



Aprovechamiento de un residuo del carbón para reducción del impacto ambiental de la minería del carbón en Colombia: estudio del potencial de uso en la industria del cemento

Use of coal waste to reduce the environmental impact of coal mining in Colombia: a study of application in the cement industry

José Rodríguez ^a, Jorge I. Tobón ^b, Moisés Frías ^c & María Isabel Sánchez de Rojas ^d

^a Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Grupo de Investigación del Cemento y Materiales de Construcción, Medellín-Colombia, jjrodriguezrodr@unal.edu.co

^b Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Grupo de Investigación del Cemento y Materiales de Construcción, Medellín-Colombia, jitobon@unal.edu.co

^c Investigador titular, Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción, Madrid-España, mfrias@ietcc.csic.es

^d Investigador titular, Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción, Madrid-España, srojas@ietcc.csic.es

Recibido: noviembre 15, 2018. Aceptado: diciembre 21, 2018.

Resumen

Con el propósito de reducir la emisión de CO₂ en la producción de cemento, incrementar el aprovechamiento de residuos y generar materias primas alternativas con mayor disponibilidad y potencial de uso, se han venido estudiando nuevos materiales capaces de desarrollar propiedades cementicias, especialmente residuos industriales, que permiten disminuir el consumo de clínker en el cemento. Adicionalmente, se conoce que la minería del carbón genera gran cantidad de residuos o estériles, tanto en la explotación como en el beneficio. Por tanto, en este trabajo se estudió el desempeño mecánico y la resistencia a la compresión de una matriz de cemento adicionada con un residuo del carbón colombiano activado térmicamente, generado específicamente del proceso de lavado del carbón, con el propósito de poder utilizar este residuo como material cementante suplementario. La caracterización físico-química y mineralógica del material en estado natural y calcinado, se llevó a cabo mediante granulometría por hidrómetro, FRX, DRX, ATG/ATD y análisis próximos del carbón. El residuo está compuesto en su mayoría por SiO₂, Al₂O₃, SO₃ y Fe₂O₃, y sus fases mineralógicas principales son cuarzo, caolinita e illita. Se evaluó la resistencia mecánica a la compresión de morteros con 20% de sustitución y se encontraron resultados óptimos al comparar con la muestra control a 28 y 90 días de curado.

Palabras clave: arcilla calcinada, eco-cementos, metacaolín, puzolana, residuo del lavado del carbón.

Abstract

New materials capable of developing cementitious properties, especially industrial waste that allows reducing the clinker in cement, have been studied to reduce CO₂ emissions in cement production, increase the use of waste and generate alternative raw materials with greater availability and potential for use. Additionally, it is known that coal mining generates a large amount of waste, both in the exploitation and benefit of it. Therefore, this paper studies the mechanical performance (compression strength) and its effect on a cement matrix added with a thermally activated Colombian coal waste, generated from the coal washing process (washery rejects), with the purpose of using this waste as supplementary cementing material. The physical-chemical and mineralogical characterization of raw and calcined material was carried out by a hydrometer, XRF, XRD, TGA/TDA, and coal proximate analysis. The waste is composed mostly of SiO₂, Al₂O₃, SO₃, and Fe₂O₃, and its main minerals are mica, kaolinite, quartz, and illite. The compressive strength of mortars added with 20% of substitution was evaluated. Good results were obtained with this substitution, after both periods of 28 and 90 days of curing time.

Keywords: calcined clay, coal washery rejects, eco-cements, metakaolin, pozzolan.

1 INTRODUCCIÓN

Es evidente que la minería tiene un gran impacto sobre el medio ambiente y, aunque esos impactos se pueden mitigar o reducir, en la mayoría de los casos las soluciones suelen ser compensatorias debido a que el impacto real no puede ser eliminado. En el caso de la minería de carbón, tanto subterránea como a cielo abierto, en el proceso de explotación se generan múltiples impactos ambientales debido a las emisiones de gases como CH₄ y

Citar como:

J. Rodríguez, J. Tobón, M. Frías, M. I. Sánchez de Rojas. "Aprovechamiento de un residuo del carbón para reducción del impacto ambiental de la minería del carbón en Colombia: estudio del potencial de uso en la industria del cemento" Revista CINTEX, Vol. 23(2), pp. 95-102. 2018.

CO₂, desprendimiento de material particulado y generación-acumulación de residuos sólidos estériles de desecho [1]. Específicamente en el proceso de lavado del carbón, se producen corrientes de residuos sólidos procedentes del proceso de separación por tamizaje y por métodos físicos (gravimetría y flotación), compuestos por trazas de carbón que no lograron separarse, restos de materia mineral y compuestos químicos empleados para modificar tensión superficial o densificar el medio facilitando la separación. Se conoce que la materia mineral que compone estos residuos, en general, es rica en cuarzo, micas, pirita y minerales arcillosos, como caolinita e illita [2]-[3].

Adicionalmente, en la mayoría de los casos, estos residuos no son valorizados y tienden a ser acumulados por largos periodos de tiempo en forma de pilas y botaderos de mina de manera indiscriminada [4]-[5]. Entre los impactos ambientales de mayor afectación se encuentran la contaminación química del agua y suelo debido a lixiviación de contaminantes en el subsuelo (acidificación, trazas de compuestos tóxicos) luego de precipitaciones y por la humedad propia del material; impacto físico sobre el suelo (sobrecarga) que generan inestabilidad, afectación del nivel freático y pérdida de espacio útil; contaminación del aire, efecto del desprendimiento de material particulado y por combustión de las pilas acumuladas (auto-ignición) [1], [6]. Para contextualizar la dimensión de esta problemática, tomando solo como ejemplo a China como mayor productor de carbón, en el año 2015 se tenían acumuladas 4.5 billones de toneladas, con una tasa de generación del residuo de 150 a 200 millones de toneladas por año [7]. Beltramini et al. [8] expresa que entre el 40 y el 60% del carbón bruto corresponde a residuo estéril, y es esta la estadística más optimista con respecto a otros autores [9]. En el caso colombiano, solo entre 2010 y 2016 se produjeron más de 524 millones de toneladas de carbón [36] que, de acuerdo con lo anterior, equivaldrían a cerca de 200 a 300 millones de toneladas de residuo estéril, sin contar la generación acumulada hasta esa fecha.

Por otro lado, se conoce que la industria cementera es responsable de impactos ambientales significativos asociados especialmente al agotamiento de recursos no renovables y a la generación de gases contaminantes de efecto invernadero como CO₂, SO_x y NO_x. El proceso tradicional de fabricación de cemento portland, en sus inicios sugería el consumo únicamente de minerales naturales extraídos de la corteza de terrestre, materias primas no renovables. Sin embargo, la visión de la industria cementera ha cambiado mucho, ya que el descubrimiento de nuevas materias primas, especialmente generadas como residuos de otros procesos industriales, de menor costo y mayor disponibilidad, se han convertido en el foco de estudios científicos para producción de cementos adicionados, reemplazando parcialmente el clínker por estos residuos [10]-[11]. En lo que respecta a la emisión de CO₂, entre el 5 y el 7% de la emisión antrópica total mundial es ocasionada por la producción de cemento tradicional que emite cerca de 866 kg CO₂/ton de clínker producido [12], lo que equivale a una relación de 1 a 1, aproximadamente. Adicionalmente, la IEA (International Energy Agency), propuso metas concretas de reducción de la emisión de CO₂, 43% para el 2030 y 86% para el 2050 [13], lo que obliga a la industria del cemento a reducir su emisión por los menos en 1.55 Gt para este último año [12].

Estudios anteriores han comprobado científicamente que al someter el mineral arcilloso caolinita a un tratamiento térmico entre 600 y 700°C durante 1-3 horas, se logra generar un colapso de su estructura cristalina, transformándolo en un material amorfo denominado metacaolín [8], [14]-[15], que es de alta reactividad y que genera C-S-H y estratlingita adicionales al reaccionar con la portlandita Ca(OH)₂ que se libera durante la hidratación del cemento [16]. Por tanto, los materiales que contengan caolinita, como los residuos de la minería del carbón, son susceptibles a activarse térmicamente para convertirse en puzolanas artificiales y, de esta forma, incorporarse a los cementos para aportar hidratos que mejoran las prestaciones mecánicas y durabilidad y, al mismo tiempo, reducir el contenido de clínker [17]. Otros autores han estudiado mezclas de cemento portland con residuos de la minería del carbón de diferentes orígenes geológicos y han demostrado viabilidad del uso de este residuo como material cementante suplementario con sustituciones entre 10 y 30%, y activación del residuo a temperaturas entre 600 y 800°C [18]-[20].

Teniendo en cuenta lo anterior, el propósito de esta investigación es estudiar el efecto de la adición de un residuo generado del proceso de lavado del carbón, tanto en su estado natural como activado térmicamente, sobre la resistencia a la compresión del cemento portland, con el fin de encontrar una solución que cierre el ciclo de la generación de residuo estéril en la minería del carbón, contribuir al compromiso mundial de reducción de emisión de gases de efecto invernadero y generar una alternativa novedosa, eco-eficiente y sostenible para el sector cementero.

2 METODOLOGÍA Y EXPERIMENTACIÓN

2.1 Materiales

2.1.1 Residuo de lavado de carbón natural

Se trabajó con una muestra natural de residuo estéril del lavado de carbón (RE) generado en la planta de beneficio de carbón de Milpa S.A. en el municipio de Samacá, Boyacá. Este material está conformado por

restos del techo y piso, así como de trazas minerales e inter-capas arcillosas que se encuentran dentro del manto de carbón. Adicionalmente, el residuo tiene presencia de impurezas químicas y minerales correspondientes a los insumos que se utilizan durante el proceso de lavado del carbón para facilitar la separación del carbón del material estéril en los medios de flotación.

2.1.2 Residuo de lavado de carbón activado térmicamente

Por otro lado, este estudio también se desarrolló sobre el mismo residuo activado térmicamente en horno eléctrico a 650°C (residuo calcinado, RC650), un tiempo de residencia de 2 h y a una rampa de calentamiento de 10°C/min, estas condiciones se seleccionaron de acuerdo con estudios previos [20]-[21]. El residuo fue sometido a un proceso de molienda hasta conseguir que todas las partículas sean inferiores a 90 µm.

2.1.3 Cemento

Para la elaboración de los morteros se empleó un cemento portland ordinario (CPO) gris Tipo CEM I 42.5R, comercializado en España por Lafarge-Holcim (Villaluenga de la Sagra, Toledo), que cumple con las especificaciones definidas en la norma europea UNE EN 197-1. La composición química medida por Fluorescencia de Rayos-X (FRX) se recoge en la Tabla 1.

TABLA 1. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS MATERIALES EMPLEADOS (FRX)

Óxidos principales/ Muestra	Otros					PPC	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃		compuestos menores
CPO (%)	18,71	4,29	2,53	62,05	3,23	6,13	3,06
RE (%)	33,99	13,54	3,49	0,34	4,97	2,85	40,82
RC650 (%)	61,90	22,73	6,28	0,50	0,72	5,20	2,68

2.2 Caracterización

La granulometría de partida del RE se realizó mediante cumplimiento de la norma ASTM D422-63, la cual requiere hacer estudio granulométrico por tamizado a la fracción mayor a 75 µm, y un estudio de granulometría de finos mediante uso de hidrómetro para el material de tamaño inferior.

La composición química del RE y RC se determinó con Fluorescencia de rayos X (FRX), mediante perla fundida en un equipo de fluorescencia de rayos X, Marca Bruker, modelo S8 Tiger.

La identificación de fases minerales se realizó por difracción de rayos x (DRX), a nivel cualitativo, usando un difractor Bruker, modelo AXS, y las condiciones de medición fueron tiempo de conteo de 1s, tamaño de paso de 0,01973°, rango de 5 a 70°, tensión de 40kV y corriente de 30mA.

Como es un residuo asociado al carbón, se realizaron los siguientes análisis próximos: humedad residual (ASTM D3173-11), humedad total (ASTM D3302/ ASTM D3302M-12), cenizas (ASTM D3174-12), material volátil (ISO 562-10), carbono fijo (ASTM D3172-13), azufre total (ASTM D4239-14 Método A) y poder calorífico bruto (ASTM D5865-13). Lo que permite hacer una estimación del contenido de carbón y su potencial energético.

2.3 Resistencia a la compresión

Los morteros se prepararon y curaron de acuerdo con la norma UNE EN 196-1, usando probetas prismáticas de 4x4x16cm, con una relación de agua/material-cementante constante e igual a 0.5 y relación de arena/material cementante de 3:1. Se elaboraron morteros de la muestra control (CPO, cemento comercial), así como una mezcla de cemento con 20% de sustitución, tanto del material en estado natural (RE), como activado térmicamente (RC650), es decir 80% cemento y 20% de arcilla natural o calcinada.

Las mediciones de resistencia a la compresión de todos los cementos se realizaron después de 28 y 90 días de curado. Con el propósito de realizar una comparación, se presentan resistencias relativas con respecto al valor real obtenido por la muestra control (morteros de CPO) a cada una de las edades, y una comparación de las resistencias desarrolladas a cada edad por la muestra RC650, tomando como referencia la resistencia a 90 días, que en este caso fue la máxima.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización

Químicamente el RE está compuesto mayoritariamente por SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 (Tabla 1), cuya suma alcanza un valor de 51.02%. Se encontró un elevado valor de pérdida por calcinación (40,82%), debido principalmente a la carga orgánica remanente en el residuo, que incluye el carbón y los compuestos químicos requeridos durante el proceso para facilitar la separación del carbón de la materia mineral (espumantes, densificantes, entre otros reactivos de naturaleza orgánica), y en menor proporción al proceso de deshidroxilación de la caolinita [22]-[23]. Cuando el residuo fue calcinado a 650°C (RC), la composición química de los tres óxidos principales (SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3) ascendió a 61.90, 22.73 y 6.28 %, respectivamente. Luego del tratamiento térmico la pérdida por calcinación del material se redujo a 2,68%, posiblemente debido a restos tanto de carbón sin quemar, así como a caolinita sin deshidroxilar totalmente y no cristalina [24].

Mineralógicamente, el análisis cualitativo por DRX (Figura 1) reveló que el RE está compuesto principalmente por minerales del grupo de la mica, con picos característicos a $26.83^\circ 2\theta$ (solapado con el pico del 100% del cuarzo) y a $7.9^\circ 2\theta$, y la presencia de cuarzo (picos intensos en 26.65 , 20.85 y 50.14°). Además, el residuo contiene minerales arcillosos tales como caolinita, con picos característicos a 12.33° , 20.3 y $24.85^\circ 2\theta$, respectivamente, los cuales no se presentan en la muestra calcinada. Un pico intenso a $20,03^\circ$ corresponde a la presencia de illita (con picos débiles en 35.02 y 55.5°). Uno de los propósitos del lavado del carbón, además de reducir su contenido de cenizas al retirar la materia mineral, es reducir el contenido de azufre especialmente de origen inorgánico, por ello se extrae la pirita (FeS_2) que acompaña al carbón y se concentra en los residuos estériles. Se comprueba el contenido de pirita en el residuo, por presencia de picos de intensidad baja a 33.04 y 56.29° . La planta de lavado emplea magnetita (Fe_3O_4) para densificar el medio en los tanques de flotación y permitir la separación por gravimetría, el cual correspondería con el pico de difracción localizado a $35.45^\circ 2\theta$.

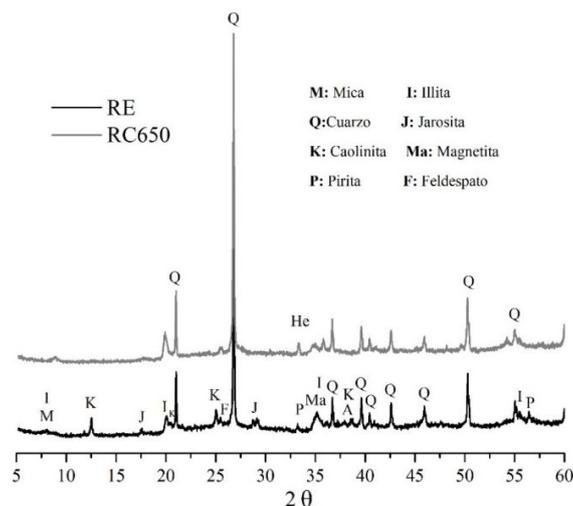


Figura 1. Difractograma de la muestra cruda (RE) y calcinada (RC650).

La distribución granulométrica del RE se presenta en la Figura 2. Se observó que la muestra en su estado natural presenta un tamaño máximo cercano a los 40 mm, un D_{80} y D_{50} , cercanos a 15 y 6 mm, respectivamente. Adicionalmente, solo un 10% de los tamaños de partículas presentes en la muestra natural, fueron inferiores a 1mm, y dado que las arcillas presentan tamaños de partículas inferiores a $2\mu\text{m}$ [25], es posible que la fracción arcillosa del residuo se pueda encontrar mayoritariamente en este rango granulométrico.

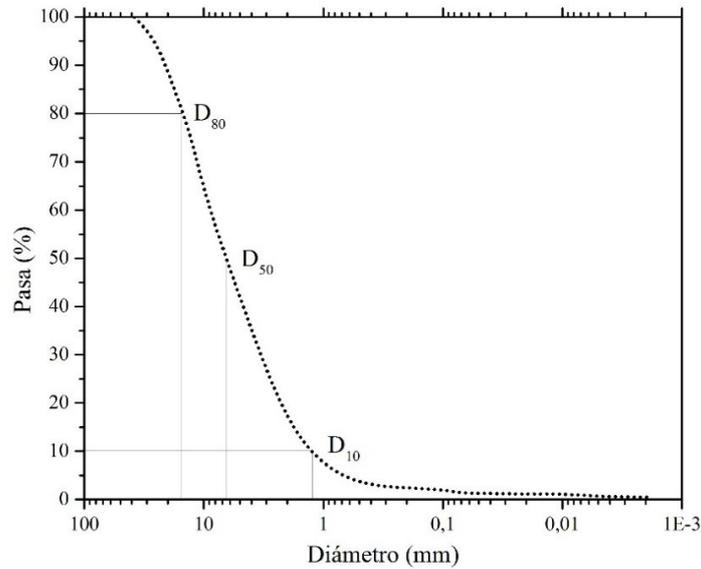


Figura 2. Distribución granulométrica del RE.

Los análisis próximos realizados al RE se observan en la Tabla 2. Aunque no es una medida directa del carbón orgánico total, la suma del carbono fijo y de los volátiles permiten tener una estimación muy aproximada del contenido de carbón presente en la muestra, que para este caso sería máximo de un 34% [26]. Sin embargo, según se ha reportado en la literatura, dentro de este valor también se encuentran incluidas las pérdidas ocasionadas principalmente por la descomposición de materia orgánica diferente al carbón y por la deshidroxilación de los minerales arcillosos caolinita e illita [2], [27]-[28]. El contenido de azufre (2.74%) es atribuido principalmente a la presencia de pirita, mineral que fue identificado posteriormente en el análisis de DRX. Dentro del porcentaje de cenizas están incluidos los minerales que no se descomponen en este rango de temperatura (cuarzo, micas, feldespatos), arcillas calcinadas (metacaolín), y hematita como resultado de la descomposición térmica de la jarosita potásica ($KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$) y la pirita [29]. Finalmente, se observó que el residuo tiene un leve potencial como combustible debido a su poder calorífico, cercano a un carbón de rango turba o lignito, que según la ASTM D388-18 está entre 3500-4600 cal/g [30].

TABLA 2. ANÁLISIS PRÓXIMOS DEL RE

Carbono fijo (%)	Material volátil (%)	Azufre Total (%)	Humedad Total (%)	Cenizas (%)	Poder Calorífico (cal/g)
19,95	14,13	2,74	4,13	59,05	2.674

3.2 Resistencia a la compresión

Las resistencias relativas desarrolladas por los morteros de la muestra control (CPO) y las mezclas a evaluar, se presentan en la Fig. 4(a) y 4(b). Se observa que, tanto a 28 días como a 90 días, los morteros adicionados con el residuo calcinado (RC650) generaron mayor resistencia a la misma edad de curado que los morteros adicionados con la muestra en estado natural (RE), lo que evidencia el incremento de la resistencia por efectos de actividad puzolánica. Estos resultados son coherentes con estudios anteriores [8] que muestran que la resistencia a la compresión de cementos adicionados con puzolana aumenta a lo largo del tiempo debido a la producción de C-S-H generado por la reacción puzolánica, que consiste en la reacción química entre la portlandita ($Ca(OH)_2$) liberada durante la hidratación del cemento y la puzolana [17]. En el caso de las arcillas calcinadas, al ser una puzolana de efecto lento, el mayor incremento de resistencia se logra a largo plazo [3], [31]. Adicionalmente, aunque ninguna de las resistencias logró superar la resistencia desarrollada por el mortero control (OPC), se observó que tanto los cementos con RE y con RC650 (ambos sustituidos en 20%), presentaron resistencias a la compresión por encima del 80% del valor de resistencia del OPC, es decir, superaron el valor del efecto dilución que se obtendría con una sustitución con un material inerte (teniendo en cuenta que se reemplazó 20% de cemento por el residuo). La resistencia a la compresión del cemento adicionado con 20% de RC650 fue de 54 y 64 MPa, a 28 y 90 días de curado, respectivamente. Esto cumple con las especificaciones de la norma europea EN 197-1.

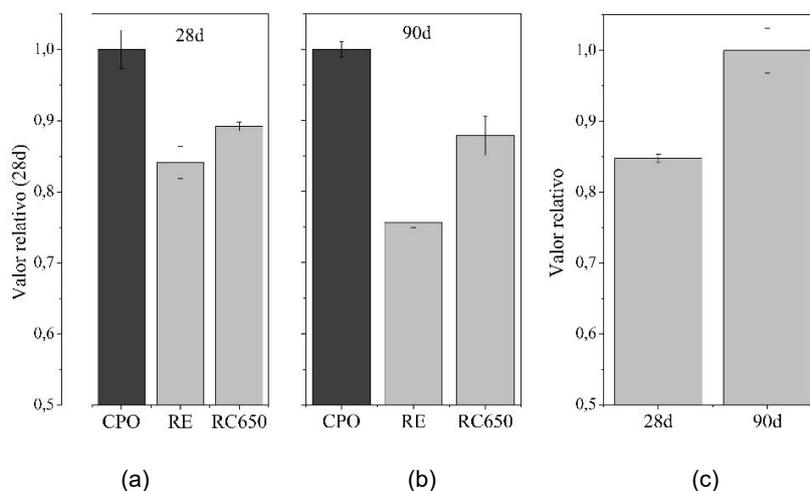


Figura 3. Resistencia a la compresión. Valores relativos a 28 días de curado (a) y 90 días (b) para cada una de las muestras. Resistencias de morteros con rc650 a 28 y 90 días (c).

En el caso del cemento con sustitución de RE se observó que también existe un leve incremento de resistencia, pero, en este caso, el efecto posiblemente se deba a un efecto filler ocasionado por la finura del material (Fig. 1). Debido a que el material es muy fino, las partículas de menor tamaño actúan como centros de nucleación y aceleran el desarrollo de hidratos que aportan resistencia a la compresión a edades más tempranas. Este fenómeno, que genera un incremento de la velocidad de reacción, es conocido como *efecto filler* [32].

Finalmente, como se muestra en la Fig. 4(c), a medida que se incrementa el tiempo de curado, por efecto combinado de la hidratación del cemento y la reacción puzolánica, se logra obtener mayor resistencia a 90 días que a 28 días de curado, respectivamente [31], [33]. Adicionalmente, se observa que a 90 días de curado la diferencia relativa entre la resistencia a la compresión de cementos sustituidos con RC650 y RE, es mayor que a 28 días, esto se debe posiblemente a que la arcilla calcinada es una puzolana de efecto lento, y a 28 días no se ha logrado desarrollar plenamente la reacción puzolánica que se da entre la portlandita y el metacaolín del residuo activado térmicamente (solo reaccionan la sílice y alúmina reactiva, por ello la importancia del contenido en RE de SiO_2 y Al_2O_3 , ver tabla 1) [17], [34-36].

4 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se determinó que el residuo de lavado del carbón en su estado natural está compuesto principalmente por SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 , con una elevada pérdida por calcinación y un porcentaje de carbón cercano al 20%. Sin embargo, cuando se calcina a 650°C , la materia orgánica se descompone y los óxidos mayoritarios pasan a conformar alrededor del 90% de su composición química.

Mineralógicamente, el RE se compone principalmente por mica, cuarzo, illita y caolinita, y es este último el mineral que permite convertir este residuo en una puzolana artificial luego de un tratamiento térmico adecuado. Se comprobó que activando el residuo a una temperatura de 650°C se puede llegar a reemplazar un 20% de un mortero con CPO con resultados aceptables.

Es posible dar aprovechamiento a un residuo que actualmente no es valorado, usándolo tanto en su estado natural como en estado calcinado mediante la fabricación de morteros convencionales, con el fin de mitigar los efectos ambientales que deja la generación y acumulación de este residuo en la minería del carbón.

Como trabajo futuro, este estudio se puede expandir para encontrar el efecto que tiene el carbón remanente de la muestra RE sobre las demás propiedades mecánicas, como el tiempo de fraguado, expansión, demanda de agua, entre otras propiedades físicas. Adicionalmente, el estudio puede llevarse a escala industrial, empezando por una prueba a escala piloto, y profundizar en los temas de eficiencia energética y control operativo de los equipos de quema donde se realizaría la activación térmica.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional de Colombia quien permitió el desarrollo y financiación de este proyecto de investigación y al Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción (IETcc), perteneciente al Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España (CSIC), por posibilitar el desarrollo experimental del proyecto

en sus instalaciones y la asesoría de su personal científico a través del Proyecto BIA2015-65558-C3-1-R (MINECO/FEDER).

REFERENCIAS

- [1] D. Burchart-korol, A. Fugiel, K. Czaplicka-kolarz, and M. Turek, "Model of environmental life cycle assessment for coal mining operations," *Sci. Total Environ.*, vol. 562, pp. 61–72, 2016.
- [2] Y. Liu, S. Lei, T. Huang, M. Ji, Y. Li, and Y. Fan, "Research on mineralogy and flotation for coal-series kaolin," *Appl. Clay Sci.*, vol. 136, pp. 37–42, 2017.
- [3] M. Academy, "Effect of Coal Gangue with Different Kaolin Contents on Compressive Strength and Pore Size of Blended Cement Paste," vol. 23, no. 1, pp. 12–15.
- [4] B. Zhengfu, I. H. I, D. J. L, O. Frank, and S. Sue, "Environmental issues from coal mining and their solutions," *Min. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 2, pp. 215–223, 2010.
- [5] Duffy, G. J., Lanauze, R. D., & Kable, J. W. (1981). Reducing the environmental impact of coal-washing practice in Australia. *Minerals and the Environment*, 3(4), 103-110.
- [6] X. Querol *et al.*, "Environmental characterization of burnt coal gangue banks at Yangquan, Shanxi Province, China," *Int. J. Coal Geol.*, vol. 75, no. 2, pp. 93–104, 2008.
- [7] R. K. Pan, M. G. Yu, and L. X. Lu, "Experimental study on explosive mechanism of spontaneous combustion gangue dump," *J. Coal Sci. Eng.*, vol. 15, no. 4, pp. 394–398, 2009.
- [8] L. Beltramini, M. Suarez, A. Guillarducci, M. Carrasco, and R. Grether, "Aprovechamiento de Residuos de la Depuración del Carbón Mineral: Obtención de Adiciones Pozzolánicas para el Cemento Portland," *Rev. Tecnol. y Cienc.*, vol. Año 3, no. 4, pp. 5–18, 2010.
- [9] K. M. Skarzynska, "Reuse of coal mining wastes in civil engineering - Part 1: properties of minestone," vol. 15, no. 1, pp. 3–42, 1995.
- [10] E. Mejía, J. Giraldo, and L. Martínez, "Residuos de construcción y demolición. Revisión sobre su composición, impactos y gestión.," *Rev. CINTEX*, vol. 18, pp. 105–130, 2013.
- [11] K. L. Scrivener, "Future Cements Options for the future of cement," *Indian Concr. J.*, vol. 88, no. 7, pp. 11–21, 2014.
- [12] M. Frías *et al.*, "The Influence of Activated Coal Mining Wastes on the Mineralogy of Blended Cement Pastes," *Am. Ceram. Soc.*, no. September, pp. 1–8, 2015.
- [13] Agency International Energy, "Energy Technologies, Perspectives, Scenarios and Strategies to 2050," 2008.
- [14] R. S. Almenares, L. M. Vizcaino, S. Damas, A. Mathieu, A. Alujas, and F. Martirena, "Industrial calcination of kaolinitic clays to make reactive pozzolans," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 6, no. April, pp. 225–232, 2017.
- [15] A. Tironi, M. A. Trezza, A. N. Scian, and E. F. Irassar, "Thermal analysis to assess pozzolanic activity of calcined kaolinitic clays," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 117, no. 2, pp. 547–556, 2014.
- [16] A. Tironi, M. A. Trezza, A. N. Scian, and E. F. Irassar, "Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 37, pp. 319–327, 2013.
- [17] R. Siddique and J. Klaus, "Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review," *Appl. Clay Sci.*, vol. 43, no. 3–4, pp. 392–400, 2009.
- [18] M. Frías, R. García, R. Vigil de la Villa, and S. Martínez, "Coal Mining Waste as a Future Eco-Efficient Supplementary Cementing Material", pp. 232–241, 2016.
- [19] L. Beltramini and A. Guillarducci, "Puzolanas artificiales. Estudio de la activación térmica de residuos de carbón.," *Jorn. Investig. Tecnol. 2013.*, no. 1, pp. 1–4.
- [20] Y. Liu, S. Lei, M. Lin, Y. Li, Z. Ye, and Y. Fan, "Assessment of pozzolanic activity of calcined coal-series kaolin," *Appl. Clay Sci.*, vol. 143, no. December 2016, pp. 159–167, 2017.
- [21] R. García-giménez, R. Vigil, D. Villa, and V. Rubio, "The Transformation of Coal-Mining Waste Minerals in the Pozzolanic Reactions of Cements," 2016.
- [22] G. Kakali, T. Perraki, S. Tsivilis, and E. Badogiannis, "Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the pozzolanic activity," *Appl. Clay Sci.*, vol. 20, no. 1–2, pp. 73–80, Sep. 2001.
- [23] A. Tironi, M. A. Trezza, E. F. Irassar, and A. N. Scian, "Thermal Treatment of Kaolin: Effect on the Pozzolanic Activity," *Procedia Mater. Sci.*, vol. 1, pp. 343–350, 2012.
- [24] H. Yanguatin, J. Tobón, and J. Ramírez, "Pozzolanic reactivity of kaolin clays, a review," *Rev. Ing. Constr.*, vol. 32, no. August, pp. 13–24, 2017.
- [25] Glendon W. Gee and D. Or, "Methods of soil analysis," in *Methods of soil analysis*, Soil Science Society of America Book Series, 2002, pp. 255–293.
- [26] B. K. Salikia, R. K. Boruah, and P. K. Gogoi, "FT-IR and XRD analysis of coal from Makum coalfield of Assam," *J. Earth Syst. Sci.*, vol. 116, no. 6, pp. 575–579, 2007.

- [27] S. Hollanders, R. Adriaens, J. Skibsted, Ö. Cizer, and J. Elsen, "Pozzolanic reactivity of pure calcined clays," *Appl. Clay Sci.*, vol. 132–133, pp. 552–560, 2016.
- [28] R. A. Sayanam, A. K. Kalsotra, and S. K. Mehta, "Studies on thermal transformation and pozzolanic activities of clay from Jammu Region (India)," vol. 35, pp. 99–106, 1987.
- [29] M. Földvári, *Handbook of the thermogravimetric system of minerals and its use in geological practice*, vol. 56, no. 4. 2013.
- [30] ASTM D388-18, *Standard Classification of Coals by Rank*, vol. 05, no. January 2000. 2002, pp. 1–7.
- [31] A. Tironi, M. A. Trezza, A. N. Scian, and E. F. Irassar, "Incorporation of Calcined Clays in Mortars: Porous Structure and Compressive Strength," *Procedia Mater. Sci.*, vol. 1, pp. 366–373, 2012.
- [32] B. Ilić, V. Radonjanin, M. Malešev, M. Zdujić, and A. Mitrović, "Study on the addition effect of metakaolin and mechanically activated kaolin on cement strength and microstructure under different curing conditions," *Constr. Build. Mater.*, vol. 133, pp. 243–252, 2017.
- [33] M. Arikan, K. Sobolev, T. Ertün, A. Yeğınobalı, and P. Turker, "Properties of blended cements with thermally activated kaolin," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 1, pp. 62–70, Jan. 2009.
- [34] M. Antoni, J. Rossen, F. Martirena, and K. Scrivener, "Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone," *Cem. Concr. Res.*, vol. 42, no. 12, pp. 1579–1589, 2012.
- [35] D. da Silva Andrade, J. H. da Silva Rêgo, P. Cesar Morais, and M. Frías Rojas, "Chemical and mechanical characterization of ternary cement pastes containing metakaolin and nanosilica," *Constr. Build. Mater.*, vol. 159, pp. 18–26, 2018.
- [36] J. A. Patiño-Murillo, J. J. Castro-Maldonado, Y. C. Gutiérrez-Sandoval, J. I. Leal-Santafé, y O. Hurtado-Figueroa, «Estudio del comportamiento de muestras de mortero natural sometidas a esfuerzo de compresión», *Lámpsakos*, vol. 1, n.º 20, pp. 22–28, 2018.
- [37] Sistema de Información Minero Colombiano [En línea]. 2016, Disponible en [02-10-2018]: http://www.upme.gov.co/generadorconsultas/Consulta_Series.aspx?idModulo=4&tipoSerie=121&grupo=368