

Aprovechamiento de subproductos de origen carbonatado en la industria del cemento y el concreto: Una revisión para evaluar su aplicación en el departamento del Huila

Use of carbonate rock mining by-products in the cement and concrete industry to assess its application in the Department of Huila: A review

Recibido: 15-05-2017 Aceptado: 14-11-2017

Karen Viviana Fabara Hernández¹
Carlos Alberto Flórez Arias²
Hanny Juliet Callejas Reyes³
Paola Cristina Cajas Daza⁴

¹ Colombiana. MsC. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Tecnoparque-nodo Neiva. Grupo de Investigación para el Desarrollo Social y Tecnológico. e-mail: kfabara@sena.edu.co.

² Colombiano. MsC. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA Tecnoparque-nodo Neiva. e-mail: cfloreza@sena.edu.co.

³ Colombiana. MsC. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA Tecnoparque-nodo Neiva. e-mail: hcallejas@sena.edu.co.

⁴ Colombiana. PhD. Universidad de Brasilia. e-mail: patolacajas@gmail.com.

Resumen

El departamento del Huila se ha convertido en un foco llamativo para desarrollar la actividad minera por su diversidad de minerales y estado virgen de los yacimientos. Para el departamento surge como primicia articular subproductos mineros con el sector de la construcción, proyectándose como un renglón fuerte en el crecimiento económico de la región. Este artículo presenta una revisión de la literatura acerca de las principales características y tendencias en la utilización de subproductos derivados de la minería de origen carbonatado en aplicaciones de construcción, especialmente en la producción de cemento y concreto Portland, reduciendo el impacto sobre el medio ambiente, costo económico y obteniendo propiedades mecánicas favorables.

Palabras clave: Subproductos mineros; rocas carbonatadas; construcción; dolomita; calcita; concreto portland; cemento portland.

Abstract

The Department of Huila has become an eye-catching focus in the development of mining activities due to its diversity of minerals and untapped deposits. It comes up for the Department, the pressing need for a joint between mining by-products and the building industry which will certainly play an important role in the region's economic growth. This article shows a literature review about the main characteristics and trends in the use of carbonate rock mining by-products in building applications, specially in

the production of Portland cement and concrete, where negative environment impacts and economic costs are minimized and beneficial mechanical properties are obtained.

Keywords: Mining by-products; carbonate rocks, building; dolomite; calcite; portland concrete; portland cement.

Introducción

El aprovechamiento de subproductos industriales es una materia objeto de investigación en aras de fomentar que los procesos industriales sean sostenibles y los impactos ambientales asociados disminuyan en el marco de una creciente población mundial. El uso más común de los subproductos industriales es en obras civiles y en materiales de construcción, seguidos por aplicaciones en agricultura y horticultura (Castells, 2012; Fraccascia, Giannoccaro y Albino, 2018; Matthey, Robayo, Torres, Ramos y Delvasto, 2015). Generalmente se requiere un conocimiento detallado de su composición, propiedades físicas y sus variaciones en calidad, así como las especificaciones del material virgen que busca ser reemplazado. En aplicaciones de obras civiles, los subproductos tienen aplicación como agregados en diferentes estructuras: (e.g. carreteras, edificios, barreras de ruido, rellenos, diques, entre otros), uso en pavimentos (García, Quereda, Mallol, Soriano, y Vicent, 2011), subcapas de vertederos, mampostería (Isa *et al.*, 2016), estabilizadores de suelos (Swart, y van Schalkwyk, 2001) entre otros (Fuentes, Fragozo, y Vizcaino, 2015; Serrano, Pérez, Torrado y Hernández, 2017; Wiemes, Pawlowsky y Mymrin, 2017). En materiales para la construcción, el uso de cenizas volátiles, barro rojo, yeso derivado de procesos de desulfuración (FGD Gypsum), particulado de gases de escape, escorias de níquel y cobre, arena de fundición como aditivos y aglutinantes en materiales de construcción como cemento Portland, concreto y asfalto. Residuos de ferrocromo son utilizados como material de aislamiento en estructuras (Sorvari y Wahlström, 2014).

En la tecnología de la construcción actual hay una tendencia muy clara e irreversible hacia el aprovechamiento de subproductos provenientes de la minería. Esta tendencia está asociada con la importancia que ha adquirido la creciente preocupación ambiental y los beneficios económicos implícitos en su uso.

Se han llevado a cabo investigaciones para encontrar formas de aprovechar los subproductos de la extracción del mármol (Bilgin *et al.*, 2012; Hebhoub, Aoun, Belachia,

Houari, y Ghorbel, 2011; Pappu, Saxena, y Asolekar, 2007; Saboya, Xavier, y Alexandre, 2007). En países como Italia, España, Turquía, Irán y Egipto, líderes en la industria del mármol a nivel mundial, el aprovechamiento de residuos producto de las acciones de minería es imperativo dado el gran volumen de producción que manejan y el alto impacto ambiental derivado. La generación de residuos desde la extracción hasta la obtención del producto terminado es del 50% del mineral extraído (Aliabdo, Elmoaty y Auda, 2014). Debido a la presión sobre el aprovechamiento de dichos subproductos, se han desarrollado a la vez investigaciones del uso de la roca dolomita para la producción de nuevos materiales sintéticos para su uso en la industria de los plásticos, producción de medicamentos, industria biomédica, ladrillos cerámicos refractarios para hornos, tratamientos de aguas efluentes de la industria minera, entre otros (Altiner y Yildirim, 2017; Aziz, y Smith, 1996; Iglesias, García-Romero, y Acosta, 2014; Niesyt y Psiuk, 2017; Rabah y Ewais, 2009; Romero, Flores, y Arévalo, 2010; Sadek 2012; Sadik, Moudden, El Bouari, y El Amrani, 2016).

En Colombia, se han desarrollado diversos estudios en torno a la utilización de subproductos de la construcción (Bernal *et al.* 2009; Correa, 2005; Delgado y Medina, 2003; Monsalve, Bolaños, Lopez y Toro, 2014; Robayo-Salazar, Mejía de Gutiérrez, y Mulford-Carvajal, 2016). En particular, fue realizada una caracterización física y mecánica a agregados reciclados provenientes de la construcción y se concluyó que es posible utilizarlos realizando una molienda fina para reducir el mortero adherido y los problemas de absorción de agua debido a porosidades (Matthey, Salazar, Silva, Álvarez y Delvasto, 2014). Posteriormente fue realizada una evaluación sobre la sustitución de arena en paneles de ferrocemento por agregado fino reciclado producto de trituración de escombros de concreto, concluyendo que es posible la sustitución hasta en un 100% generando incremento en la resistencia a la compresión de dichos paneles hasta 7,3% (Matthey *et al.*, 2015). La revisión presentada en este trabajo evidencia los potenciales usos de subproductos de origen calcáreo de la industria minera en el departamento del Huila.

Generalidades de la extracción minera del departamento del Huila

La producción minera del departamento, proviene principalmente de los municipios de Tesalia, Palermo, Santa María, Neiva e Iquira en oro y plata, de los municipios de Agrado, Gigante, Palermo y Tesalia en materiales de construcción, en arcillas de Pitalito, y en roca fosfórica

de los municipios de Aipe y Tesalia. De acuerdo con la Agencia Nacional de Minería del Ministerio de Minas y Energía existen 229 títulos mineros vigentes en la región, que representan un área de 68508,21 Ha, correspondiente al 3,66% de superposición en el departamento. En general, las actividades de la extracción de minerales no metálicos predominan sobre la extracción de minerales metálicos (Castillo, 2011), en donde la roca fosfórica, las rocas carbonatadas como la caliza, el mármol y la barita conforman un eslabón importante en la economía del departamento, hecho que puede dar lugar a beneficios técnicos, económicos y ecológicos. (Catastro Minero Colombiano, 2017; Vargas, 2015).

En la actualidad, la agrominería es la actividad principal para el uso de dichos materiales como insumo en el proceso de producción de mezclas, calces, carbonatos de calcio y demás productos para el mejoramiento de suelos del sector agrícola (Ordóñez y Bahamón, 2010). En particular, la explotación de caliza y mármol se da principalmente en la zona noroccidental del departamento en locaciones rurales de los municipios de Palermo, Teruel, Santa María y Neiva. Debido a que la producción de las actividades mineras depende de factores como el comportamiento climático y condiciones en el suministro de explosivos, no es fácil obtener un estimado de producción anual de material calcáreo de la región. Según un informe técnico y de gestión de la secretaría técnica de la cadena agrominera (Castillo, 2011), la producción promedio de materiales calcáreos por unidad de explotación es de 10 toneladas al día. Tomando en cuenta 38 títulos mineros registrados para el año 2011, la producción anual total se estima en 109440 toneladas. Tomando en cuenta un porcentaje de recuperación del 50%, la cantidad de subproductos de origen calcáreo generados al año en la actualidad se estima sea igual o mayor a 54720 toneladas al año.

Características de las rocas carbonatadas

Las rocas carbonatadas están compuestas por dos minerales principales: calcita o dolomita y un mineral no carbonatado entre fases. La calcita es la forma más estable del carbonato de calcio (CaCO_3) y es un mineral polimorfo (la misma fórmula química con diferentes estructuras cristalinas) (Dietrich, 1999). La dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) es un mineral metaestable, los cristales inicialmente formados pueden ser reemplazados luego por fases más estables vía disolución o re-precipitación. Dado que las fases de la dolomita evolucionan constantemente, una capa de dolomita puede retener o crear porosidad y permeabilidad

a mayor profundidad y en entornos de mayor temperatura que la caliza (Warren, 2000).

Cuando el carbonato contiene un mayor contenido de calcita es llamado piedra caliza; en contraste, un carbonato con mayor contenido de dolomita es llamado roca dolomita. No es usual encontrar una mezcla con contenidos similares de calcita y dolomita en un carbonato, siempre hay una tendencia a la formación del uno o del otro (Warren, 2000).

Adicional al mineral de dolomita, la roca dolomita está compuesta por algunas impurezas asociadas tales como SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 . Al someter la roca dolomita a diferentes temperaturas se pueden obtener variadas composiciones que pueden ser utilizadas en diversas aplicaciones; Darweesh (2001), demostró el desarrollo de ladrillos de construcción a partir de la mezcla de roca dolomita (40%) y arcilla silícea (60%) que al ser sometida a una temperatura de 750°C permitió que se presentaran interacciones térmicas que facilitaron la obtención de un material para construcción de alta resistencia mecánica.

Producción y consumo de cemento Portland en Colombia

El concreto Portland es el material estructural más destacado en la construcción civil, su descubrimiento constituye una verdadera revolución debido al conjunto de propiedades que presenta tanto en su moldeabilidad como en su hidráulica. Es comúnmente usado en construcción civil y no se encuentra en la naturaleza, puesto que es en realidad el resultado de una mezcla de varios materiales, tales como cemento Portland, arena, piedra y agua. Las propiedades del concreto están determinadas por la calidad y los porcentajes de los componentes usados, pudiendo ser modificados dependiendo de la aplicación deseada (Abo-El-Enein, Hashem, Amin y Sayed, 2016; Martin, 2005).

Particularmente, el cemento Portland está compuesto por clinker y adiciones minerales como el yeso controlador del tiempo de fraguado y algunas otras como *fly ash* y escorias siderúrgicas. El clinker se obtiene al mezclar e incinerar conjuntamente material calcáreo y arcilla a temperaturas superiores a los 1350°C, el proceso es descrito en la Figura 1. Esta mezcla es atractiva porque en presencia de agua se forma una reacción química, esto hace que el sistema se torne viscoso y seguidamente se endurezca, adquiriendo de ese modo una alta resistencia mecánica. Otra ventaja que presenta es que su obtención se da a partir de materias primas abundantes en la naturaleza. Este tipo de cemento permite obtener tiempos menores de

endurecimiento, mejora la tasa de hidratación y aumenta la resistencia de los compuestos del cemento en estados iniciales (Ingram y Daugherty, 1992).

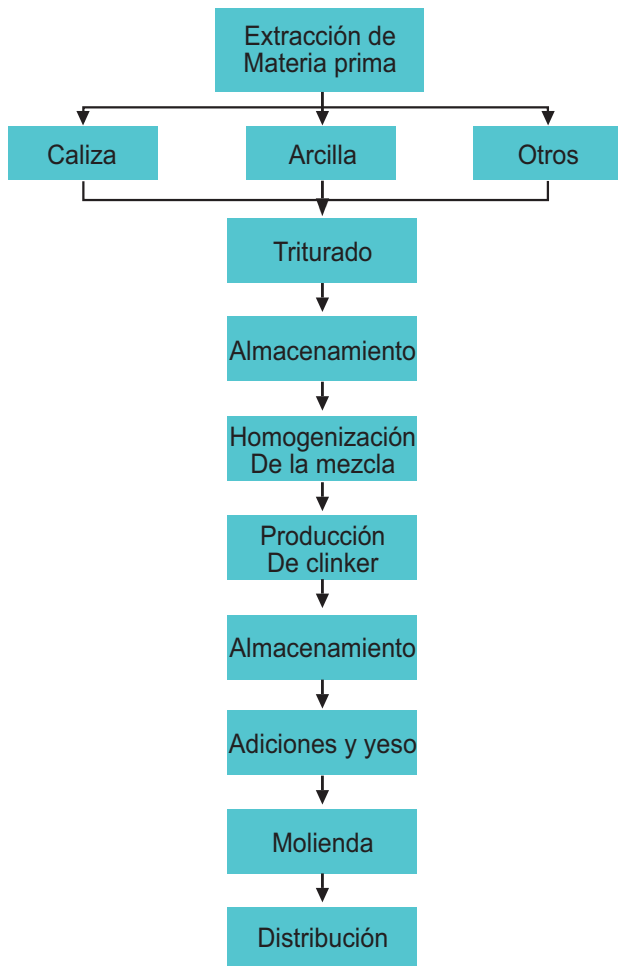


Figura 1. Proceso esquemático de la producción de cemento portland
Fuente: Los autores

Colombia cuenta con seis tipos de cemento producido por siete empresas en 19 plantas, su mercado presenta un comportamiento inestable, con producciones por encima del millón de toneladas en los últimos 3 años. El mes de agosto de 2017 se presentó en Colombia una producción de 1034,8 miles de toneladas mientras que se despacharon 1032,9 miles de toneladas al mercado nacional (DANE, 2017), la diferencia se explica con exportaciones y en menor medida con reservas, el departamento con más despachos de cemento es Antioquia con 17,4%, seguido de Bogotá con 12,1%, Cundinamarca y Valle del Cauca con 8,8% y 8,4% respectivamente. El departamento del Huila recibe el 2,4% de los despachos nacionales correspondiente a 24789,6 toneladas.

Uso de rocas carbonatadas en la producción de cemento y concreto Portland

Diversos autores han realizado investigaciones sobre los efectos del uso de rocas carbonatadas como agregados en la producción del concreto Portland. No siempre resulta fácil disponer de fuentes de agregados aptos para el concreto, sin embargo, estudios coinciden en señalar las ventajas de usar la dolomita. Revelan que la dolomita posee una mayor absorción, densidad, módulo de elasticidad, similar resistencia y desgaste respecto a agregados graníticos sobre los cuales existen abundantes experiencias (Alexander, y Mindess, 2010; Cabrera, 2017; Mangin, 2015; Milanesi *et al.*, 2010). En relación con la piedra caliza, el efecto de la dolomita aporta propiedades físicas y mecánicas significativas al concreto, viabilizando la producción de cemento Portland (Mikhailova, Yakovlev, Maeva y Senkov, 2013).

También se ha estudiado el reemplazo de la caliza por un material calcáreo dolomítico como agregado alternativo en la producción de cemento Portland. Se encontró que los sistemas que contienen un 25% en peso de este agregado presentaron mayores resistencias a la compresión. Adicionalmente se obtuvieron mejoras en la densificación de la estructura y un posible aumento de la resistencia temprana sin efectos perjudiciales en las propiedades a largo plazo del concreto (Mikhailova, *et al* 2013).

Otras investigaciones reportan que la dolomita como agregado en el cemento puede presentar expansión como resultado de la posible reactividad de las dolomitas en un entorno húmedo. Este fenómeno fue confirmado tras la observación de determinados daños a las estructuras de hormigón y por algunas pruebas de laboratorio. Los procesos de dedolomitización están relacionados con los agregados de dolomita y piedra caliza dolomítica. El mecanismo y las reacciones de la dedolomitización son conocidos y ampliamente descritos. Como resultado de la reacción de dedolomitización, la dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) puede convertirse en calcita (CaCO_3) o magnesita (MgCO_3) y la calcificación de los agregados puede esperarse al contacto con soluciones con altas relaciones de $\text{Ca}_2^+ / \text{Mg}_2^+$ que fluyen libremente por los poros (Dębska, 2015; Smith, 1999). Adicionalmente, los agregados calcáreos dolomíticos son altamente reactivos cuando están en contacto con los cationes alcalinos presentes en los cementos, efecto que podría causar degradación del producto final, siendo necesario realizar estudios previos de las cantidades a ser usadas (Rocha, Da Luz y Cheriaf, 2002).

Debido a la tendencia de crecimiento del transporte por carretera también ha aumentado la utilización de materiales locales y alternativos para la construcción de vías. Se han realizado estudios para determinar la aplicabilidad del agregado de roca caliza en las mezclas de asfalto y se ha determinado que puede ser usado exitosamente en concreto asfáltico de alto módulo para pavimento de caminos (Haritonovs, Tihonovs y Zaumanis, 2016; Sybilski, Bankowski y Krajewski, 2010). En el caso del pavimento de concreto, los aspectos que definen su desempeño están dados por la rugosidad, textura superficial y ausencia de grietas. Muchas de estas propiedades son atribuidas a las características de los agregados (Souza y Calo, 2008).

Por otro lado, la producción de clinker como principal componente del cemento Portland es un proceso intenso, una sustitución parcial de clinker por adiciones minerales representa considerables ahorros energéticos y disminución de la emisión de CO_2 proveniente de industrias de cemento y concreto. Adicionalmente, tiene sentido económico reducir la energía utilizada en la producción de cemento y concreto y al mismo tiempo, hacer un uso seguro de lo que puede ser clasificado como subproducto de la minería. (Hartshorn, Sharp y Swamy, 1999; Li, Du y Huo, 2007; Piechówka-Mielnik y Giergiczny, 2011; Tsivilis, Batis, Chaniotakis, Grigoriadis y Theodossis, 2000).

Algunos estudios muestran que las propiedades de desempeño de un cemento Portland para generar una mezcla terciaria al adicionar caliza (hasta 20%) y escoria siderúrgica de alto horno (hasta 30%), aumenta hasta un 35% la resistencia a compresión en relación con un mortero de referencia y a su vez presenta menores coeficientes de succión capilar, confirmando la acción tanto de carácter físico como químico de los materiales de adición. También mencionaron que la contracción de secado disminuye con el aumento del componente calcáreo (Aquino, Inoue, Miura, Mizuta, y Okamoto, 2010; Díaz, Izquierdo, Mejía de Gutiérrez y Gordillo, 2013).

El reemplazo de arena natural por arenas trituradas de origen carbonatado también ha sido evaluado. Para el concreto en estado endurecido, las experiencias realizadas se basan en hormigones elaborados con arenas trituradas calcítica, dolomítica, granítica y cuarítica, y como referencia se utilizó una arena natural. Todas las arenas presentaban igual módulo de finura, y los hormigones se diseñaron con iguales proporciones. Los resultados establecen que la relación entre esta resistencia y el módulo de elasticidad a los 28 días es mayor para agregados de dolomita y calcita (Cabrera, Ortega, y Traversa, 2010). Paralelamente, se ha encontrado en la producción de concreto, que el

reemplazo de la arena con polvo de mármol a razón del 15% al 75%, incrementa la resistencia a la compresión en un 20% a 26% debido a la presencia de carbonato de calcio (CaCO_3) y óxido de silicio (SiO_2) en la estructura química del mármol, desarrollando un mejor rendimiento mecánico en comparación con el concreto en el cual el polvo de mármol reemplaza al cemento, que de hecho disminuye la resistencia a la compresión y trabajabilidad de la mezcla en porcentajes superiores al 20% (Aliabdo *et al.*, 2014; Arel, 2016; Sadek, El-Attar y Ali, 2016; Sutcu, Alptekin, Erdogmus, Er y Gencil, 2015).

Finalmente, se han desarrollado estudios sobre mezclas binarias de sustitución parcial del cemento Portland. Estos son llamados cementos de adición que corresponden a los cementos con sostenibilidad ambiental. La sustitución del cemento por adiciones minerales inertes (calizas), o adiciones químicamente activas, tales como puzolanas (humo de sílice, ceniza volante, ceniza de cascarilla de arroz) pueden presentar o no buenas características en función de la calidad y cantidad de la adición. Ventajas técnicas tales como menor demanda de agua, ahorro de energía, menor porosidad capilar y buen comportamiento frente a medios agresivos (Águila, 2016; Carrasco, Cruz, Terrados, Corpas, y Pérez, 2014; Loayza Goicochea, 2014; Robayo, Matthey y Delvasto, 2013; Vegas, Gaitero, Urreta, García y Frías, 2014; Villaquirán, Rodríguez y de Gutiérrez, 2014).

Conclusiones

La revisión de la literatura permitió encontrar alternativas de alto potencial de aplicación para subproductos derivados de la minería en el departamento del Huila. Ventajas entre las cuales se pueden mencionar cuestiones ecológicas, eventual reducción de costos y mejores características mecánicas abren la puerta a posibles nuevos modelos de negocio alrededor de dichos subproductos, especialmente los relacionados con las rocas calcáreas.

Se debe analizar cuidadosamente el porcentaje de las adiciones, las características mineralógicas y la porosidad de los agregados debido a que dichos parámetros influyen en las propiedades mecánicas del concreto. Particularmente adiciones de material calcáreo en cemento Portland permiten reducir los costos del procesamiento del concreto, además es un subproducto ampliamente presente en la región y como ventaja permite acelerar la tasa de hidratación de la mezcla en una etapa inicial, proporcionando un producto con características favorables.

Referencias

- Abo-El-Enein, S. A., Hashem, F. S., Amin, M. S., y Sayed, D. M. (2016). Physicochemical characteristics of cementitious building materials derived from industrial solid wastes. *Construction and Building Materials*, 126, 983-990. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.112>
- Águila, I. (2016). Evaluación físico químico de cenizas de cascarilla de arroz, bagazo de caña y hoja de maíz y su influencia en mezclas de mortero, como materiales puzolánicos. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 23(4).
- Alexander, M., y Mindess, S. (2010). *Aggregates in concrete*. CRC Press.
- Aliabdo, A. A., Elmoaty, A. E. M. A., y Auda, E. M. (2014). Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. *Construction and building materials*, 50, 28-41. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.005>
- Altiner, M., y Yildirim, M. (2017). Production and characterization of synthetic aragonite prepared from dolomite by eco-friendly leaching-carbonation process. *Advanced Powder Technology*, 28(2), 553-564. doi: <https://doi.org/10.1016/j.appt.2016.10.024>
- Aquino, C., Inoue, M., Miura, H., Mizuta, M., y Okamoto, T. (2010). The effects of limestone aggregate on concrete properties. *Construction and Building Materials*, 24(12), 2363-2368. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.05.008>
- Arel, H. Ş. (2016). Recyclability of waste marble in concrete production. *Journal of Cleaner Production*, 131, 179-188. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.052>
- Aziz, H. A., y Smith, P. G. (1996). Removal of manganese from water using crushed dolomite filtration technique. *Water Research*, 30(2), 489-492. doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(95\)00178-6](https://doi.org/10.1016/0043-1354(95)00178-6)
- Bernal, S., Esguerra, J., Galindo, J., de Gutiérrez, R. M., Rodríguez, E., Gordillo, M., y Delvasto, S. (2009). Morteros geopoliméricos reforzados con fibras de carbono basados en un sistema binario de un subproducto industrial. *Rev. Lat. Metal. Mater S*, 1, 587-592.
- Bilgin, N., Yeprem, H. A., Arslan, S., Bilgin, A., Günay, E., y Marşoglu, M. (2012). Use of waste marble powder in brick industry. *Construction and Building Materials*, 29, 449-457. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.011>
- Cabrera, O. A. (2017). *Caracterización de la durabilidad de hormigones con arenas de trituración*. (Tesis de post grado). Recuperado de <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/3102>
- Cabrera, O. A., Ortega, N. F., y Traversa, L. P. (2010). Una fuente alternativa de agregados finos para el hormigón.
- Carrasco, B., Cruz, N., Terrados, J., Corpas, F. A., y Pérez, L. (2014). An evaluation of bottom ash from plant biomass as a replacement for cement in building blocks. *Fuel*, 118, 272-280. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.10.077>
- Castells, X. E. (2012). *Aprovechamiento de residuos agrícolas y forestales: Reciclaje de residuos industriales*. Ediciones Díaz de Santos.
- Castillo, N. (2011). Agrominería: Desarrollo Local Sostenible: Informe Técnico y de Gestión 2011. *Gobernación del Huila*, 122-141. Recuperado de <http://www.huila.gov.co/publicaciones/5220/cadena-agromineria/>
- Catastro minero colombiano, 2017. Recuperado de <http://www.cmc.gov.co>
- Correa, R. A. T. (2005). La inserción de subproductos. Una mirada desde los materiales de construcción. *Educación y ambiente*, 207.
- DANE. (2017). Boletín técnico. Lugar de publicación: Estadísticas de cemento gris Agosto de 2017. Recuperado de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/cemento_gris/Bol_cemen_gris_ago17.pdf
- Darweesh, H. H. (2001). Building materials from siliceous clay and low grade dolomite rocks.

- Ceramics International*, 27(1), 45-50. doi: [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(00\)00040-7](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(00)00040-7)
- Dębska, D. (2015). The effect of exposition conditions on the durability of cement concrete with dolomite aggregate sourced near Kraków, Poland. *Procedia Engineering*, 108, 673-680. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.198>
- Delgado, O. F., y Medina, J. A. (2003). Extrusión de perfiles espumados de madera plástica. *Revista de Ingeniería*, (18), 56-63.
- Díaz, J., Izquierdo R., Mejía de Gutiérrez, R & Gordillo, M. (2013). Mezcla ternaria de cemento portland, escoria de alto horno y piedra caliza: resistencia mecánica y durabilidad. *Revista de la Construcción*, 12(3), 53-60. doi: <https://doi.org/10.4067/S0718-915X2013000300006>
- Dietrich, R.V. (1999). Calcite (mineral). Encyclopedia Britannica. Recuperado de <https://www.britannica.com/science/calcite>
- Fraccascia, L., Giannoccaro, I., y Albino, V. (2018). *Green product development: What does the country product space imply?*. *Journal of Cleaner Production*, 170, 1076-1088. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.190>
- Fuentes Molina, N., Fragozo Tarifa, O. I., y Vizcaino Mendoza, L. (2015). Residuos agroindustriales como adiciones en la elaboración de bloques de concreto no estructural. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25(2). doi: <https://doi.org/10.18359/rcin.1434>
- García Ten, F. J., Quereda, M. F., Mallol Gasch, G., Soriano, M., y Vicent, M. (2011). Desarrollo de baldosas cerámicas para pavimentación urbana basadas en residuos industriales.
- Haritonovs, V., Tihonovs, J., y Zaumanis, M. (2016l). Performance evaluation of high modulus asphalt concrete mixes. *3rd International Conference on Competitive Materials and Technology Processes (IC-CMTP3)*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 123 (2016) 012055. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/123/1/012055>
- Hartshorn, S. A., Sharp, J. H., y Swamy, R. N. (1999). Thaumasite formation in Portland-limestone cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1331-1340. doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00100-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00100-3)
- Hebhoub, H., Aoun, H., Belachia, M., Houari, H., y Ghorbel, E. (2011). Use of waste marble aggregates in concrete. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1167-1171. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.037>
- Iglesias, I., García-Romero, E., y Acosta, A. (2014). Influence of dolomite microcrystals on the technological properties of Santa Cruz de Mudela clays used for building ceramics. *Applied Clay Science*, 102, 261-267. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.10.009>
- Ingram, K. D., y Daugherty, K. E. (1992). Limestone additions to portland cement: uptake, chemistry, and effects. *Int. Congr. Chem. Cem.*, 9 th, III, 160.
- Isa, N. F., Muhammad, K., Yahya, N., Ahmad, M. M., Manaf, A., Hisyam, M. B., ... y Naspu, A. (2016). Dolomite quarry waste as sand replacement in sand brick. *Materials Science Forum*, 857, 319-322. Trans Tech Publications. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.857.319>
- Li, Y., Du, X. L., y Huo, D. (2007). Utilization of limestone as mineral admixture in cement and concrete. *Journal of Wuhan University of Technology*, 3, 010.
- Loayza Goicochea, P. (2014). Efecto de la ceniza de cáscara de arroz sobre la resistencia a la compresión del concreto normal.
- Mangin, N. M. (2015). *Utilización de agregados calcáreos de la Provincia de Córdoba para el desarrollo de hormigones con cemento portland blanco*. (Tesis de maestría). Recuperado de <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/2072>
- Martin, J. F. M. (2005). *Aditivos para concreto. Concreto. Ensino. Pesquisa e Realizações*. São Paulo, Brasil: Ibracon.

- Mattey Centeno, P., Robayo Salazar, R., Silva Urrego, Y., Álvarez Jaramillo, N., & Delvasto Arjona, S. (2014). Caracterización física y mecánica de agregados reciclados obtenidos a partir de escombros de la construcción. *Informador Técnico*, 78(2), 121-127. doi: <https://doi.org/10.23850/22565035.95>
- Mattey Centeno, P., Robayo Salazar, R., Torres Rico, J., Ramos Barragán, P., y Delvasto Arjona, S. (2015). Evaluación de las propiedades mecánicas de paneles de ferrocemento con agregado fino reciclado. *Informador Técnico*, 79(2), 146-155. doi: <https://doi.org/10.23850/22565035.159>
- Mikhailova, O., Yakovlev, G., Maeva, I., y Senkov, S. (2013). Effect of dolomite limestone powder on the compressive strength of concrete. *Procedia Engineering*, 57, 775-780. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.098>
- Milanesi, C. A., Perrone, F. H., Pappalardi, M., Violini, D., Zerbino, R., y Giaccio, G. (2010). Aprovechamiento de agregados de origen dolomítico en hormigones para pavimentos. *Cementos Avellaneda*. Recuperado de <http://www.cavellaneda.com.ar/publicaciones-detalle.php?id=8>
- Monsalve, I. V., Boláños, I. H., Lopez, P. F., y Toro, E. F. (2014). Teja tipo sándwich de cemento basados en subproductos industriales para el mejoramiento de la comodidad térmica. *Revista Colombiana de Materiales*, (5), 332-337
- Niesyt, M., y Psiuk, B. (2017). Fused dolomite-magnesia co-clinker for fired dolomite refractories. *Ceramics International*, 43(1), 51-59. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.08.150>
- Ordóñez, N., y Bahamón, W. (2010). La agrominería como motor del Huila para Colombia. *Programa de productividad y competitividad para el Huila. Informe técnico y de gestión 2010*.
- Pappu, A., Saxena, M., y Asolekar, S. R. (2007). Solid wastes generation in India and their recycling potential in building materials. *Building and Environment*, 42(6), 2311-2320. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.04.015>
- Piechówka-Mielnik, M., y Giergiczny, Z. (2011). Properties of Portland-composite cement with limestone. *Cementing a sustainable future. XIII ICCI International Congress on the Chemistry of Cement*, Madrid (3-8).
- Rabah, M., y Ewais, E. M. M. (2009). Multi-impregnating pitch-bonded Egyptian dolomite refractory brick for application in ladle furnaces. *Ceramics International*, 35(2), 813-819. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2008.02.017>
- Robayo-Salazar, R. A., Mejía de Gutiérrez, R., y Mulford-Carvajal, A. J. (2016). Producción de elementos constructivos a partir de residuos de ladrillo activados alcalinamente. *Facultad de Ingeniería*, 25(43).
- Robayo, R., Mattey, P. y Delvasto, S. (2013). Comportamiento mecánico de un concreto fluido adicionado con ceniza de cascarilla de arroz (CCA) y reforzado con fibras de acero. *Revista de la Construcción*, 12(2), 139-151. doi: <https://doi.org/10.4067/S0718-915X2013000200011>
- Rocha, J. C., Da Luz, C. A., y Cheriaf, M. (2002). Effects Of Dolomite Aggregate On The Deterioration Of Concrete Floor. *9th International Conference on Durability of Materials and Components*. Rotterdam, Netherlands.
- Romero, A. A., Flores, S. L., y Arévalo, W. (2010). Tratamiento de efluentes de la industria minera con dolomita. *Industrial Data*, 13(1), 85. doi: <https://doi.org/10.15381/idata.v13i1.6174>
- Saboya, F., Xavier, G. C., y Alexandre, J. (2007). The use of the powder marble by-product to enhance the properties of brick ceramic. *Construction and Building Materials*, 21(10), 1950-1960. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.029>
- Sadek, D. M. (2012). Physico-mechanical properties of solid cement bricks containing recycled aggregates. *Journal of Advanced Research*, 3(3), 253-260. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jare.2011.08.001>

- Sadek, D. M., El-Attar, M. M., y Ali, H. A. (2016). Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 121, 19-32. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.044>
- Sadik, C., Moudden, O., El Bouari, A., y El Amrani, I. E. (2016). Review on the elaboration and characterization of ceramics refractories based on magnesite and dolomite. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 4(3), 219-233. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jascer.2016.06.006>
- Serrano Guzmán, M. F., Pérez Ruiz, D. D., Torrado Gómez, L. M., y Hernández, N. D. (2017). Residuos inertes para la preparación de ladrillos con material reciclable: una práctica para protección del ambiente. *Industrial Data*, 20(1).
- Smith, M. R. (1999). *Stone: building stone, rock fill and stone in construction*. Nottingham, Londres: The Geological Society.
- Sorvari, J., y Wahlström, M. (2014). Industrial By-products. En E. Worrell y M. Reuter, *Handbook of Recycling: State-of-the-art for Practitioners, Analysts, and Scientists* (1st ed., pp. 231-253). Amsterdam: Elsevier.
- Souza, E., y Calo, D. (2008, November). Influencia de las características del agregado en el comportamiento del pavimento de hormigón. In *Primer Congreso Argentino de Áridos*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Ciudad del Mar del Plata, Plata.
- Sutcu, M., Alptekin, H., Erdogmus, E., Er, Y., y Gencel, O. (2015). Characteristics of fired clay bricks with waste marble powder addition as building materials. *Construction and Building Materials*, 82, 1-8. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.055>
- Swart, C. J. U., y van Schalkwyk, A. (2001). Subsurface grout barriers for ground stabilization in dolomite areas near Carletonville, South Africa. *Environmental Geology*, 40(4), 592-601. doi: <https://doi.org/10.1007/s002540000222>
- Sybilski, D., Bankowski, W., y Krajewski, M. (2010). High modulus asphalt concrete with limestone aggregate. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 3(2), 96.
- Tsivilis, S., Batis, G., Chaniotakis, E., Grigoriadis, G., y Theodossis, D. (2000). Properties and behavior of limestone cement concrete and mortar. *Cement and Concrete Research*, 30(10), 1679-1683. doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00372-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00372-0)
- Vargas, R. (2005). Yacimientos minerales del departamento del Huila. Universidad Surcolombiana. Facultad de Ingeniería. Recuperado de <http://ingenieria.usco.edu.co/museo/images/GeoEconomicaHuila.pdf>
- Vegas, I., Gaitero, J. J., Urreta, J., García, R., y Frías, M. (2014). Aging and durability of ternary cements containing fly ash and activated paper sludge. *Construction and Building Materials*, 52, 253-260. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.070>
- Villaquirán, M. A., Rodríguez, E., y de Gutiérrez, R. M. (2014). Evaluación térmica de sistemas geopoliméricos basados en metacaolín con incorporación de humo de sílice y ceniza de cascarilla de arroz. *Informador Técnico*, 78(1), 6-11. doi: <https://doi.org/10.23850/22565035.64>
- Warren, J. (2000). Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations. *Earth-Science Reviews*, 52(1), 1-81. doi: [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(00\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00022-2)
- Wiemes, L., Pawlowsky, U., y Mymrin, V. (2017). Incorporation of industrial wastes as raw materials in brick's formulation. *Journal of Cleaner Production*, 142, 69-77. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.174>