

Physical-chemical and Thermal Characterization of Lime Waste Powder from Limestone Processing

Rodrigo Salgado, PhD¹, Carlos Cohen, MSc¹, Paola Peralta, Ing¹, Cesar Ramos, Ing¹

¹Corporación Universitaria del Caribe – CECAR, Colombia, rodrigo.salgado@cecar.edu.co, carlos.cohen@cecar.edu.co, paola.peralta@cecar.edu.co, cesar.ramos@cecar.edu.co

Abstract— Many companies, especially those related to the construction industry, are making efforts aimed to produce new waste-derived materials. Chemical and thermal characterization of lime powder, a solid waste derived from limestone processing, was carried out. This thermally stable material is composed of CaO, SiO₂, Al₂O₃ and Fe₂O₃, which makes it suitable for use in the production of clinker and as an additive to Portland cement.

Keywords— chemical composition., sieve analysis., lime powder.

Digital Object Identifier (DOI):<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2018.1.1.101>

ISBN: 978-0-9993443-1-6

ISSN: 2414-6390

Caracterización Química y Térmica del Residuo Sólido Denominado Polvillo, Generado en el Proceso de Obtención de Cal a Partir de Piedra Caliza

Physical-chemical and Thermal Characterization of Lime Waste Powder from Limestone Processing

Rodrigo Salgado, PhD¹, Carlos Cohen, MSc¹, Paola Peralta, Ing¹, Cesar Ramos, Ing¹

¹Corporación Universitaria del Caribe – CECAR, Colombia, rodrigo.salgado@cecar.edu.co, carlos.cohen@cecar.edu.co, paola.peralta@cecar.edu.co, cesar.ramos@cecar.edu.co

Resumen- En la actualidad, debido al incremento exponencial en los niveles de contaminación ambiental, la mayoría de los países realizan esfuerzos que conduzcan hacia la producción de nuevos materiales a partir de los desechos de sus procesos industriales, que minimicen el consumo de recursos naturales y a su vez los residuos generados. Dentro de estas se encuentran las industrias mineras y las industrias de la construcción, convirtiéndose en grandes responsables de la acumulación de residuos. Lo antes mencionado ha llevado a que se preste mucha importancia en buscar aplicabilidad a los residuos que generan todos los procesos manufactureros, y de esto se ha derivado el objetivo de este estudio el cual fue caracterizar físico, química y térmicamente el residuo sólido denominado Polvillo generado en el proceso de obtención de cal a partir de piedra caliza en las canteras de la vereda La Oscurana del municipio de Tolú Viejo, en el departamento de Sucre – Colombia, para dar a conocer sus capacidades de uso industrial en el campo de la construcción. Se determinó que este material está compuesto químicamente por óxido de calcio (CaO), dióxido de silicio (SiO₂), óxido de aluminio (Al₂O₃) y óxido de hierro (Fe₂O₃), por lo cual podría ser utilizado en los procesos de producción de Clinker y como aditivo al cemento Portland, su análisis granulométrico lo clasifica como un agregado fino que hace parte de las puzolanas naturales y es un material térmicamente estable, cuya introducción en los procesos mencionados podría conducir a una reducción de los costos de producción, las emisiones de CO₂ y por ende los daños al ambiente.

Palabras clave: Composición Química, Análisis Granulométrico, Polvillo, Medio Ambiente.

Abstract- Due to the increasing environmental pollution, many countries are making efforts to produce new materials from industrial process waste that could help reduce the consumption of natural resources and waste generation. This initiative has been driven by mining and construction industry, which are responsible for much of waste accumulation. This problem resulted in the search for solutions for waste associated with manufacturing processes. Therefore, the purpose of this study was to carry out the chemical, physical and thermal characterization of lime powder resulting from limestone processing and determine its potential for use in the construction industry. The study took place in the quarries of the municipality of Tolu Viejo, Colombia. This material is mainly composed of calcium oxide (CaO), silicon dioxide (SiO₂),

aluminum oxide (Al₂O₃) and iron oxide (Fe₂O₃), which makes it suitable for use in the production of clinker and as an additive to Portland cement. Sieve analysis suggests that this thermally stable material can be classified as a fine aggregate associated with natural pozzolans, that could help reduce production costs, carbon footprint and consequently environmental damage.

Keywords: chemical composition, sieve analysis, lime powder, environment.

I. INTRODUCCIÓN

En los comienzos de la industrialización los residuos generados en los diferentes procesos manufactureros se depositaban o arrojaban en los mares, ríos, u otro lugar cercano a las industrias, sin tener en cuenta las grandes repercusiones generadas al medio ambiente. Una de estas industrias es la de la construcción siendo uno de los materiales principales utilizados en esta, el cemento Portland.

A nivel mundial, el concreto es el material más utilizado en la construcción, y a menos que haya una revolución en los materiales de construcción, seguirá siéndolo; gran parte de la infraestructura de los países está elaborada con él, por lo que su conocimiento y tecnología son básicos para el ingeniero civil encargado de alguna etapa del proceso constructivo [1], siendo las regiones de Asia, África y la Comunidad de Estados Independientes (CEI) las responsables del 85% de la producción de cemento durante el 2015 [2]

La producción de cemento Portland requiere de altas temperaturas, consumo de energía, así como la utilización de combustibles fósiles y mucho consumo de recursos naturales, lo que afecta un desarrollo sostenible de esta industria, por lo tanto, este proceso de elaboración de cemento se considera muy contaminante [3,4].

Con vistas a disminuir el impacto ambiental, se han propuestos dos rutas alternativas de trabajo: La primera consiste en realizar mejoras en cuanto a la eficiencia de los

procesos de producción en planta, que conlleven a la disminución del consumo energético y la segunda encaminada hacia la disminución de consumo de cemento mediante la inclusión de adiciones que sustituyan parcialmente este material por otros de menor impacto [5,6].

La situación anterior ha llevado a la empresa y la comunidad científica a usar otros productos que consumen menos fuentes energéticas y a incorporar materiales de forma tal que al mezclarlos puedan servir de aditivos al cemento, razón por la cual diversos tipos de materiales como lo son cenizas volantes, la cal hidratada, derivados de la caliza, escoria siderúrgica, entre otros han sido mezclados con cemento analizando sus características de tal forma que pueda encontrarse un aditivo que tenga impactos positivos técnica, ecológica y económicamente en la industria de la construcción y afines, generando lo que se conoce como cementos mezclados [5-7].

La caliza como aditivo del cemento parece tener poco efecto sobre su rendimiento macroscópico en el corto y largo plazo, mientras que en sus propiedades mecánicas (fuerza – compresión) diversos estudios han mostrado que son más o menos las mismas. Este efecto suele atribuirse a la distribución del tamaño de la piedra caliza, el cual potencializa la hidratación del Clinker por el efecto de relleno, la flexión, la resistencia y la contracción por secado. El crecimiento constante del uso del cemento Portland-caliza se debe principalmente a que se consumen menores cantidades de materias primas naturales, hay un ahorro significativo del combustible utilizado para la producción de Clinker y reducción de las emisiones de CO₂ liberadas a la atmosfera [8].

Varios estudios realizados sobre las propiedades del cemento Portland-caliza han determinado que el rendimiento del hormigón se ve afectado por la calidad de la piedra caliza utilizada en la adición [9], por tanto, la comparación entre los resultados de los diferentes estudios suele ser bastante difícil. Sin embargo, algunas características como la resistencia a la compresión y durabilidad pueden compararse. Varios autores afirman que la resistencia a la compresión no se ve afectada por el reemplazo de piedra caliza hasta el 15% de la masa total de aglutinante [10], mientras que cuando el porcentaje de piedra caliza aumenta, la resistencia se reduce en comparación con el hormigón de cemento Portland tradicional, es decir, la caliza se comporta algo como una adición inerte [10].

Según algunos autores cuando al cemento se adiciona piedra caliza entre un 5 – 20% se mejora el embalaje y cohesión de las partículas del aglutinante, así como mejora la tasa de hidratación del cemento [11-13].

En cuanto a la resistencia a la carbonatación, varios autores afirman que el uso de hormigón cemento Portland - caliza, en comparación con hormigón de cemento Portland ordinario, conduce a un aumento de la tasa de carbonatación del hormigón comparándolos a la misma proporción agua / aglutinante, por el contrario, en el 2007, Dhir [10], aseguró que incluso el reemplazo de cemento Portland con hasta un 35% de piedra caliza parece no conducir a una disminución de la resistencia a la carbonatación.

Los antecedentes hasta aquí descritos han ocasionado que se preste una mayor importancia hacia la generación de aplicabilidad de los residuos obtenidos en la industria de la construcción, principalmente a aquellos que se producen al obtener materias primas necesarias para producir cemento, partiendo de este hecho se realizó el estudio de las características físicas, químicas y el comportamiento térmico del residuo sólido denominado Polvillo generado en el proceso de obtención de cal a partir de piedra caliza en las canteras de la vereda La Oscurana del municipio de Tolú Viejo del Departamento de Sucre - Colombia para dar a conocer sus capacidades de uso industrial en el campo de la construcción, en aplicaciones tales como aditivo para el cemento Portland.

II. METODOLOGÍA PARA CARACTERIZAR FÍSICA, QUÍMICA Y TÉRMICA DEL RESIDUO SÓLIDO GENERADO EN EL PROCESO DE OBTENCIÓN DE CAL A PARTIR DE LA PIEDRA CALIZA

A continuación, se describen las fases de trabajo que se plantearon para la caracterización del material a estudiar:

Fase 1: Determinación de la composición química y las características del residuo sólido denominado Polvillo generados en el proceso de obtención de cal a partir de piedra caliza.

Fase 2: Caracterización térmica del material para examinar su comportamiento en función de esta variable.

Fase 3: Evaluar los resultados de los diferentes estudios para definir la posible aplicabilidad industrial de este residuo sólido.

A. Técnicas experimentales de análisis.

Espectroscopia de absorción atómica (atomización con llama), Gravimetría, Digestión ácida, Granulometría laser, Termogravimetría (TG), Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).

III. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al realizar los tratamientos experimentales.

A. Análisis químico.

El análisis químico permitió establecer la siguiente composición porcentual de elementos y compuestos que componen el Polvillo en estudio.

TABLA I.
COMPOSICIÓN PORCENTUAL DE ELEMENTOS Y COMPUESTOS QUE
COMPONEN EL POLVILLO

Determinación	Resultado	Método
Ca (%m/m)	1,39; CV=0,3; n=2.	NTC 4717
Fe (%m/m)	0,45; CV=1,4; n=2.	NTC 4717
Si (mg/Kg)	7,74; CV=4,5; n=2.	NTC 4717
Al (mg/Kg)	670,93; CV=0,8; n=2.	NTC 4717
CaO (%m/m)	1,95	NTC 4717
Fe ₂ O ₃ (%m/m)	0,64	NTC 4717
SiO ₂ (%m/m)	0,166	NTC 4717
Al ₂ O ₃ (%m/m)	0,127	NTC 4717

Utilizando los datos de la composición química y por medio de las siguientes ecuaciones se calcularon, los índices o módulos del Polvillo

- (1) $SC = CaO / 2,8SiO_2 + 1,1Al_2O_3 + 0,7Fe_2O_3$
- (2) $MH = \%CaO / \%SiO_2 + \%Fe_2O_3 + \%Al_2O_3$
- (3) $MS = \%SiO_2 / \%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3$
- (4) $MF = \%Al_2O_3 / \%Fe_2O_3$

TABLA II.
ÍNDICES O MÓDULOS DEL POLVILLO

Óxidos	Valor	Modulo	Resultado	Valor optimo
CaO (%m/m)	1,95	Estándar de cal o factores de saturación de cal. (SC).	1,85	0,8 -0,95
Fe ₂ O ₃ (%m/m)	0,64	Módulo Hidráulico. (MH)	2,09	1,7 – 2,4
SiO ₂ (%m/m)	0,166	Módulo de Silicatos. (MS)	0,22	1,8 – 3,2
Al ₂ O ₃ (%m/m)	0,127	Módulo de Fundentes. (MF)	0,20	1,5 – 2,5

B. Distribución del tamaño de partícula.

En la fig. 1 se resumen algunas características del material estudiado, en ella se observa la distribución porcentual de tamaño de partícula de una muestra de Polvillo.

C. Caracterización térmica del material

Esta se realizó mediante calorimetría diferencial de barrido y termogravimetría, los resultados obtenidos se presentan en las fig. 2 y 3.

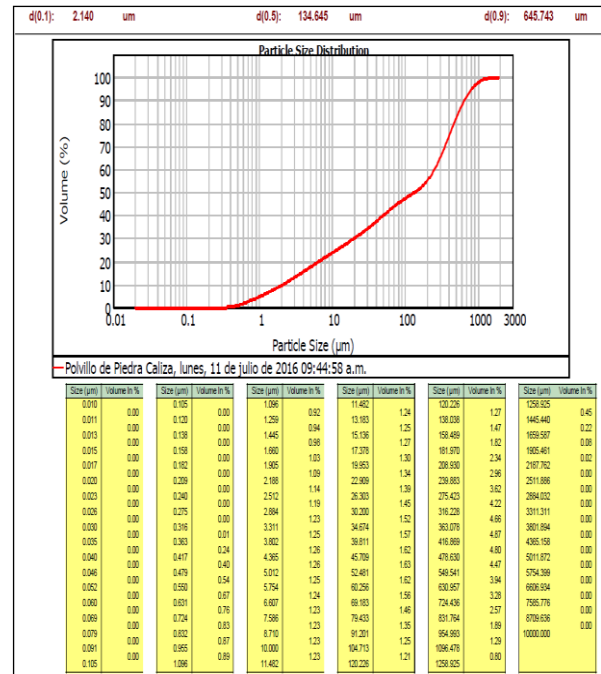


Fig.1 Distribución porcentual del tamaño de la partícula de Polvillo.

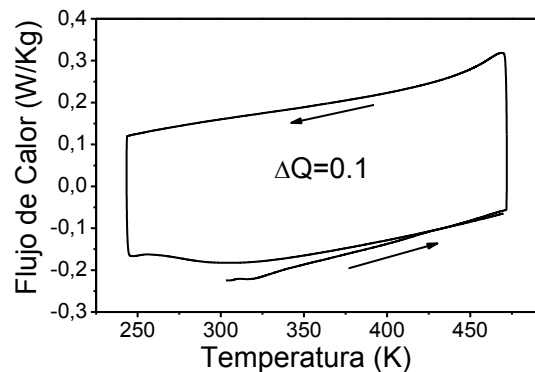


Fig. 2 Flujo de calor en la muestra a distintas temperaturas (DSC).

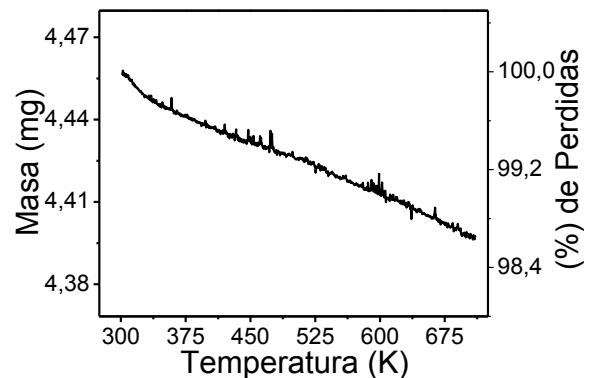


Fig. 3 Variación de la masa de la muestra con la temperatura (TG)

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se analizan los resultados obtenidos en cada una de las fases del trabajo realizado.

A. Análisis químico.

En cuanto a la composición química del Polvillo este presenta Calcio (Ca), Silicio (Si), Aluminio (Al), Hierro (Fe) y los respectivos óxidos de estos minerales, óxido de calcio (CaO), dióxido de silicio (SiO₂), óxido de aluminio (Al₂O₃) y óxido de hierro (Fe₂O₃), con la cual es posible obtener un material que por su composición química podría ser utilizado en la producción de Clinker y de cemento Portland [14], debido a que la cal (CaO) se combina con el SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ para formar los cuatro minerales principales que conforman el Clinker C₃S, C₂S, C₃A y C₄AF [15].

Para la fabricación de Clinker los elementos pueden provenir de diferentes fuentes, como, por ejemplo: la Caliza aporta el CaO, la Arcilla aporta SiO₂ y el Al₂O₃, la pirita o hematita aporta el Fe₂O₃, etc., teniendo que proceder a mezclarlos previamente [15]. Se destaca aquí el hecho principal de que el polvillo posea estos óxidos en su composición con lo que no se necesitaría de otras fuentes aportantes de estos óxidos, convirtiéndolo en un material promisorio en la elaboración de Clinker y cemento y que puede minimizar los gastos de energía, producción de CO₂ y menores extracciones de materiales en las canteras, al utilizar un subproducto de la explotación de caliza.

Por otra parte, esta composición química del Polvillo lo ubica dentro de la clasificación de puzolana natural, que hace referencia a su origen volcánico o rocas sedimentarias de composición silíceas o sílico-aluminosas o combinación de ambas, que finamente molidos y en presencia de agua reaccionan para formar compuestos de silicato de calcio y aluminato de calcio capaces de desarrollar resistencia [16]. Por tanto, este Polvillo podría ser utilizado como aditivo en la fabricación de cemento o Clinker.

B. Criterios específicos para la fabricación de Clinker y cemento.

La caracterización química del Polvillo también puede ser comparada con las que permiten establecer la relación óptima de las mezclas de los componentes que favorecen las adecuadas características de fabricación del cemento y que se representan por sus cuatro óxidos principales y se denominan índices o módulos [17].

- ✓ Estándar de cal o factores de saturación de cal(SC).
- ✓ Módulo Hidráulico (MH).
- ✓ Módulo de Silicatos (MS).
- ✓ Módulo de Fundentes(MF).

Los valores obtenidos en estos módulos para el Polvillo corresponden a las aplicaciones de las siguientes expresiones matemáticas 1 a 4 descritas en el apartado de resultados.

TABLA III.
VALORES MÓDULOS DEL "POLVILLO"

Módulo	Resultado	Valor óptimo
SC	1,85	0,8 -0,95
MH	2,09	1,7 – 2,4
MS	0,22	1,8 – 3,2
MF	0,20	1,5 – 2,5

El estándar de cal sobrepasa los valores óptimos, como consecuencia de ellos el cemento generado tiende a ser inestable en cuanto al volumen con lo que en este pueden formarse grietas, debido a una gran cantidad de calcio libre, también se obtienen cementos de alta resistencia y de lentos fraguados [18].

El valor obtenido del módulo hidráulico se encuentra dentro de los límites recomendados debido a que para valores superiores a este intervalo el aglomerante no presentara estabilidad con relación a su volumen, disminuye la resistencia química y aumenta el calor de hidratación; para valores inferiores al intervalo señalado, el aglomerante presentaría resistencia muy baja, razones por la que se presentaría agrietamiento por expansión [19, 20].

La evaluación del Módulo de Silicatos presenta valores muy inferiores a los del intervalo óptimo, el aumento por fuera de los límites establecidos causa mayor consumo energético, inestabilidad en cuanto al volumen y un fraguado y endurecimiento lento, a valores inferiores por fuera del rango se presenta características similares [21]; en el rango de valores óptimos se evitan estas características.

Para el módulo de fundentes se obtiene un valor inferior al óptimo, este valor no afecta las resistencias, cuando este valor es inferior a 1,38 el óxido de aluminio actúa como fundente, también se dará una alta adherencia y nodulización del Clinker [22]

Por lo que si se buscara reemplazar de forma total los materiales para la fabricación de Clinker o cemento se obtendría un material con las características descritas anteriormente de acuerdo con los valores obtenidos de SC, MH, MS, MF. Es así como el material estudiado no podría reemplazar totalmente las fuentes usadas para la fabricación de Clinker o cemento, pero si incluirse en el proceso de obtención como un aditivo debido a la composición química que presenta.

C. Distribución del tamaño de partícula.

La distribución del tamaño de partícula nos permite clasificar los agregados de materiales para construcción en agregados finos y gruesos. Los agregados finos tienen un tamaño partícula que van desde 5 mm hasta mayores de 60 μm ; los agregados gruesos son aquellos cuyas partículas son mayores a 5 mm y hasta 125 mm [23].

La tabla IV representan los percentiles de la distribución del tamaño de partícula de la muestra de Polvillo.

TABLA IV.

PERCENTILES DE DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS DEL POLVILLO

MUESTRA	d(0,1) μm	d(0,5) μm	d(0,9) μm	D[3,4] μm
Polvillo de Piedra Caliza	2,140	134,645	645,743	247,111

Percentil d (0,1): es el tamaño de partícula por debajo del cual queda el 10% de la muestra.

Percentil d (0,5): es el tamaño de partícula en el que el 50% de la muestra está por debajo y el 50% está por encima.

Percentil d (0,9): es el tamaño de partícula por debajo del cual queda el 90% de la muestra.

D [3,4]: Es el diámetro medio de la distribución, considerado en volumen.

De estos valores observamos que el 10% de las partículas de este material se encuentran por debajo de los 2,140 μm , lo cual es un valor menor al reportado para el cemento Portland, sin embargo el resto de los valores del tamaño de partícula es muy superior a los que se reportan para el cemento Portland en donde el 90% de las partículas del Polvillo presentan un valor inferior a 645,743 μm pero mayor 45,459 μm para el cemento [24].

Por otro lado, el valor correspondiente a 645,743 μm por debajo del cual se encuentra el 90% del material de la muestra y el diámetro medio de distribución correspondiente a un valor de 247,111 μm , permite clasificar a el Polvillo dentro del grupo de agregados finos [25].

Si comparamos el Polvillo con respecto a los agregados finos de la arena en donde se ha encontrado que la forma y la textura de las partículas podrían mejorar la resistencia del concreto ya que se logra una mejor interconexión entre partículas [26], el Polvillo podría generar propiedades similares al ser utilizado.

D. Caracterización térmica del material

El análisis térmico de las muestras se realizó mediante Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) y análisis Termogravímetro (TG) usando un DSCQ100 y un TGA2050 respectivamente; ambos de TA instrumentos.

Los resultados son presentados en las fig. 2 y 3, se pudo evidenciar un comportamiento sencillo donde no existe una variación considerable de las magnitudes estudiadas. En el caso de las medidas DSC se realiza un primer ciclo de calentamiento desde temperatura ambiente hasta 473K, posteriormente un proceso de enfriamiento hasta 243K y finalmente calentar desde este punto hasta 473K. De acuerdo con el análisis, la respuesta térmica del material en este rango de temperaturas no es considerablemente susceptible al flujo de calor; ya que no se presenta ningún cambio significativo relacionado con algún proceso térmico al interior de la muestra. El flujo de calor máximo aplicado es de 0.2W/Kg.

Un análisis en un rango de temperatura más amplio podría dar lugar a una variación del comportamiento térmico; sin embargo, la estabilidad de la muestra y las temperaturas de trabajo a las cuales se espera se encuentre sometida en una aplicación práctica hacen de momento innecesario ampliar la ventana térmica experimental del análisis.

Los resultados termogravimétricos se hallan en la misma línea de los obtenidos mediante DSC; en este caso el rango de temperaturas estudiado es más amplio, entre 300K y 713K, cubriendo las temperaturas ya analizadas mediante calorimetría diferencial de barrido. Los datos obtenidos muestran que en aproximadamente 400K el material pierde un 1.36% de su peso inicial; valor muy bajo para este rango de temperatura. La tendencia del comportamiento es descendiente de forma casi lineal, con una particular caída inicial la cual puede estar asociada a pérdida de agua superficial en la muestra. Las variaciones que se observan a lo largo de toda la gráfica son más resultado de ruido experimental que variaciones reales del comportamiento térmico y/o estructural de la muestra.

V. CONCLUSIÓN

El Polvillo presenta en su composición química óxido de calcio (CaO), dióxido de silicio (SiO₂), óxido de aluminio (Al₂O₃) y óxido de hierro (Fe₂O₃), lo que hace factible su utilización como aditivos en la fabricación de Clinker y cemento.

Desde el punto de vista tecnológico el utilizar este residuo en la fabricación de Clinker y cemento podría conducir a una reducción de los costos de producción, así como la disminución de emisiones de CO₂ producido en el proceso de explotación y fabricación de estos materiales de construcción y de los efectos ambientales producidos por acumulación de este

residuo, lo que podría brindarle un valor agregado a este material.

El análisis granulométrico permitió establecer que el Polvillo teniendo en cuenta el tamaño de partícula se ubica dentro del grupo de agregados finos.

El comportamiento térmico muestra un material estable en los rangos de temperatura experimentales, con lo que se demuestra que el material no sufre cambios en su composición estructural y que la variación de algunos valores corresponde a la eliminación de agua adquirida por humedad de la muestra.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Corporación Universitaria del Caribe (CECAR), por la financiación de este proyecto aprobado mediante convocatoria interna.

REFERENCIAS

- [1] O. Hernández-Castañeda and C. J. Mendoza-Escobedo, "Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico," *Ingeniería, investigación y tecnología*, vol. 7, no. 1, pp. 57-70, 2006.
- [2] R. Del Pilar Castrillon, A. J. González and E. Ciro Quispe, "Mejoramiento de la eficiencia energética en la industria del cemento por proceso húmedo a través de la implementación del sistema de gestión integral de la energía," *Dyna [En Línea]* 2013, 80 (Febrero) : [Fecha De Consulta: 29 De Enero De 2018] Disponible En:<[Http://www.Redalyc.Org/Articulo.Oa?id=49625661015](http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49625661015)> Issn 0012-7353
- [3] P. Mercader-Moyano, M. Marrero, J. Solís-Guzmán, M. V. Montes Delgado and A. Ramírez de Arellano Agudo, "quantification of material resources consumed during concrete slab construction," *Informes De La Construcción*, vol. 62, no. 517, pp. 125-132, 2010.
- [4] B. Uzal and L. Turanlı, "Studies on blended cements containing a high volume of natural pozzolans," *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, no. 11, pp. 1777-1781, 2003.
- [5] S. Izquierdo, J. Díaz, R. Mejía, J. Torres and U. Valle, "Cemento adicionado con un residuo del proceso de craqueo catalítico (FCC): hidratación y microestructura," *Ingeniería de Construcción*, vol. 28, pp. 141-154, 2013.
- [6] A. Johnson, L. Catalan and S. D. Kinrade, "Characterization and evaluation of fly-ash from co-combustion of lignite and wood pellets for use as cement admixture," *Fuel*, vol. 89, no. 10, pp. 3042-3050, 2010.
- [7] F. Lollini, E. Redaelli, and L. Bertolini, "Effects of Portland cement replacement with limestone on the properties of hardened concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 46, pp. 32-40, 2014.
- [8] A. Kumar, T. Oey, S. Kim, D. Thomas, S. Badran and J. Li, "Simple methods to estimate the influence of limestone fillers on reaction and property evolution in cementitious materials," *Cement Concr Comp*, vol. 42, pp. 20-29, 2013.
- [9] R. K. Dhir, M. C. Limbachiya, M. J. McCarthy and A. Chaipanich. "Evaluation of Portland limestone cements for use in concrete construction," *Mater Struct*, vol. 40, pp. 459-473, 2007.
- [10] J. E. Díaz, S. R. Izquierdo, R. Mejía de Gutiérrez and M. Gordillo S, "Mezcla ternaria de cemento Portland, escoria de alto horno y piedra caliza: Resistencia mecánica y durabilidad," *Revista de la construcción*, vol. 12, no. 3, pp. 53-60, 2013.
- [11] A. Otero, B. Ramirez, M. Bukasa and A. Seke, "Efecto de la adición de caliza a clínquer Portland angolano en el comportamiento mecánico de morteros/effect of limestone addition to Portland angolan clinkers in the mechanical behavior of mortars," *Holos*, vol. 32, no. 8, pp. 60-69, 2016.
- [12] J. I. Tobón and R. Kazes Gómez, "Behavior of Portland cement blended with limestones of different purity degrees. Desempeño Del Cemento Pórtland Adicionado Con Calizas de Diferentes Grados de Pureza," vol. 75, no. 156, pp. 177-184, 2008.
- [13] V. Bonavetti and V. Rahhal, "Interacción de adiciones minerales en pastas de cemento," *Revista de la Construcción*, vol. 5, no. 2, pp. 33-41, 2006.
- [14] R. Gilvonio Alegría and F. Domínguez Linares, "Ahorro de energía en el proceso de fabricación de clínker de cemento empleando mineral fluorita, (CaF₂)," *Revista de la Sociedad Química del Perú*, vol. 75, no. 3, pp. 303-309, 2009.
- [15] J. D. Sota and M. F. Barreda, "Hormigones de cemento Portland con arenas de fundición. Concretes of Portland Cement with Foundry Sands," *Cemento Hormigón* vol. 78, no. 900, pp. 46-55, 2007.
- [16] O. Restrepo Baena and J. Tobón, "Efectos de algunas adiciones minerales colombianas en la fabricación del clínker para cemento pórtland I," *Dyna*, vol. 74, no. 152, pp. 263-274, 2007.
- [17] A. Carvajal, C. Silva, J. Valiente and A. Venegas, "Efectos de la Carbonatación Acelerada en Distintos Tipos de Cemento y Hormigones," *Revista de la Construcción*, vol. 6, no. 1, pp. 88-97, 2007.
- [18] H. Su, N. Zhang and H. Li, "Concrete piezoceramic smart module pairs-based damage diagnosis of hydraulic structure," *Composite Structures*, vol. 183, no. 1, pp. 582-593, 2018.
- [19] K. Dvořák, K. Kulísek and D. Gazdič, "The FBC Ash as a Hydraulic Ingredient of Hydraulic Lime," *Procedia Engineering*, vol. 172, pp. 264-269, 2017.
- [20] H. F. Jiménez, "Obtención de concreto de alta resistencia mediante adición en el diseño de un superplastificante y ceniza de cascarilla de arroz," Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador, 2001.
- [21] S. H. Moreno, "Diseño sustentable de materiales de construcción; caso del concreto de matriz de cemento Pórtland," *Ciencia Ergo-Sum*, vol. 15no. 3, pp. 306-310, 2008.
- [22] A) A. Neville, "Tecnología del Concreto," 1ª edición. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C., México, D.F., pp. 185-200. (1999); B) A. Neville and J. Brooks, "Tecnología del Concreto," 1ª edición. Editorial Trillas, México, D.F., pp. 81-90, 1998.
- [23] D. Burgos Galindo, L. Cardona, M. Gordillo Suárez, S. Delvasto Arjona, "Valoración y efectos puzolánicos del material volcánico del puracé," *Revista EIA*, vol. 12, no. 23, pp. 83-93, 2015.
- [24] ICONTEC, "Norma técnica colombiana, concretos. especificaciones de los agregados para concreto," pp 5, 2000.
- [25] D. D. Cortes, H. K. Kim, A. M. Palomino and J. C. Santamarina, "Rheological and mechanical properties of mortars prepared with natural and manufactured sand," *Cement and Concrete Research*, vol. 38, no. 10, pp. 1142-1147, 2008.
- [26] CEMBUREAU, "Cement and Concrete Industry: Multiplier Effect on the Economy and their Contribution to a Low Carbon Economy," pp. 1 - 60, 2015.