDmix-20%OPC- sulfatoNa	Mix-S2O20

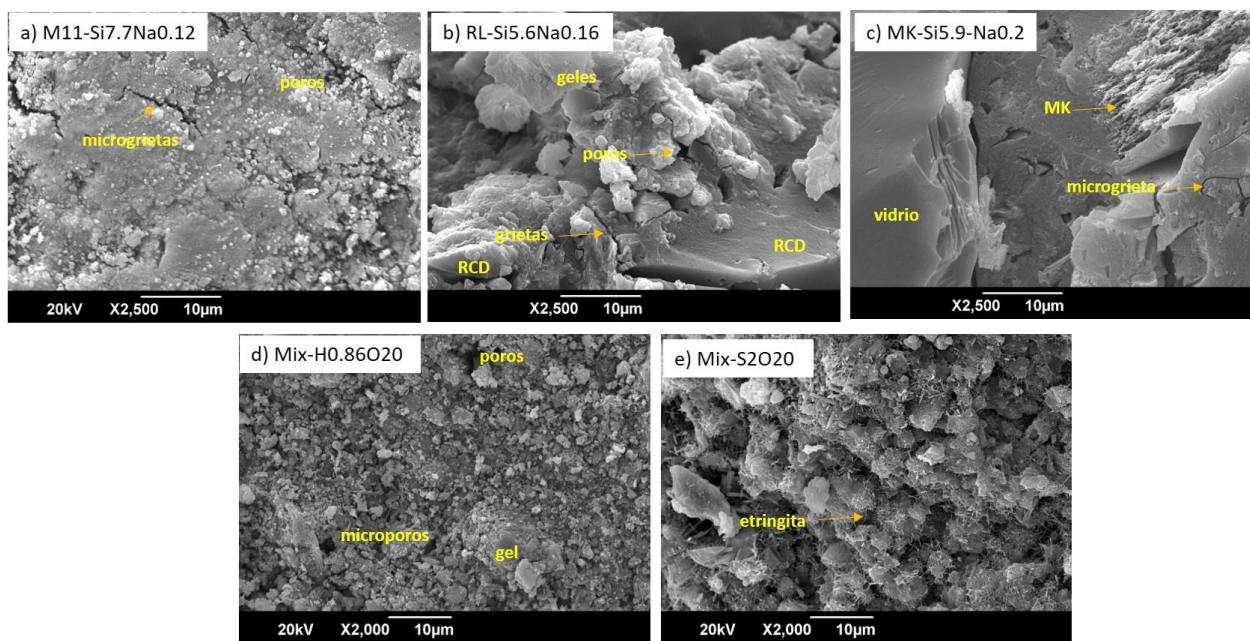


Figura 6. Imágenes de SEM de conglomerantes con dosificaciones óptimas.

Para completar la caracterización de algunas de las pastas, estas fueron analizadas por difracción de rayos X para conocer formación de fases. La Fig. 7 muestra los resultados. Las pastas generadas a partir de la activación de RCD Mix con sulfato (Fig. 7a) y NaOH (Fig. 7b) mostraron la formación de geles geopoliméricos tipo (N,C)-ASH y de CSH debida a la hidratación del OPC; adicionalmente, en la muestra activada con sulfato la etringita se observo en el SEM (Fig. 6e) y fue corroborada en el DRX (Fig. 7a). Las fases cristalinas que se encuentran en la materia prima como cuarzo y albita se mantienen para estas condiciones de activación. En las pastas M9:Si7Na0,07 y M11:Si7,7Na0,12 producidas a partir de la activación de RCD cerámica (Fig. 7c), se identificó la formación de calcita, debido a la reacción de carbonatación de la portlandita y también a la formación de carbonatos alcalinos por reacción del CO₂ del ambiente con el Na en exceso presente en los poros.

La formación de geles CSH y (N,C)ASH en DRX es poco evidente debido a la naturaleza amorfa de los geles (Torres-Carrasco & Puertas, 2017b). La presencia de 15%OPC en la mezcla aporta iones de Ca²⁺, los cuales promueven la formación de estos geles en la microestructura (Robayo et al., 2016; Villaquirán-Cañedo & Mejía de Gutiérrez, 2021).

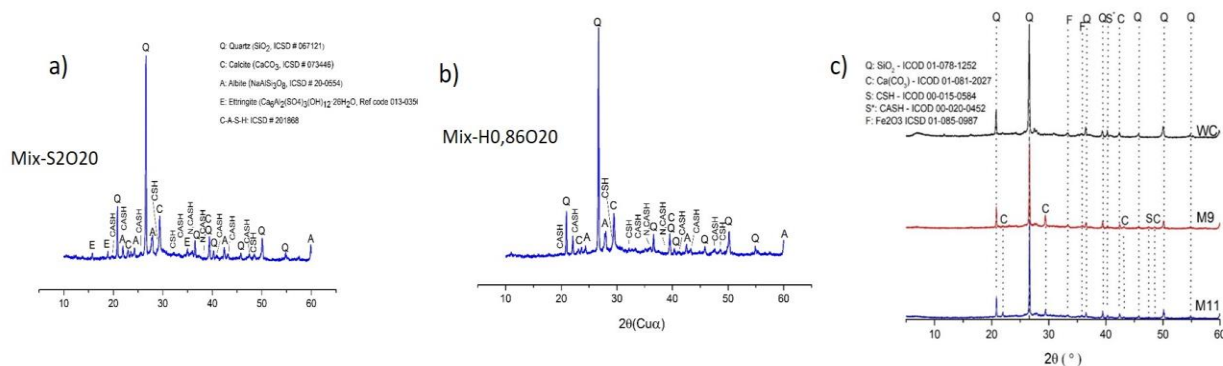


Figura 7. DRX de algunas pastas optimizadas

Con los conglomerantes seleccionados previamente se elaboraron morteros, con la relación cementante:agregado fino de 1:1. En la elaboración de morteros el agregado fino fue obtenido a partir de trituración de residuos de vidrio o RCD mix. El agregado fino estaba constituido por el material pasante de Tamiz No. 16 y retenido en Tamiz No. 100.

De los morteros producidos, sólo dos (M11-Si7.7Na0.12 y MK-Si5.9-Na0.2) cumplieron con el requerimiento mínimo de resistencia para clasificarse como morteros de pega de acuerdo a la norma NSR-10. Sin embargo, los otros morteros podrían considerarse para aplicaciones como material de revestimiento, donde los requerimientos en resistencia son menores. Como se muestra en la Tabla 6, los morteros presentaron altos valores de porosidad y absorción de agua, lo cual está relacionado a la porosidad de la pasta (Fig. 6), y la debilitada zona de interfaz entre la pasta y el agregado fino (Fig. 8), la cual es altamente permeable.

Tabla 6. Resistencia a la compresión y propiedades físicas de morteros a edad de 28 días.

Mortero	Tipo de agregado fino	Resistencia compresión, MPa	Porosidad (%)	Absorción(%)	Densidad (kg/m ³)
M11-Si7.7Na0.12	vidrio	19,5	--	--	--
RL-Si5.6Na0.16	vidrio	5,02	20,33	10,60	2240
MK-Si5.9-Na0.2	vidrio	25,01	--	--	--
Mix-H0.86O20	RCD mix	6,95	28,59	18,76	2001
Mix-S2O20	RCD mix	6,01	31,01	19,21	2201

Tabla 7. Clasificación de los morteros de pega por propiedad o proporción de acuerdo a la norma NSR-10

Mortero tipo	Especificación de los morteros por propiedad		
	Resistencia mínima a la compresión f'_{cp} (MPa)	Fluidez (%)	Retención mínima de agua (%)
H	22,5	115-125	75
M	17,5	115-125	75
S	12,5	110-120	75
N	7,5	105-115	75

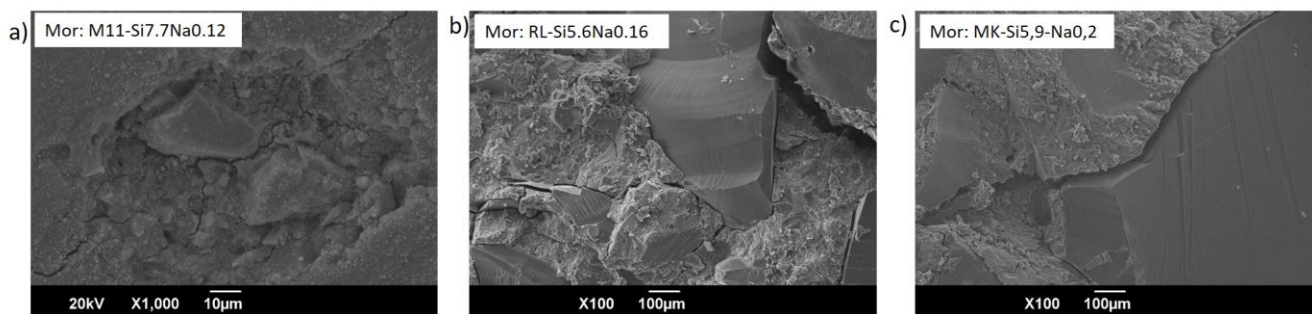


Figura 8. Imágenes de SEM de morteros.

A continuación se muestran algunas aplicaciones de los morteros elaborados que verifican la opción de uso como elementos de enchape y revestimiento:



Otros resultados de este estudio pueden ser consultados en los artículos publicados, los cuales se incluyen en el listado de los productos obtenidos.

Productos obtenidos

- ✓ Vinculación de la estudiante de Maestría en Ingeniería Énfasis Ingeniería de Materiales

Ashley Bonilla cód:1905996. La estudiante estuvo vinculada durante todo el proyecto, el trabajo de investigación ya fue entregado al programa para evaluación y se titula: Materiales compuestos fotoactivos sintetizados por activación alcalina de residuos de construcción y demolición. Directora: Mónica Villaquirán, Codirectora: Ruby M de Gutiérrez (Anexo 1).

- ✓ Vinculación de dos estudiantes del pregrado en Ingeniería de Materiales: Kevin Agudelo (1327080), Leonardo Ramírez (1325231), quienes desarrollaron su Trabajo de Grado. Título: Estudio preliminar de morteros elaborados con de residuos de construcción y demolición por medio de la tecnología de activación alcalina. Director: Mónica Villaquirán, Codirector: Ruby M de Gutiérrez. El trabajo de grado fue sustentado el 24 septiembre de 2020 (anexo 2).
- ✓ Vinculación de dos estudiantes del pregrado en Ingeniería de Civil: Andry Fernanda Hoyos (1622380), Laura Maritza Henao (1626240), quienes desarrollaron su Trabajo de Grado. Título: Mortero híbrido basado en ladrillo y vidrio reciclado para su posible uso como elemento decorativo de enchape. Directora: Ruby M de Gutiérrez y Codirectora: Mónica Villaquirán, El trabajo de grado fue remitido al programa académico de Ingeniería Civil y fue aprobado para sustentación pública (Anexo 3).
- ✓ Artículo publicado en revista A1. Construction and Building Materials. *Comparison of different activators for alkaline activation of construction and demolition wastes*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061821003597> (Anexo 4).
- ✓ Artículo publicado en revista A2. Sustainability. *Construction and Demolition Waste (CDW) Recycling—As Both Binder and Aggregates—In Alkali-Activated Materials: A Novel Re-Use Concept*. <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/14/5775> (Anexo 5).
- ✓ Artículo *In Press* en revista A2. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. *New glass-ceramic from ternary-quaternary mixtures based con Colombian wastes: Glass cullet, blast furnace slag, supper slag and fly ash*. <https://www.elsevier.es/en-revista-boletin-sociedad-espanola-ceramica-vidrio-26-avance-resumen-new-glass-ceramic-from-ternaryquaternary-mixtures-S0366317520301199> (Anexo 6).
- ✓ Presentación de resultados de investigación en evento de la Gobernación del Valle del Cauca, 2da Semana internacional de la Ciencia, Tecnología e Innovación. Marzo 15 al 26 de 2021. Título de la ponencia: Síntesis de cementos ecológicos a partir de residuos de construcción y demolición (RCD) vía activación alcalina (Anexo 7).
- ✓ Presentación de resultados de investigación en evento “Materiales de Construcción sustentables: Una contribución a la económica circular” Universidad del Valle, 29-30 de abril de 2021. Título de ponencia: Fachadas autolimpiantes para construcciones sostenibles (Anexo 8).
- ✓ Artículo publicado en revista A1. Construction and Building Materials. *Ecological light transmitting concrete made from glass waste and acrylic sheets*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061821023990#!> (Anexo 9)

Principales conclusiones y/o recomendaciones

En general, se comprobó que los RCD pueden ser activados alcalinamente con diferentes tipos de soluciones alcalinas, bien sea silicato de sodio, NaOH o sulfato de sodio. Además, se concluye que la cantidad y concentración de los activadores influencia la calidad de los geles formados, y estos dependerán del contenido adicional de OPC que se incorpora a los cementos para producirlos a temperatura ambiente (25 °C). Técnicamente, es posible realizar un aprovechamiento integral de RCD tantos como cementantes, así como agregados reciclados, y las propiedades de estos dependerán del tipo de RCD utilizado. Para condiciones óptimas de síntesis, los materiales pueden alcanzar resistencias a compresión de hasta 25 MPa. Para algunos productos, diseñados en condiciones óptimas las propiedades alcanzadas pueden llegar a ser comparables a materiales comerciales, particularmente en lo relacionado a sus propiedades mecánicas. Con los materiales desarrollados se abre la oportunidad de aprovechamiento de RCD como ladrillos en placas o fachaletas decorativas para uso exterior. Los resultados obtenidos abren la posibilidad de implementar y evaluar nuevos campos para la utilización de RCD en la fabricación de materiales compuestos con diferentes aplicaciones, que incorporen propiedades térmicas propiedades catalíticas, materiales livianos, entre otras.

4. Impactos actual o potencial:

El desarrollo del proyecto permitió el logro de los siguientes impactos:

- ✓ A nivel Académico: la formación de estudiantes de pregrado y de posgrado que se vincularon al proyecto, realización de dos tesis de pregrado y ejecución de un trabajo de investigación de maestría.
- ✓ A nivel Investigativo:
 - Participación en eventos nacionales donde se pudo divulgar los resultados de la investigación.
 - Divulgación de los resultados a nivel de artículos en revistas indexadas.
 - Relación con otros investigadores, lo cual contribuye al fortalecimiento del grupo y el personal participante en el proyecto.
- ✓ Otros: desarrollo de diferentes aplicaciones integrales de los RCD, que permiten su valorización en cementos, morteros o concretos. Contribuir al medioambiente al reducir el consumo de recursos naturales y reemplazar en el proceso las materias primas tradicionales por RCD obteniendo productos finales que pueden competir con materiales comerciales.

Desarrollos futuros: el tema de investigación continuará siendo objeto de estudio en el grupo, y se ampliará las pruebas complementarias para la caracterización de los elementos, en particular evaluar las propiedades de durabilidad.

**5. Productos:**Tabla No. 1. Cantidad y tipo de productos pactados en el *Acta de Trabajo y Compromiso* y productos finalmente presentados

TIPO DE PRODUCTOS	No. de PRODUCTOS PACTADOS				No. de PRODUCTOS PRESENTADOS			
Productos de nuevo conocimiento								
Artículo en revista ISI-SCOPUS: Aceptado para publicación Aceptado para evaluación	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
			2					
Artículo completo publicado en revistas indexadas	A1	A2	B	C	A1	A2	B	C
					2	2		
Formación de recursos humanos	No. de estudiantes vinculados		No. de tesis		No. De estudiantes Vinculados			No. De tesis
Estudiantes de pregrado - Formación	0		0		4			2 (1 pendiente de sustentación)



VICERRECTORIA DE INVESTIGACIONES

**ELABORACIÓN DE INFORMES
FINALES - PROYECTOS DE
INVESTIGACIÓN**

TIPO DE PRODUCTOS	No. de PRODUCTOS PACTADOS		No. de PRODUCTOS PRESENTADOS	
Estudiantes de maestría o doctorado – Vinculación	1	0	1	1 (Pendiente de sustentación)
Productos de divulgación				
Ponencias presentadas en eventos (congresos, seminarios, coloquios, foros)	No. de ponencias nacionales	No. de ponencias internacionales	No. de ponencias nacionales	No. de ponencias internacionales
	2	0	2 (Gobernación) y Encuentro Internacional (GMC)	

Se adjuntan las respectivas constancias.

Tabla No. 2. Detalle de productos

Tipo de producto:	Artículo
Nombre General:	Revista Construction and Building Materiales. (Año 2020). (Categoría A1)
Nombre Particular:	<i>Comparison of different activators for alkaline activation of construction and demolition wastes</i>
Ciudad y fechas:	2020
Participantes:	Mónica A Villaquirán-Cacedo, Ruby Mejía de Gutiérrez
Sitio de información:	Base de datos Science Direct (Elsevier); Archivo del proyecto y del grupo https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061821003597
Formas organizativas:	Grupo de Investigación Materiales Compuestos

Tipo de producto:	Artículo
Nombre General:	Revista Sustainability. (Año 2020). (Categoría A2)
Nombre Particular:	<i>Construction and Demolition Waste (CDW) Recycling—As Both Binder and Aggregates—In Alkali-Activated Materials: A Novel Re-Use Concept.</i>
Ciudad y fechas:	2020
Participantes:	Rafael Robayo, William Valencia, Ruby Mejía de Gutiérrez.
Sitio de información:	Base de datos MDPI https://www.mdpi.com/2071-1050/12/14/5775
Formas organizativas:	Grupo de Investigación Materiales Compuestos

Tipo de producto:	Artículo
Nombre General:	Boletín Sociedad Española de Cerámica y vidrio (año 2021). (Categoría A2)
Nombre Particular:	New glass-ceramic from ternary-quaternary mixtures based con Colombian wastes: Glass cullet, blast furnace slag, supper slag and fly ash.

Ciudad y fechas:	2021
Participantes:	Estefanía Montoya, Mónica Villaquirán, Ruby Mejía de Gutiérrez.
Sitio de información:	Base de datos Elsevier https://www.elsevier.es/en-revista-boletin-sociedad-espanola-ceramica-vidrio-26-avance-resumen-new-glass-ceramic-from-ternaryquaternary-mixtures-S0366317520301199
Formas organizativas:	Grupo de Investigación Materiales Compuestos

Tipo de producto:	Artículo
Nombre General:	Constructions and Building Materials (año 2021). (Categoría A1)
Nombre Particular:	Ecological light transmitting concrete made from glass waste and acrylic sheets
Ciudad y fechas:	2021
Participantes:	Jonatan Arias-Erazo, Mónica Villaquirán, Clara E. Goyes.
Sitio de información:	Base de datos Elsevier https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061821023990#!
Formas organizativas:	Grupo de Investigación Materiales Compuestos

Tipo de producto:	Trabajo de Grado (Sustentado y Aprobado)
Nombre General:	Trabajos de Grado - Ingeniería de Materiales - Universidad del Valle
Nombre Particular:	Estudio preliminar de morteros elaborados con de residuos de construcción y demolición por medio de la tecnología de activación alcalina.
Ciudad y fechas:	24 septiembre 2020, Cali
Participantes:	Kevin Agudelo (1327080), Leonardo Ramírez (1325231), – Directores: Mónica Villaquirán, Ruby Mejía de Gutiérrez
Sitio de información:	Biblioteca Central, Programa Académico
Formas organizativas:	Grupo de Investigación Materiales Compuestos

Tipo de producto:	Trabajo de Grado (Aprobado para sustentación pública)
Nombre General:	Trabajos de Grado - Ingeniería Civil - Universidad del Valle
Nombre Particular:	Mortero híbrido basado en ladrillo y vidrio reciclado para su posible uso como elemento decorativo de enchape
Ciudad y fechas:	Cali, TG entregado al programa académico en agosto 2021, está aprobado para sustentación pública.
Participantes:	Andry Fernanda Hoyos (1622380), Laura Maritza Henao (1626240), – Directoras: Ruby Mejía de Gutiérrez y Mónica Villaquiran
Sitio de información:	Biblioteca Central, Programa Académico
Formas organizativas:	Grupo de Investigación Materiales Compuestos

Tipo de producto:	Trabajo de investigación de Maestría (Entregado al programa académico)
Nombre General:	Trabajo de Investigación – Maestría en Ingeniería – Universidad del Valle
Nombre Particular:	Materiales compuestos fotoactivos sintetizados por activación alcalina de residuos de construcción y demolición
Ciudad y fechas:	Cali, TG entregado al programa académico y en proceso de evaluación
Participantes:	Ashley Bonilla Molina (Código 201905996) – Directores: Mónica Villaquiran, Ruby Mejía de Gutiérrez
Sitio de información:	Biblioteca Central, Programa Académico
Formas organizativas:	Grupo de Investigación Materiales Compuestos

Tipo de producto:	Ponencia
Nombre General:	2da Semana internacional de la Ciencia, Tecnología e Innovación
Nombre Particular:	Síntesis de cementos ecológicos a partir de residuos de construcción y demolición (RCD) vía activación alcalina
Ciudad y fechas:	Cali, Marzo 15 al 26 de 2021.
Participantes:	Ashley Bonilla, Mónica Villaquirán, Ruby Mejía



Sitio de información:	Evento online
Formas organizativas:	Grupo de Investigación Materiales Compuestos

Tipo de producto:	Ponencia
Nombre General:	Materiales de Construcción sustentables: Una contribución a la economía circular
Nombre Particular:	Fachadas autolimpiantes para construcciones sostenibles
Ciudad y fechas:	29-30 de abril de 2021.
Participantes:	Ashley Bonilla, Mónica Villaquirán, Ruby Mejía
Sitio de información:	Evento online, Archivos Proyecto
Formas organizativas:	Grupo de Investigación Materiales Compuestos

Mónica A. Villaquirán

Firma del investigador principal

VoBo. Vicedecano de Investigaciones

Por favor presente su informe impreso y en formato digital en hoja tamaño carta, letra arial 11, con espacios de 1 1/2