



DYNA

ISSN: 0012-7353

Universidad Nacional de Colombia

Chica-Osorio, Lina María; Beltrán-Montoya, Juan Manuel
Caracterización de residuos de demolición y construcción para la identificación de su potencial de reúso
DYNA, vol. 85, núm. 206, 2018, Julio-Septiembre, pp. 338-347
Universidad Nacional de Colombia

DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n206.68824>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49659032040>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en [redalyc.org](https://www.redalyc.org)



Demolition and construction waste characterization for potential reuse identification

Lina María Chica-Osorio ^a & Juan Manuel Beltrán-Montoya ^b

^a Grupo GICI. Facultad de Ingenierías, Universidad de Medellín, Medellín, Colombia. lmchica@udem.edu.co

^b Facultad de Ingenierías, Universidad de Medellín, Medellín, Colombia. jmbeltranmontoya@outlook.com

Received: November 13th, 2017. Received in revised form: March 27th, 2018. Accepted: May 16th, 2018.

Abstract

Construction and demolition waste (CDW) have become a constant problem due to its volume of production and the lack of space for its final disposal. Several management strategies have been proposed to solve this problem as the reduction in the source of generation or the reuse as raw material. Nonetheless, for many cases this process is not consistent because CDW nature and its properties are not considered as an important variable in the identification of its possible reutilization. For this paper, an example of the potential reuse identification with regards to construction and demolition waste of Medellin city is presented. For this purpose, the physical, mineralogical and energetic properties were determined, as well as the specific amount of production. The results showed that the greatest potential reuse for CDW is associated to excavation waste and block masonry. Furthermore, based on the latter, a reuse model consisting in a soil-cement plate with 95% CDW was established.

Keywords: physical and chemical characterization, CDW reutilization.

Caracterización de residuos de demolición y construcción para la identificación de su potencial de reúso

Resumen

Los residuos de demolición y construcción (RCD), se han convertido en una problemática constante en el sector, debido a su volumen de producción y la falta de espacio para su disposición final. Para solucionar esta problemática se han propuesto diversas estrategias de gestión que consideran desde la disminución en la fuente hasta la reutilización como materia prima en la fabricación de diversos elementos. En este último aspecto, a nivel mundial, se han llevado a cabo esfuerzos por determinar el posible reúso de dichos residuos. Sin embargo, en muchos casos ese proceso parece ser inconsistente pues no se considera la naturaleza y propiedades del residuo como un condicional en la identificación de su posible reutilización. En este artículo, se presenta un ejemplo de aplicación de la identificación del potencial de reúso de residuos de demolición y construcción de la ciudad de Medellín, a partir de la determinación de las propiedades físicas, mineralógicas y energéticas, y del inventario específico de producción. Los resultados mostraron que, para el caso de estudio, los residuos con mayor potencial de uso para la reincorporación en la cadena productiva fueron los residuos de excavación y de mampostería de bloque, con los cuales, además, se probó un modelo de reutilización consistente en una placa suelo-cemento conformada por 95% de RCD.

Palabras clave: caracterización física y mineralógica, reutilización de RCD.

1. Introducción

Con el actual crecimiento demográfico, la demanda por entornos construidos seguirá en aumento. Las edificaciones, que son parte de ese entorno construido, tienen un enorme y continuo impacto sobre el medio ambiente. Indicadores de este impacto en los países industrializados es el hecho que en

la construcción de infraestructura se utilizan alrededor del 40% de los recursos naturales extraídos, se emplea cerca del 70% de la electricidad, y se producen entre el 35% y el 65% de los residuos dispuestos en los vertederos. Esto implica, que la industria de la construcción es responsable del más alto porcentaje volumétrico de residuos totales en las naciones desarrolladas. En la Unión Europea, la cantidad total de

How to cite: Chica-Osorio, L.M. and Beltrán-Montoya, J.M., Caracterización de residuos de demolición y construcción para la identificación de su potencial de reúso. DYNA, 85(206), pp. 338-347, September, 2018.

residuos generados en el año 2013 fue de 2500 millones de toneladas, un 34% de los cuales resultan de la construcción y demolición [1]. En Asia, el porcentaje de residuos de demolición y construcción (RCD) que se generan por año, respecto del volumen total es 25% en Hong Kong y 48% en Corea del Sur [2]. Se estima entonces, que la cantidad de residuos, asociados a las actividades de construcción en las naciones desarrolladas, están a razón de 450 kg por año por habitante [3].

En países en vía de desarrollo, como los Latinoamericanos, no se encuentran disponibles cifras de producción de RCD. Las principales ciudades de Colombia presentan actualmente volúmenes de producción anuales altos de RCD, Bogotá produce alrededor de 12 millones de m³, Medellín 860.000 m³, para Cali 1 millón de m³ anuales y Cartagena 190.000 m³ [4]. En el Área Metropolitana del Valle de Aburrá el sector de la construcción produce 6.000 toneladas/día de residuos [5] de las cuales solo 1800 toneladas son almacenadas adecuadamente en centros de almacenamiento temporal de escombros CATES [6] lo que significa que más de 4000 toneladas son dispuestas de manera irregular. Estas cifras, muestran una problemática creciente, respecto del manejo y la disposición final de los RCD, y de los impactos que pueden generar.

A nivel mundial, se han planteado diversas estrategias para reducir la contaminación generada por los residuos de demolición y construcción. Se incluyen las asociadas a la reducción de los residuos en la fuente, pasando por la reutilización y el reciclaje [7,8]. Sin embargo, es claro que una gestión apropiada de los residuos debe incluir procesos que generen valor agregado a estos materiales y que permita su reincorporación a la cadena productiva, dando una solución sostenible a dicha problemática. Una búsqueda de alternativas de reutilización de los residuos estaría en concordancia con la promoción de desarrollo sostenible y fomento de nuevas oportunidades de negocio relacionadas con el manejo y aprovechamiento de los residuos sólidos provenientes de la construcción.

Aunque existen una gran cantidad de investigaciones que establecen la reutilización particular de residuos de demolición y construcción, pocos autores reportan la caracterización física y mineralógica de los mismos como un aspecto determinante en su potencial de reutilización. En este sentido, es pertinente plantear la pregunta sobre cómo generar estrategias para la identificación de posibles reúso si no existe una línea base de características tanto físicas como mineralógicas que condicione una aplicación específica.

En este artículo, se presenta la caracterización completa de residuos de demolición y construcción producidos en la ciudad de Medellín, como el paso inicial en la determinación de su potencial de reúso. Además, se presentará un ejemplo de aplicación específico, obtenido a partir de un análisis de inventario y de las características físicas y mineralógicas de los RCD locales.

2. Identificación del potencial de reúso de RCD

En la actualidad, no existe una metodología precisa que permita la toma de decisiones sobre la oportunidad de reutilización de un residuo de demolición y/o construcción.

Los criterios empleados usualmente están asociados con el volumen de producción y con las oportunidades de reincorporación disponibles. A pesar de ello, la naturaleza del residuo también se asocia con su reutilización. A continuación, se refieren estos criterios como punto de partida para la identificación del potencial de reúso.

2.1. Segundo inventario

El inventario o cantidad producida de residuos, es uno de los criterios con mayor peso, para identificar la oportunidad de reutilización de residuos de demolición y construcción. Dentro de los RCD que se producen en mayor cantidad a nivel mundial, los concretos se ubican el primer lugar en porcentaje de producción, seguidos de las roturas cerámicas y la mampostería, siendo estos residuos los que han concentrado la mayor cantidad de esfuerzos de reincorporación dentro de la cadena productiva de la construcción. La Tabla 1, muestra la producción porcentual de RCD discriminada, para algunos países de Europa.

En este sentido, un indicador importante de la factibilidad de reutilización de RCD como nueva fuente materias primas para el sector es el alto porcentaje de reciclaje, tal y como se observa en la Tabla 2. En Colombia, hasta el momento, no han sido encontrados reportes para los porcentajes de reúso para ninguna ciudad, pero para Medellín se estima que en 2023 para un área construida proyectada de 1.423.299m², se producirán 2.536.603 ton de RCD [9].

Tabla 1.
Producción porcentual discriminada de RCD en Europa.

Material	España 2004	Turquía 2005	Escocia 2015	España 2016
Concreto	12	40	45.64	69.8
Asfalto	5	-	19.33	-
Cerámicas	54	30	5.30	0.219
Mampostería	-	-	-	3.4
Agregados naturales	9	-	-	21.5
Madera	4	10	-	-
Metales	2.5	5	-	0.002
Plásticos	1.5	5	-	0.015
Yeso	0.2	-	-	0.103
Vidrio	0.5	-	0.07	-
Otros	4	10	1.59	0.001
Sin consolidar	7.3	-	28.06	-

Fuente: adaptado de [10-13]

Tabla 2.
Porcentaje de RCD reciclado en países europeos. *Millones de toneladas

País	RCD*	% Reciclado	País	RCD*	% Reciclado
Holanda	23.9	98	Polonia	38.19	28
Dinamarca	5.27	94	Finlandia	5.21	26
Estonia	1.51	92	Hungría	10.12	16
Alemania	72.40	86	España	31.34	14
Irlanda	2.54	80	Portugal	11.42	5
Inglatera	99.10	75	Grecia	11.04	5
Lituania	3.45	60	Italia	46.31	0
Eslovenia	2.00	53	Rumania	21.71	0
Letonia	2.32	46	Suecia	10.23	0
Luxemburgo	0.67	46	Eslovaquia	5.38	0
Francia	85.65	45	Malta	0.8	0

Fuente: adaptado de [14].

Aunque habitualmente no son considerados dentro de las estadísticas de producción, los materiales producto de las excavaciones necesarias como etapa inicial para dar lugar a los desarrollos urbanísticos normalmente representan, en cantidad, el mayor residuo producido por la industria de la construcción. Este material en la mayoría de los casos es dispuesto en lugares autorizados o no, sin recibir ningún tipo de tratamiento o aprovechamiento [15].

2.2. *Según oportunidades reportadas de reutilización*

Respecto de la utilización de aquellos residuos que el inventario general a nivel mundial reportó con mayor oportunidad debido a su disponibilidad por su volumen de producción, a continuación, se describe los potenciales usos para cada uno de ellos.

2.2.1. Reutilización de residuos de concreto

Dentro de los residuos de construcción y demolición, los residuos de concreto sobresalen debido a que son el residuo con mayor volumen de producción [16]. Existen cuatro líneas principales de reutilización de residuos de concreto: Fabricación de concretos empleando RCD como sustituto total de áridos naturales o como de sustituto de las fracciones gruesas o finas; elaboración de prefabricados como bloques divisorios, bordillos y tuberías; uso en carreteras como base y sub-base; y aprovechamiento de los residuos de hormigón como materia prima para la producción de nuevos productos de alta calidad.

Las investigaciones referentes a la producción de concretos con áridos reciclados provenientes de hormigón se han enfocado principalmente en la determinación de las propiedades finales del concreto [17,18]. Los resultados obtenidos al emplear RCD para la fabricación de concretos son positivos, puesto que se han logrado producir concretos de hasta un 30% más de resistencia a la compresión en comparación con concretos fabricados con agregados convencionales [19]. Respecto de los prefabricados como bloques divisorios, bordillos y tubos, autores como [14] y [20] han estudiado estos productos encontrando resultados similares a los prefabricados convencionales con tasas de remplazo entre 40% y 60% e incluso se ha logrado mejorar propiedades como la resistencia al fuego y el aislamiento térmico y acústico [21] aunque la alta absorción de los productos finales debida a la porosidad de los agregados se plantea como un posible inconveniente al momento de climas extremos de hielo y deshielo.

La aplicación de los residuos de concreto dentro de las vías también ha sido motivo de estudio. En la aplicación como material de base y sub-base en carreteras se han obtenido resultados positivos al ser mezclados con cemento para lograr una estabilización adecuada [22]. También se ha evaluado la viabilidad de la utilización de los residuos de hormigón para la fabricación de mezclas asfálticas en frío sin alterar las propiedades mecánicas [23] y en algunos casos observando mejores comportamientos en condiciones de alta humedad y temperatura [24].

Por último, estudios se han enfocado en el aprovechamiento de los residuos de hormigón como materia

prima para la producción de nuevos productos que van desde agregados gruesos y finos de alta calidad [25], placas suelo-cemento [26], coberturas para rellenos municipales [27], cenizas volantes para uso como aditivos en concretos de alta resistencia [28], e incluso con ayuda de tratamientos térmicos para la fabricación de cemento [29].

2.2.2. Reutilización de residuos de mampostería

Según estudios técnicos realizados por diversos autores [30-34] el uso de agregados reciclados provenientes de residuos de mampostería como sustituto de agregados naturales en la fabricación de concretos y morteros es el tipo de reutilización más común. Sin embargo, cualquier porcentaje de remplazo representa un decaimiento general de las propiedades físicas y mecánicas de los productos finales. Estos RCD pueden emplearse en la producción de ladrillos, bloques y adoquines, pues para estos elementos se requieren mezclas menos exigentes en cuanto a manejabilidad y resistencia (7MPa tránsito peatonal y bloques de mampostería tradicional). La tasa de absorción de agua que no debe superar el 6%, es la gran limitante en la aplicación de los residuos de mampostería para el uso en prefabricados [35]. De otro lado, residuos de mampostería con actividad puzolánica pueden emplearse como estabilizantes de terrenos o como materias primas para la fabricación de agregados expandidos [36, 37].

2.2.3. Reutilización de roturas cerámicas

A pesar que el volumen de producción de residuos derivados de la cerámica cocida es significativamente más bajo en comparación a otros residuos, desde la perspectiva de reutilización tienen un gran potencial de reúso gracias a su actividad puzolánica. Los residuos asociados a las roturas cerámicas pueden ser transformados siguiendo dos líneas de proceso: la reducción de tamaño o los procesos de alta temperatura. Como energéticamente la alta temperatura reduce las oportunidades de emplear un residuo cerámico como materia prima, las aplicaciones asociadas a este proceso son tecnológicamente de mayor impacto. Residuos de cerámica cocida son reactivados térmicamente para la fabricación de ecobloques [38] y de cerámica porosa [39] de especificaciones equivalentes a los productos fabricados a partir de materias primas nuevas. Por otro lado, los residuos de menor actividad puzolánica son empleados como agregados finos en la fabricación de adoquines, morteros de mampostería, y concretos tanto asfálticos como convencionales [40-43]. Se ha encontrado que en las sustituciones de agregado natural por residuos cerámicos usualmente se reduce la densidad y la trabajabilidad de las mezclas debido al incremento en el consumo de agua.

2.2.4. Reutilización de residuos de excavación

Se ha encontrado en diferentes lugares a nivel mundial que estos residuos pueden tener un gran potencial como agregados sustitutos a los habitualmente producidos en grandes canteras [15]. También se ha evidenciado que los residuos de excavación pueden ser utilizados como materia

prima para la fabricación de ladrillos o bloques estabilizados con diversos materiales como cemento [44], cemento y paja [45], cemento y escorias de alto horno [46] entre otros, encontrando que los bloques producto de estas mezclas cumplen a cabalidad las normas que los regulan y adicionalmente se puede generar una disminución de la energía de fabricación hasta en un 35% [44] y mejorar las propiedades de conductividad térmica [47-48]. Como materia prima también pueden ser utilizados como agregados para la fabricación de concretos en compañía de fibras [49], haciéndolos más económicos mientras cumplen con las resistencias y normas requeridas. Otros autores han encontrado que la utilización de residuos de excavación en compañía de cenizas volantes y otros aditivos como cal pueden generar mezclas sin aglutinantes cementicios destinadas para la fabricación de diversos elementos afines a la construcción o desarrollo urbano [50]. A pesar estos esfuerzos, se evidencia la falta profundidad en la información sobre el tema de reutilización de residuos de excavación [51] que apunten a la disminución de las tasas de disposición de estos residuos.

2.3. Segundo acuerdo características fisicoquímicas

Como se indicó en la sección anterior, son pocos los investigadores que han reportado la caracterización de los residuos, como un criterio fundamental para decidir si un residuo tiene potencial aplicación. Debe considerarse que la reutilización de un residuo de demolición y construcción depende, por su puesto, de sus características y del efecto que estas pueden tener sobre las condiciones finales de un producto. Muchos autores presentan criterios asociados al tamaño que

Tabla 3.
Composición mineralógica de residuos mampostería según aplicación.
Adaptado de varios autores.

Composición	Reutilización			
	Agregado mortero		Agregado concreto	Materia prima Cemento
	Xu et al (2014)	Martínez, et al (2013)	Silva et al (2014)	Galbenis & Tsimas (2006)
Al_2O_3	5,25	13,29	15,50	9,7
CaO	11,71	26,09	8,73	26,77
Fe_2O_3	8,36	4,93	9,84	4,58
K_2O	3,48	0,83	1,29	1,49
MgO	-	3,82	3,50	2,31
SiO_2	71,35	47,43	54,09	44,59
MnO	-	0,08	0,18	-
TiO_2	-	0,38	0,88	-
SO_3	-	-	0,14	-
P_2O_5	-	0,08	0,20	-
Na_2O	-	2,21	1,92	-
Pérdidas ignición	-	0,86	3,40	9,14

Fuente: adaptado de varios autores [33,34,37,41]

Tabla 4.
Composición mineralógica de residuos de roturas cerámicas según aplicación. Adaptado de varios autores

Composición	Reutilización				
	Agregado mortero mampostería		Agregados Concreto		
	Saiz Martínez et al. (2016)	Martínez Etxeberria et al. (2013)	Medina Banfill et al. (2013)	Medina et al. (2012)	Suzuki et al. (2009)
Al_2O_3	10,1	13,29	9,83	24,46	9,1
CaO	15,7	26,09	17,98	0,63	11,8
Fe_2O_3	2,44	4,93	2,49	0,94	0,91
K_2O	2,31	0,83	3,17	2,8	1,63
MgO	1,81	3,82	1,85	0,19	0,67
SiO_2	45,5	47,43	48,75	68,41	58,2
MnO	-	0,08	0,04	-	-
TiO_2	0,32	0,38	0,27	0,55	0,1
SO_3	3,12	-	2,64	-	2,12
P_2O_5	0,12	0,08	0,12	0,17	0,1
Na_2O	0,95	2,21	0,86	1,65	2,38
ZrO_2	-	-	-	0,08	12,6
Pérdidas ignición	16,5	0,86	12,00	0,12	2,46
					1,64

Fuente: adaptado de varios autores [40-43]

según el país y el tipo de aplicación debe cumplir una norma (en Colombia en el caso de los agregados para concretos y morteros la distribución de tamaño de partícula debe ajustarse a NTC 174 y en pavimentos a INV E- 213 y INV E- 214 y de absorción de agua. Respecto de la caracterización mineralógica, de la revisión bibliográfica, lograron extraerse algunos datos sobre la química de los minerales que los hacen susceptibles a ser usados. Para la reutilización como agregados se requieren altos contenidos de sílice y calcio (>20% y >10% respectivamente) y para reutilización como remplazo de cementantes o puzolanas elevados contenidos de CaO (>18%) y alúmina, como puede revisarse en las Tablas 3 y 4.

De otro lado, no se encontraron reportados índices asociados al consumo energético requerido para la reducción de tamaño de los residuos, previo a su reutilización.

3. Experimental: caracterización de RCD locales

3.1. Materiales y métodos

Los RCD's analizados consisten en residuos de mampostería de ladrillo y bloque-separadores de mortero, roturas cerámicas, y suelo de pobres características geotécnicas proveniente de residuos de excavación, fueron suministrados por la empresa Concreto S.A. Respecto de este último residuo, si bien es cierto la literatura no lo reporta de gran potencial y la reutilización más importante es el retrolleno, en el caso particular de estudio dado su inventario era el residuo con mayor problemática de vertido



Figura 1. Metodología desarrollada.

Fuente: elaboración propia

en obra. Las muestras fueron extraídas sin ningún tipo de proceso de separación, además sin trituración previa. La caracterización física realizada incluyó un análisis granulométrico convencional por tamizado, así como la determinación de la absorción y densidad según NTC 237 para los residuos de naturaleza cerámica. Este procedimiento se llevó a cabo en 4 intervalos granulométricos diferentes (en bruto, retenido en malla #6, entre la malla #6 y la malla #100, y pasante malla #100), con el fin de conocer los cambios en la absorción del material dependientes del tamaño de partícula. Las muestras también fueron analizadas para descripción morfológica por microscopía electrónica de barrido SEM con un equipo EVO LS 15 Zeiss a una distancia de trabajo WD: 8.5-9 mm y energía EHT: 20 kV. La caracterización química y mineralógica incluyó pruebas de difracción de rayos X en un equipo PANalytical con Goniómetro Omega/2 theta, y cuantificación por sonda EDS. Respecto de la caracterización energética, se obtuvieron medidas del índice de Bond, mediante una molienda escalonada de 700 cm³ de material pasante malla #6 para estimar los gramos producidos por revolución (Gbp) y el índice de Bond correspondiente. El proceso garantiza la precisión de la medida al converger en las últimas 3 etapas.

Luego, con los resultados de la caracterización completa, se procede a comparar respecto del uso que la literatura reporta para los residuos que se identifican con el mayor potencial de utilización, ya sea por su calidad o por su inventario. Una vez realizada la toma de decisiones, se fabrica un modelo de aplicación. En la Fig. 1, se muestra un esquema de la metodología experimental empleada en este estudio.

3.2. Resultados y discusión

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la caracterización mineralógica física y energética de RCD's locales.

3.2.1. Caracterización física

La Fig. 2, presenta las curvas granulométricas para cada uno de los materiales en bruto, esto es, sin ningún proceso de separación o reducción de tamaño.

Las curvas granulométricas en ninguno de los casos pudieron ajustarse a una distribución estándar Rosin Ramler o Schuman, lo que indicaría que son bimodales. Como es de esperarse, los residuos de mampostería y las roturas cerámicas

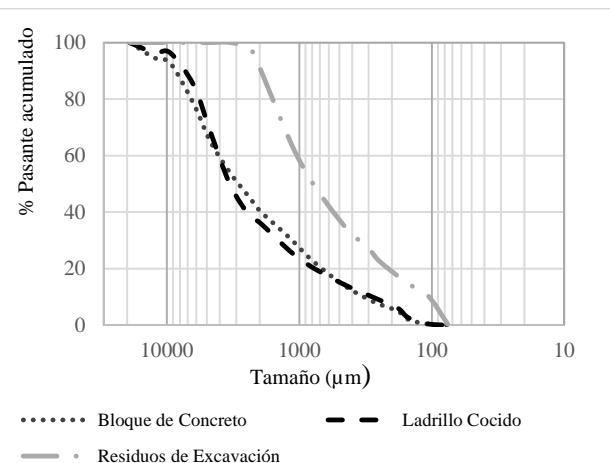


Figura 2. Curvas granulométricas de RCD estudiados.

Fuente: elaboración propia.

están enriquecidos en tamaños grandes (F80 en 7000 μm) y presentan fracciones importantes de tamaños finos (aproximadamente 10% pasante malla 100). Lo anterior, condiciona la aplicación sin procesar de estos residuos como agregado, debido a que la presencia de partículas tan finas, impide el empaquetamiento óptimo y aumenta la absorción de agua.

Respecto del suelo, según el tamaño máximo presente puede categorizarse como un suelo arenoso-arcilloso (SW-SC).

En la Tabla 5, se resumen los resultados obtenidos para absorción y densidad de residuos de mampostería y de roturas cerámicas. En el caso de los bloques-separadores que están compuestos de elevadas cantidades de cemento y cuyo tamaño de partícula es muy fino, no fue posible una determinación de la absorción por el método mencionado, pero se encontró que su densidad media es 3.01 g/cm³.

Los resultados obtenidos muestran que, en el caso de las roturas, los tamaños superiores a la malla 6 controlan la absorción de agua, mientras que en bloque tanto el retenido como el pasante en la malla 6 tienen influencia sobre la absorción global. En el caso del bloque, en tamaños finos la absorción se encuentra al límite del valor máximo permitido para el uso de RCD como agregado (reutilización más usual) que es 9% [52-54].

Tabla 5.

Absorción de agua y densidad (g/cm³) para RCD locales según NTC 237. Densidades: p1: muestra secada en el horno p2: muestra superficialmente seca, p3: relativa aparente.

Rotura cerámica	p1	p2	p3	Absorción
En bruto	2.00	2.25	2.67	12.4%
+6'	2.01	2.26	2.67	12.5%
-6 +100'	2.38	2.49	2.69	4.9%
-100'	2.54	2.57	2.62	1.2%

Mampostería bloque	p1	p2	p3	Absorción
En bruto	1.77	2.14	2.83	21.3%
+6'	2.18	2.40	2.80	10.1%
-6 +100'	2.53	2.63	2.81	4.0%
-100'	2.21	2.41	2.74	8.7%

Fuente: elaboración propia

Tabla 6.
Cuantificación de fases por XRD para RCD locales.

Muestra	Fases cristalinas	Fracción (%)
Mampostería de bloque y separadores	Cuarzo	21,8
	Calcita	19,8
	Albita	13,1
	Cinocloro	0,3
	Feldespato	21,8
	Biotita	2,2
	Cordierita	6,3
Mampostería de ladrillo	Yeso	1,0
	Anortita	13,6
	Cuarzo	51,1
	Calcita	7,8
	Albita	39,0
	Cordierita	1,7
	Caolinita	0,5
Roturas cerámicas	Cuarzo	29,2
	Calcita	9,2
	Albita	57,0
	Cordierita	2,1
	Biotita	2,2
Residuos de excavación	Caolinita	0,4
	Cuarzo	17,7
	Albita	15,7
	Caolinita	52,2
	Cordierita	3,3
	Moscovita	11,0

Fuente: elaboración propia

3.2.2. Caracterización mineralógica y morfológica

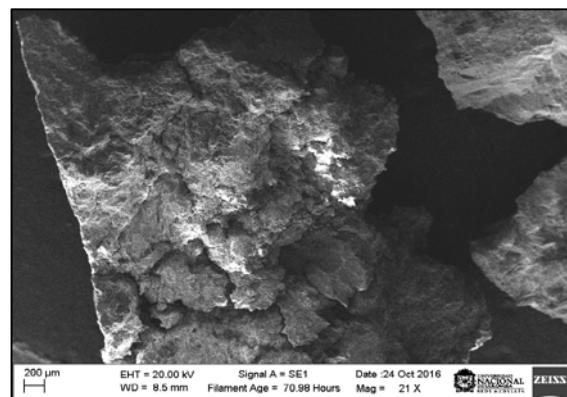
En la Tabla 6 se resume la caracterización mineralógica respectiva, obtenida por comparación de patrones de difracción. La fase cuarzo (SiO_2), los feldespatos: Albita, Anortita y Plagioclasa, y el carbonato de calcio son las fases dominantes en los residuos cerámicos analizados. Los residuos de excavación son los únicos que presentan fases arcillosas tales como moscovita y caolinita. Las cantidades disponibles de aluminio se reportan asociadas a minerales como la cordierita y algunos filosilicatos como la biotita.

Las Figs. 3 y 4 muestran la morfología tipo “blocky” de forma irregular con tamaños promedios de 200 a 600 μm , asociados tanto a los residuos de mampostería como a las roturas cerámicas. La cuantificación por EDS muestra la presencia de los elementos químicos: Fe, O, Si, C K, Al, S, Ca y Mg, elementos constituyentes de las fases reportadas por XRD. En la Fig. 5, se observa la imagen SEM respectiva del suelo proveniente de residuos de excavación, donde se observan las estructuras laminares de las arcillas y su diferencia de tamaño respecto de las partículas de arena. Así mismo, se presentan los espectros EDS para este residuo.

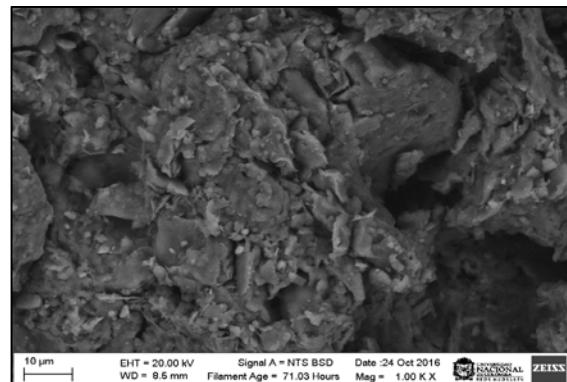
3.2.3. Caracterización energética

En la Tabla 7, se resumen los índices de trabajo para los residuos evaluados. Por sus condiciones naturales, los suelos no son materiales considerados para ser reducidos de tamaño.

Los resultados del Índice de Bond, indican que los RCD provenientes de roturas cerámicas, desde la perspectiva de consumo de energía, son los residuos con mayor potencial de aplicación pues tienen un índice de bond de 11 Kw-h/ton. Sin embargo, experimentalmente fue el procedimiento más complejo



a) 21X



b) 100X

Figura 3 a) y b). Imágenes SEM de partículas de residuos de mampostería de bloque. Morfología tipo “blocky”.
Fuente: presente estudio

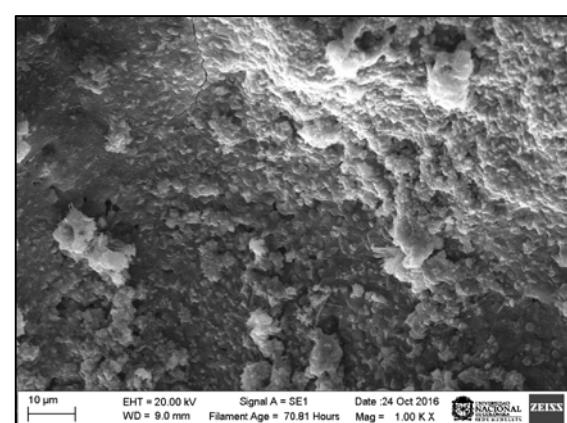
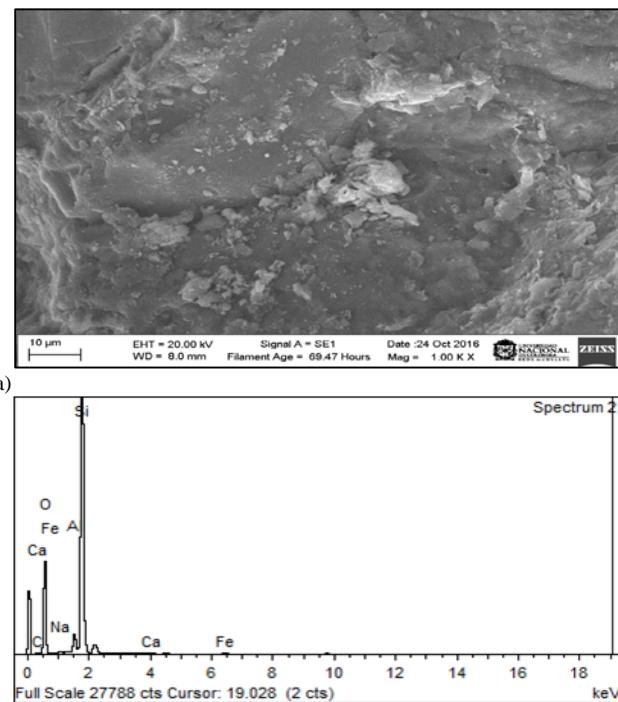


Figura 4. Imagen SEM de partículas de residuos cerámica. Morfología irregular. Imágenes obtenidas en el presente estudio.
Fuente: presente estudio

pues requirió de 10 ciclos para la convergencia lo que podría incidir en la precisión del ensayo. Así mismo, la pérdida de material fino en este RCD fue superior al 1%. Como en todos los casos, el índice de trabajo fue inferior a 20 kW-h/ton (estándar en plantas de producción de agregados naturales) todos los residuos son susceptibles de ser procesados con un consumo de energía del mismo orden (o en algunos casos menor) que el requerido en el beneficio de agregados naturales.



b)

Figura 5 a) Imagen SEM de partículas de residuos de excavación. b) Caracterización química local por EDS para residuos de excavación. Imágenes obtenidas en el presente estudio.

Fuente: elaboración propia

Tabla 7.
Resumen del Índice de Bond como indicador del consumo energético.

Residuo	Gbp		WI (Kw-h/ton)	
	Muestra	Contramuestra	Muestra	Contramuestra
Ladrillo	2.234	2.121	12.142	11.435
Bloque	1.504	1.602	15.925	15.122
Roturas cerámicas	2.163	2.200	11.855	11.950

Fuente: elaboración propia

Idealmente la reutilización de un residuo debería hacerse en bruto, pero generalmente esto no es posible a nivel práctico. Técnicamente, un residuo puede cumplir con las condiciones de reúso, pero si energéticamente tiene un consumo mayor que obtener una materia prima nueva, esto imposibilitaría su reciclaje.

4. Análisis de resultados de caracterización y ejemplo de aplicación

Los resultados de caracterización física y mineralógica, así como un análisis de inventario específico, mostraron que los residuos con mayor potencial de uso para el caso local son los residuos de excavación. El elevado contenido de caolinita (mayor al 50%) y una distribución de tamaños muy cercanos a la arena con contenidos mínimos de partículas grandes, implica que puede ser empleado en la fabricación de elementos de tierra y cemento tal como fue reportado por [47, 48] sin requerir ninguna preparación adicional a un tamizado en una malla gruesa. Al comparar la composición mineralógica de los residuos de excavación y dicha literatura, se encuentra una

correspondencia apropiada respecto de los minerales presentes. Sin embargo, el contenido de SiO₂ y CaO del suelo no son suficientes para generar elementos con alguna resistencia, según los reportes consultados. En este caso, la caracterización mineralógica del suelo, mostró un contenido de 17.7% de sílice cuando las referencias emplean fuentes de contenidos desde 47 a 85%; y para el CaO (fuente de Ca que tiene capacidad cementante) se emplea en contenidos que varían desde 1.5 a 2.5% y para el particular, no se reporta en ninguna proporción. Para potenciar el uso de los residuos de excavación, en la fabricación de elementos tierra-cemento, se requiere el aporte de material silíceo en tamaño arena como agregado, que será obtenido de los residuos de mampostería. Estos residuos, además de elevados contenidos de sílice, reportan calcita y yeso. Estos últimos minerales podrían actuar como cementantes o ayudantes del cemento, mejorando las propiedades de compactación y resistencia mecánica. En este sentido, tanto las fracciones gruesas como finas de residuos de mampostería presentan ventajas de uso respecto de los agregados naturales, pues además de aportar la fracción a áridos faltante, puede mejorar el desempeño. Evidentemente, para emplear RCD de mampostería se requiere de una reducción de tamaño para obtener un tamaño máximo nominal en la malla #6, que, reduzca la absorción de agua. El índice de Bond mostró ser el más elevado para todos los materiales analizados, aspecto que deberá considerarse como una restricción económica del proceso. Luego de identificar el potencial de uso de residuos de excavación y mampostería para la fabricación de elementos no estructurales tierra-cemento, se realizó un modelo tipo placa con los suelos residuos de excavación como base y los residuos de bloque de mampostería tanto como agregado (en tamaño +200) como remplazando una porción del cemento adicionado (en tamaño -200). Una revisión en la literatura referida a los métodos de fabricación referenciados en [47, 48], permitió definir un protocolo de mezclado y manufactura para estandarizar el proceso. Un resumen de dicho protocolo se muestra en la Fig. 6.

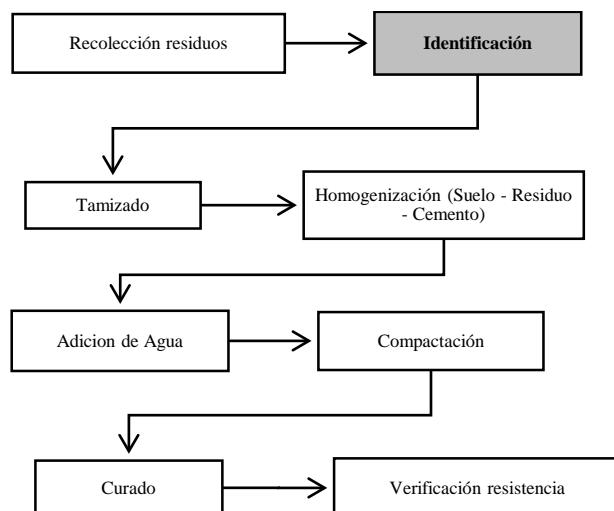


Figura 6. Protocolo de fabricación elementos tipo placa suelo – cemento – RCD.

Fuente: elaboración propia.

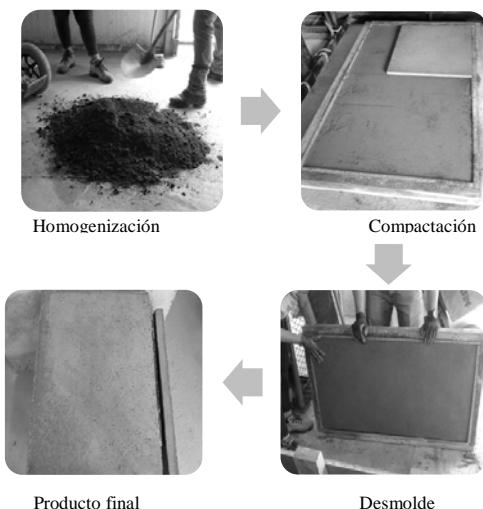


Figura 7. Proceso de fabricación modelo de reutilización de RCD, basado en la caracterización fisicoquímica
Fuente: elaboración propia.

Para el diseño de la dosificación se consideró el uso de 95% de residuos (entre suelo y bloque) y una relación A/C acorde con la humedad óptima de compactación. Se empleó compactación manual y una formaleta simple de madera para que el proceso pueda ser reproducido por cualquier usuario con materiales de composición mineralógica equivalente a la empleada. La resistencia a compresión final obtenida fue de 9MPa Una imagen general del proceso de fabricación y del resultado final se encuentra en a Fig. 7.

La composición química y física de los residuos de mampostería de ladrillo y de las roturas cerámicas, indican un mayor potencial de uso para aplicaciones en donde se requiera actividad puzolánica o sean permitidas grandes reducciones de tamaño. Sin embargo, para el caso de estudio, el volumen de producción fue muy bajo, lo que condicionó su aplicación.

5. Conclusiones

La determinación de las propiedades físicas y mineralógicas es una herramienta en la definición de la aplicación de cualquier material. En el caso de RCD's, esto es aún más relevante puesto que la viabilidad técnica de su reutilización depende, en gran medida de la cantidad producida, pero también está determinada por la composición mineralógica y propiedades como densidad, absorción de agua y distribución de tamaño de partícula. Así mismo, en el caso de RCD's que deban ser sometidos a procesos de reducción de tamaño, conocer su índice de trabajo es determinante para el diseño final del beneficio y para la evaluación del costo energético del reprocesso. Aunque la caracterización fisicoquímica y la determinación del inventario pueden ser procesos demandantes en tiempo y dinero, los resultados obtenidos son un punto de partida no sólo para la identificación de los residuos con mayor potencial de reutilización, sino para la optimización del prototipo a fabricar, garantizando la incorporación de varios tipos de RCD en diferentes granulometrías, y con diferentes

aportes a las características del producto final. En este sentido, la principal ventaja de conocer los residuos producidos, es desde la perspectiva técnica, eliminar la disposición en botadero de materiales que pueden ser transformados y ser tratados como materia prima.

En el caso local, a partir de los resultados de volumen de producción y de la caracterización física y mineralógica específica para cada residuo, se determina la aplicación que maximiza la reutilización. Se probó la metodología con un modelo consistente en placas suelo-cemento conformadas por 95% de RCD, con propiedades finales acordes con los requerimientos mínimos exigidos para elementos no estructurales. Además, se genera un protocolo de fabricación extensible a RCD de similares características.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo a Concreto S.A.y a la Universidad de Medellín, entidades financieras del proyecto de investigación “Caracterización y valoración de RCD para la identificación de su potencial uso como materiales de construcción”, cuyos resultados se ven reflejados en el presente artículo.

Bibliografía

- [1] Silva, R.V., de Brito, J. and Dhir, R.K., Performance of cementitious renderings and masonry mortars containing recycled aggregates from construction and demolition wastes. *Construction and Building Materials*, 105, pp. 400-415, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.171
- [2] Won, J. and Cheng, J., Identifying potential opportunities of building information modeling for construction and demolition waste management and minimization. *Automatization in Construction*, 79, pp. 3-18, 2017. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.02.002
- [3] Grettel, A. and Hernandez, L., Administración y manejo de los desechos en proyectos de construcción Etapa 2 Alternativas de manejo. Vicerrectoría de investigación, Instituto tecnológico de Costa Rica, 2007.
- [4] Robayo-Salazar, R.A., Matthey-Centeno, P.E., Silva-Urrego, Y.F., Burgos-Galindo, D.M. and Delvasto-Arjona, S., Los residuos de la construcción y demolición en la ciudad de Cali: un análisis hacia su gestión, manejo y aprovechamiento. *Tecnura*, pp.157-170, 2015.
- [5] Zapata-Ospina, G., Manejo de escombros, un reto para el Aburrá. *El Colombiano*, 18 de mayo de 2016.
- [6] Loaiza-Bran, J.F., Normas en Medellin piden aprovechamiento progresivo de escombros. *El Colombiano*, 10 de Enero de 2016.
- [7] Yuan, H. and Shen, L., Trend of the research on construction and demolition waste management. *Waste Management*, 31, pp. 670-679, 2011. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.10.030
- [8] Yuan, H.P., Shen, L., Jane, J.L. and Lu, W.S., A model for cost-benefit analysis of construction and demolition waste management throughout the waste chain. *Resources, Conservation and Recycling*, pp. 604-612, 2011. DOI: 10.1016/j.resconrec.2010.06.004
- [9] Secretaría de Gestión y Control Territorial, Subsecretaría de Servicios Públicos y Secretaría de Medio Ambiente., Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos-PGIRS Municipio de Medellín 2016-2027. Medellín, Colombia, 2016.
- [10] Eusko Jaurlaritza Gobierno Vasco., Monografía sobre residuos de construcción y demolición. IHOBE, 1, Sociedad Pública de Gestión Ambiental, 2004.
- [11] Oikonomou, N.D., Recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, pp. 315-318, 2005.
- [12] Medina, C., Zhu, W., Howind, T., Frías, M. and Sánchez-de Rojas, M.I., Effect of the constituents (asphalt, clay materials, floating particles and fines) of construction and demolition waste on the properties of recycled concretes. *Construction and Building*

- Materials, 79, pp. 22-33, 2015 DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.070
- [13] Gómez-Mejide, B., Pérez, I. and Pasandín, A.R., Recycled construction and demolition waste in cold asphalt mixtures: evolutionary properties. *Journal of Cleaner Production*, 112, pp. 588-598, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.08.038
- [14] Özalp, F., Dilsad-Yilmaz, H., Kara, M., Kaya, Ö. and Sahin, A., Effects of recycled aggregates from construction and demolition wastes on mechanical and permeability properties of paving stone, kerb and concrete pipes. *Construction and Building Materials*, 110, pp. 17-23, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.030
- [15] Tokgöz, N., Use of TBM excavated materials as rock filling material in an abandoned quarry pit designed for water storage. *Engineering Geology*, 153, pp. 152-162, 2013. DOI: 10.1016/j.enggeo.2012.11.007
- [16] Gomes, P.C., Ulsen, C., Pereira, F.A., Quattrone, M. and Angulo, S.C., Communion and sizing processes of concrete block waste as recycled aggregates. *Waste Management*, 45, pp. 171-179, 2015. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.07.008
- [17] Bravo, M., de Brito, J., Pontes, J. and Evangelista, L., Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants. *Construction and Building Materials*, 77, pp. 357-369, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.103
- [18] Behera, M., Bhattacharyya, S.K., Minocha, A.K., Deoliya, R. and Maiti, S., Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and Building Materials*, 68, pp. 501-516, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003
- [19] Wagih, A.M., El-Karmoty, H.Z., Ebid, M. and Okba, S.H., Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete. *HBRC Journal*, 9, pp. 193-200, 2013. DOI: 10.1016/j.hbrcj.2013.08.007
- [20] Soutsos, M.N., Tang, K. and Millard, S.G., Use of recycled demolition aggregate in precast products, phase II: Concrete paving blocks. *Construction and Building Materials*, 25, pp. 3131-3143, 2011. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.12.024
- [21] Leiva, C., Solís-Guzmán, J., Marrero, M. and García-Arenas, C., Recycled blocks with improved sound and fire insulation containing construction and demolition waste. *Waste Management*, 33, pp. 663-671, 2013. DOI: 10.1016/j.wasman.2012.06.011
- [22] Disfani, M.M., Arulrajah, A., Haghghi, H., Mohammadinia, A. and Horpibulsuk, S., Flexural beam fatigue strength evaluation of crushed brick as a supplementary material in cement stabilized recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 68, pp. 667-676, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.007
- [23] Gómez-Mejide, B., Pérez, I., Airey, G. and Thom, N., Stiffness of cold asphalt mixtures with recycled aggregates from construction and demolition waste. *Construction and Building Materials*, 77, pp. 168-178, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.045
- [24] Gómez-Mejide, B. and Pérez, I., Effects of the use of construction and demolition waste aggregates in cold asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 51, pp. 267-277, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.096
- [25] de Brito, J., Ferreira, J., Pacheco, J., Soares, D. and Guerreiro, M., Structural, material, mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete. *Journal of Building Engineering*, 6, pp. 1-16, 2016. DOI: 10.1016/j.jobe.2016.02.003
- [26] Jayasinghe, C., Fonseka, W.M.C.D.J. and Abeygunawardhene, Y.M., Load bearing properties of composite masonry constructed with recycled building demolition waste and cement stabilized rammed earth. *Construction and Building Materials*, 102, pp. 471-477, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.136
- [27] Moussiopoulos, N.T., Papadopoulos, A.T., Iakovou, E.C., Achillas, H.C., Aidonis, D.T., Anastasios, D.C. and Banias, G.C., Construction and demolition waste management: State of art trends, Proceedings of the 10th International Conference on Environmental Science and Technology, pp. A1009-A1016, 2007.
- [28] Yu, R. and Shui, Z., Efficient reuse of the recycled construction waste cementitious materials. *Journal of Cleaner Production*, 78, pp. 202-207, 2014. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.05.003
- [29] Galbenis, C.T. and Tsimas, S., Use of construction and demolition wastes as raw materials in cement clinker production. *China Particuology*, 4(2), pp. 83-85, 2006. DOI: 10.1016/S1672-2515(07)60241-3
- [30] Corinaldesi, V., Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, 24, pp. 1616-120, 2010. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.02.031
- [31] Li, X., Recycling and reuse of waste concrete in China: Part I. Material behaviour of recycled aggregate concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 52, pp. 36-44, 2008. DOI: 10.1016/j.resconrec.2008.09.006
- [32] Padmini, A.K., Ramamurthy, K. and Mathews, M.S., Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23, pp. 829-836, 2009. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.03.006
- [33] Xu, S., Wang, J., Ma, Q., Zhao, X. and Zhang, T., Study on the lightweight hydraulic mortars designed by the use of diatomite as partial replacement of natural hydraulic lime and masonry waste as aggregate. *Construction and Building Materials*, 73, pp. 33-40, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.062
- [34] Silva, Y., Robayo, R., Matey, P. and Delvasto, S., Obtención de concretos autocompactantes empleando residuos de demolición. *Revista latinoamericana de metalurgia y materiales*, pp. 86-94, 2014.
- [35] Poon, C.S. and Chan, D., Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick. *Construction and Building Materials*, 19, pp. 569-577, 2006. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2005.01.044
- [36] Mueller, A., Schnell, A. and Ruebner, K., The manufacture of lightweight aggregates from recycled masonry rubble. *Construction and Building Materials*, 98, pp. 376-387, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.027
- [37] Galbenis, C.T. and Tsimas, S., Use of construction and demolition wastes as raw materials in cement clinker production. *China Particuology*, 4(2), pp. 83-85, 2006. DOI: 10.1016/S1672-2515(07)60241-3
- [38] Muñoz-Velasco, P., Morales-Ortíz, M.P., Mendivil-Giró, M.A. and Muñoz-Velasco, L., Fired clay bricks manufactured by adding wastes as sustainable construction material – A review. *Construction and Building Materials*, 63, pp. 97-107, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.03.045
- [39] Hua, K., Shui, A., Xu, L., Zhao, K., Zhou, Q. and Xi, X., Fabrication and characterization of anorthite–mullite–corundum porous ceramics from construction waste. *Ceramics International*, 42, pp. 6080-6087, 2016. DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.12.165
- [40] Saiz-Martínez, P., González-Cortina, M., Fernández-Martínez, F. and Rodríguez-Sánchez, A., Comparative study of three types of fine recycled aggregates from construction and demolition waste (cdw), and their use in masonry mortar fabrication. *Journal of Cleaner Production*, 118, pp. 162-169, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.01.059
- [41] Martínez, I., Etxeberria, M., Pavón, E. and Díaz, N., A comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate in masonry mortars. *Construction and Building Materials*, 49, pp. 384-392, 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.049
- [42] Suzuki, M., Sato, R. and Seddik-Med dah, M., Use of porous ceramic waste aggregates for internal curing of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 39, pp. 373-381, 2009. DOI: 10.1016/j.cemconres.2009.01.007
- [43] Medina, C., Sánchez-de Rojas, M. and Frías, M., Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes. *Cement & Concrete Composites*, 34, pp. 48-54, 2012. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.08.015
- [44] Venkatarama-Reddy, B.V. and Lokras, S.S., Steam-cured stabilised soil blocks for masonry construction. *Energy and Buildings*, 29, pp. 29-33, 1998. DOI: 10.1016/S0378-7788(98)00033-4
- [45] Alam, I., Naseer, A. and Shah, A.A., Economical stabilization of clay for earth buildings construction in rainy and flood prone areas. *Construction and Building Materials*, 77, pp. 154-159, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.046
- [46] Sekhar, D.C. and Nayak, S., Utilization of granulated blast furnace slag and cement in the manufacture of compressed stabilized earth blocks. *Construction and Building Materials*, 166, pp. 531-536, 2018.

- [47] Lei, Z., Arild, G., Jelle, B.P., Liu, Y., Tao, G. and Yu, W., Thermal conductivity of cement stabilized earth blocks. *Construction and Building Materials*, 151, pp. 504-511, 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.101
- [48] Khedari, J., Watsanasathaporn, P. and Hirunlabh, J., Development of fibre-based soil-cement block with low thermal conductivity. *Cement & Concrete Composites*, 27, pp. 111-116, 2005.
- [49] Voit, K. and Zimmermann, T., Characteristics of selected concrete with tunnel excavation material. *Construction and Building Materials*, 101, pp. 217-226, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.016
- [50] Young-sang, K., Tan-Manh, D., Hyeong-ki, K. and Gyeongo, K., Utilization of excavated soil in coal ash-based controlled low strength material (CLSM). *Construction and Building Materials*, 124, pp. 598-605, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.053
- [51] Magnusson, S., Lundberg, K., Svedberg, B. and Knutsson, S., Construction in urban areas implies use of construction materials from quarries and excavation of soil. *Journal of Cleaner Production*, 93, pp. 18-25, 2015. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.01.010
- [52] Medina, C., Banfill, P.F.G., Sánchez-de Rojas, M.I. and Frías, M., Rheological and calorimetric behaviour of cements blended with containing ceramic sanitary ware and construction/demolition waste. *Construction and Building Materials*, 40, pp. 822-831, 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.112
- [53] Corinaldesi, V. and Moriconi, G., Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 23, pp. 289-294, 2009. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.12.006
- [54] Soutos, M.N., Tang, K. and Millard, S.G., Concrete building blocks made with recycled demolition aggregate. *Construction and Building Materials*, 25, pp. 726-735, 2011. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.07.014

L.M. Chica-Osorio, es profesora en Facultad de Ingeniería de la Universidad de Medellín, Colombia. Ph.D. en Ingeniería con énfasis en Ciencia y Tecnología de Materiales en 2014, de la Universidad Nacional de Colombia. Msc. En Ingeniería – Materiales y Procesos en 2009 e Ingeniera de Minas y Metalurgia, 2007. Integrante del grupo GICI.
ORCID: 0000-0001-8873-5017

J.M. Beltrán-Montoya, es Estudiante de Ingeniería Civil de la Universidad de Medellín, Colombia. Auxiliar de investigación con participación en proyectos relacionados con materiales de construcción.
ORCID: 0000-0001-9491-9867



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
Geológica e Ingeniería de Minas y Metalurgia

Oferta de Posgrados

Especialización en Materiales y Procesos
Maestría en Ingeniería - Materiales y Procesos
Maestría en Ingeniería - Recursos Minerales
Doctorado en Ingeniería - Ciencia y Tecnología de
Materiales

Mayor información:

E-mail: acgeomin_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 53 68