

Desarrollo y producción industrial de un cemento de bajo carbono en Cuba

Autor principal

José Fernando Martirena Hernández¹.

Otros autores

Adrian Alujas Díaz², Leng M. Vizcaino Andrés², Sofía Sánchez Berriel², Ernesto Díaz Caballero³, Abdel Pérez Hernández³, Roger Almenares Reyes⁴, Karen Scrivener⁵, Mathieu Antoni⁵, Guillaume Habert⁶, Aurelie Favier⁵.

Colaboradores

Dr. Sergio Betancourt Rodríguez², Ing. Dayran Rocha Francisco², Dra. Grisel Barrios Castillo², Dr. Inocencio Raul Sánchez Machado², Mr. Sc. Yudiesky Cancio Díaz², Ing. Florencio Arcial Carratalá⁷, Ing. Salvador Damas⁸, Ing. Eduardo Vázquez⁸, Ing. Saúl M. Rodríguez Pérez⁸, Ing. Nestor Ramos Ledesma⁹, Ing. José Artilés Álvarez¹⁰, Dr. Carlos Leyva Rodríguez⁴.

Entidad ejecutora principal

¹Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM). Facultad de Construcciones. Universidad Central de las Villas (UCLV).

Entidades participantes

²Universidad Central de las Villas.

³Centro de Investigación y Desarrollo de la Construcción. Ministerio de la Construcción.

⁴Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

⁵Universidad Politécnica Lausana, Suiza.

⁶Universidad Politécnica de Zúrich, Suiza.

⁷Empresa Geominera del Centro.

⁸Fábrica de cemento "Siguaney".

⁹Grupo Empresarial del Cemento, GECEM.

¹⁰Empresa Constructora de Obras del Turismo, ECOT.

Autor para correspondencia

Dr. Cs. José Fernando Martirena Hernández.

Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM). Facultad de Construcciones. Universidad Central de las Villas (UCLV).

Carretera de Camajuani km 5, Santa Clara. Villa Clara. Cuba CP 54830.

Telf.: 042 205872 ext 102

Móvil: 5 263 7716

e-mail: F.Martirena@enet.cu

Resumen

El presente resultado tiene como antecedente el trabajo “Activación de Arcillas de Bajo Grado para la producción y Uso de Puzolanas como Sustitutos de Clinquer en Sistemas Cementicios Ternarios Clinquer-Metakaolin-Carbonato”, que recibió el Premio de la ACC en el 2012. La novedad del presente trabajo en relación al premiado consiste en la implementación del nuevo sistema cementicio premiado en el 2012 en la formulación, evaluación, producción industrial y uso de un nuevo cemento, conocido como el “cemento de bajo carbono” (LC3). Este cemento alcanza propiedades similares a los cementos de uso general, en el caso de Cuba el P35, pero con un contenido de clinquer de 50%, con reducciones de más de un 25-35%.

Los cambios en la economía cubana provocarán un incremento significativo de la demanda de cemento en el corto plazo (período 2016-2020). La capacidad productiva actual de la industria de cemento no puede abastecer esa demanda en el corto plazo. Esto producirá un déficit de cemento estimado entre 0.5-1 MM toneladas anuales, que de no existir alternativas tendrá que ser importado a altos costos. La introducción del cemento LC3 podría contribuir a aumentar la capacidad de producción de cemento en el país en un 17-45% en el corto plazo, con inversiones pequeñas de ciclo corto, a partir de emplear los niveles actuales de producción de clinquer que tiene la industria. Por esta vía podría mitigarse el déficit que se creará, y consecuentemente evitar las importaciones, y brindar un espacio de tiempo para concretar las inversiones en camino.

El presente trabajo va desde un estudio de las materias primas nacionales para la producción del cemento en la fábrica de cemento Siguaney, hasta la formulación del cemento y la realización de una prueba industrial que incluye la calcinación de arcilla del yacimiento de Pontezuela, anteriormente evaluado como bueno, y la molienda de 130 toneladas del cemento LC3, que alcanzó prestaciones similares al cemento P35 y en aplicaciones en hormigón demostró tener un comportamiento superior ante el ataque de agentes atmosféricos, en especial cloruros. El cemento producido fue usado con éxito en una variada gama de aplicaciones en el sector de la construcción. La novedad del enfoque está en el vínculo entre el estudio experimental a escala de laboratorio y la producción a escala industrial, incluida la optimización del proceso.

La evaluación ambiental demuestra que el nuevo cemento permite reducir las emisiones de CO₂ en un 25-35% en relación a los cementos producidos en Cuba. Los estudios económicos demuestran la posibilidad de modestos ahorros en relación al P35. La evaluación de la rentabilidad de un escenario productivo que incluya la producción del cemento LC3 es muy favorable.

Comunicación corta

Introducción

En el presente el sector del cemento tiene una capacidad productiva montada para la producción anual de 2.8 MMt de clínquer, de la que se reporta una utilización de cerca de un 40%. A pesar de los altos niveles de consumo, la mayoría del clínquer (se estima un 75% de la producción) se produce por vía seca. La producción reportada en el 2014 fue de 1.8 MMt. La demanda actual excede la producción, lo que indica la necesidad de inversiones en el sector para incrementar la capacidad productiva y su uso. La tecnología vieja no permite incrementar la utilización de la capacidad actual debido al estado de deterioro y los altos costos de mantenimientos de equipos y facilidades. Por lo tanto, las inversiones se presentan como la alternativa para poner al día la tecnología, pero la rentabilidad de la inversión debe ser demostrada.

Cifras oficiales presentan una demanda de 3.5 MM tpa en el 2019. La proyección de esta demanda en la fase pico (2016-2020) implicará crecimientos de 18% anual. Esto se vincula con un incremento de la actividad constructiva, característico de la nueva etapa en la que entra el país. En el corto plazo la demanda de cemento crece, y sería poco probable poner en explotación nuevas inversiones, ya que la construcción de una nueva planta puede llevar hasta cinco años.

Las opciones para dar solución a este problema son: (i) importar grandes cantidades de cemento cuando la demanda sobrepase la producción (estimados de 0.5-1 MM tpa en el período 2018-2020) a costos en el orden de los \$US 120/ton; (ii) maximizar la producción de cementos puzolánicos del tipo PP25 y PP35 usando puzolanas naturales, y (iii) Incrementar la producción de cementos puzolánicos hasta los niveles históricos máximos y complementar con la producción de cemento de bajo carbono, LC3. Este trabajo se concentra en la tercera opción, a partir de hacer propuestas concretas para la producción industrial del cemento de bajo carbono LC3, a partir de un programa coherente de evaluación de su introducción.

Contenido y alcance

El presente trabajo tiene el objetivo de hacer una propuesta completa para la introducción de un nuevo tipo de cemento, el cemento de bajo carbono, con un 50% de clínquer, que pueda permitir a la industria hacer un mejor uso de sus capacidades actuales de producción de clínquer y de esa forma poder abastecer la creciente demanda de cemento que se producirá en el período 2016-2020 en Cuba. El trabajo realiza una evaluación completa de las materias primas cubanas, incluyendo pruebas de calcinación y molienda a escala industrial, y hace una evaluación del nuevo cemento en condiciones industriales. Como complemento se hacen estudios de durabilidad y de impacto económico y ambiental de la introducción del cemento en Cuba.

Tareas científicas ejecutadas

- Evaluación de las condiciones de activación de la arcilla caolinítica del depósito de Pontezuela, Camagüey, y su posterior activación en una prueba industrial realizada a escala real en la fábrica de cemento de Siguaney.
- Formulación, evaluación y producción a escala industrial del cemento de bajo carbono LC3 con materias primas nacionales.
- Evaluación del cemento LC3 en la producción de forma experimental de diversos elementos de hormigón, en condiciones industriales.
- Evaluación preliminar de la durabilidad de hormigón producido con cemento LC3 en elementos expuestos a condiciones agresivas en un entorno real.
- Análisis de factibilidad económica e impacto ambiental de la producción del nuevo tipo de cemento en condiciones cubanas.

Breve descripción de los resultados obtenidos

La calcinación de la arcilla caolinitica de Pontezuela

Se trabajó con la arcilla del yacimiento de Pontezuela. Los estudios de laboratorio y en la etapa de escalado industrial del material empleado incluyeron: (i) caracterización química y mineralógica mediante técnicas de Fluorescencia de Rayos X (FRX), Difracción de Rayos X (DRX), Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) y Análisis Termogravimétrico (ATG). La caracterización morfológica fue realizada a través de la determinación de la distribución del tamaño de partículas (DTP) y la superficie específica; (ii) evaluación del potencial puzolánico de la arcilla del yacimiento de Pontezuela a escala de laboratorio a partir de un proceso de activación térmica por calcinación estacionaria.

Alrededor de 110 t de material arcilloso fueron calcinados en la fábrica de cemento Siguaney con el objetivo de realizar una prueba industrial de producción del cemento entre los meses de marzo y abril de 2013. El material arcilloso fue cargado al horno rotatorio y calentado hasta un rango de temperatura fijado entre los 750 – 800 °C. La alta puzolanidad del producto calcinado en el horno rotatorio es corroborada a través de los resultados de resistencia a la compresión de morteros normalizados de las diferentes pilas a 3, 7 y 28 días. De manera general, los ensayos de FRX, TG, DRX, resistencia a la compresión y calorimetría efectuados para la evaluación de la calidad del material calcinado en horno rotatorio en condiciones industriales avalan la reactividad puzolánica del producto y el éxito de la prueba piloto, por lo que todo el material fue considerado como apto para su uso como MCS para la producción de cementos mezclados.

Formulación del cemento de bajo carbono con materias primas nacionales

El trabajo experimental incluyó la formulación, producción y aplicación de cementos ternarios a partir del empleo de arcillas caoliníticas del depósito de Pontezuela. Se trabajó en las siguientes tareas: (i) Formulación a escala de laboratorio de las mezclas ternarias y optimización del contenido de sulfato; (ii) Análisis de la influencia de la finura de los componentes del cemento y los procedimientos de molienda en las propiedades del aglomerante; (iii) Realización de pruebas industriales de molienda (2013) y (2015). Evaluación de las propiedades de los cementos producidos; (iv) Utilización de los cementos producidos en la producción de hormigón.

La producción de cemento de forma industrial fue antecedida de pruebas de molienda para evaluar los parámetros óptimos de producción. Estas pruebas incluyeron la fabricación de los aglomerantes a escala de laboratorio para lo que se empleó el régimen de co-molienda, que es el método habitual usado en la producción industrial, además de la molienda separada y posterior mezclado de los componentes en al menos una serie de cemento. Los estudios incluyeron: (i) Influencia de la finura del material en la reactividad del sistema, medido a través del calor de hidratación, (ii) influencia de la finura del material en la resistencia a compresión medida en el ensayo de mortero normalizado, y (iii) influencia de la finura del material sobre la estructura de poros, a partir de usar el ensayo de Porosimetría por Intrusión de Mercurio (PIM).

Se organizó la producción industrial de un cemento con 50 % de clínquer, usando los materiales anteriormente estudiados. Esta prueba se realizó en dos etapas: (08-2013) Producción de 130 t de cemento ternario en la fábrica de cemento Siguaney, usando la arcilla calcinada en la prueba industrial, y (03-2015) Producción del mismo cemento, pero en condiciones controladas de molienda y dosificación en una planta semi-industrial en el Centro de Investigación y Desarrollo de la Construcción, CIDC, en el MICONS. Aproximadamente 130 toneladas de cemento fueron obtenidas a partir de la co-molienda de clínquer de cemento Portland, la mezcla arcilla calcinada – caliza y yeso. Se pudo comprobar que la mejora en la dosificación de las materias primas, en especial el yeso, así como el incremento de la finura de molido contribuyen significativamente a mejorar las propiedades de los cementos ternarios producidos. El cemento producido en el 2015 clasifica como un cemento P35, a pesar de tener solamente un 50% de clínquer.

La prueba piloto de producción de hormigón en condiciones industriales usando el cemento experimental fue concentrada en la producción de hormigones de 20, 25 y 30 MPa y bloques huecos de hormigón. Los bloques huecos de hormigón se produjeron en la UEB “Eladio Rodríguez”, utilizando el cemento producido en el 2013. Se produjeron elementos de prefabricado de gran formato de calidad 25 MPa, en la UEB “Remedios” con el cemento producido en el 2013, y similares elementos pero con calidad 30 MPa, en las instalaciones de la Empresa de Construcción de Obras del

Turismo, ECOT, utilizando el cemento producido en el 2015. En todos los casos los hormigones producidos cumplieron las especificaciones de resistencia a 7 y 28 días de edad. La mejora de la calidad del cemento LC3 implicó aumentos en la resistencia a compresión de los hormigones producidos con este cemento, que en todos los casos excedieron los valores de los de hormigones producidos con P35.

Evaluación de durabilidad de hormigones producidos con cemento LC3

Para poder comparar el cemento LC3 con los cementos tradicionales es necesario realizar pruebas de durabilidad en especímenes de hormigón producidos con los materiales en cuestión. Para este objetivo se decidió construir un sitio de exposición en condiciones reales, en el que especímenes de hormigón producidos con cemento LC3 y con cemento P35 fueron colocados desde principios de 2014 para que soporten las duras condiciones costeras en la zona. El programa de investigación considerado fue (i) Ensayo de carbonatación; (ii) Ensayo de migración de cloruros, y (iii) Medición de la permeabilidad de aire.

En el estudio de carbonatación los resultados evidencian un mejor comportamiento de las series producidas con el cemento LC3. Los valores más altos del factor de formación de las series estudiadas se corresponden con las matrices donde se produce la menor migración de iones, corresponden a las series producidas con el cemento de bajo carbono. Los resultados de permeabilidad indican un realce de la actividad puzolánica posterior a los 28 días y su efecto en el refinamiento de la estructura de poros de la matriz cementicia en el cemento LC3.

Evaluación ambiental de la producción de LC3 en Cuba

Las emisiones de CO₂ en la producción de cemento fueron calculadas dividiendo el proceso productivo en dos fases: (i) calcinación de clínquer y arcillas, y (ii) mezclado y molienda de clínquer y aditivos. El cemento de bajo carbono, producido en condiciones de ineficiencia, durante la prueba industrial, reduce aproximadamente 270 kgs CO₂/tonelada en relación al cemento P-35 y 150 kg CO₂/tonelada con relación al cemento mezclado tradicional (PP-25), ambos regularmente producidos en Siguaney. Esto demuestra la robustez del nuevo cemento ternario que, aún en las peores condiciones de producción, muestra importantes reducciones de las emisiones de CO₂ con respecto a los cementos que se producen tradicionalmente en Cuba.

Evaluación económica de la producción de LC3 en Cuba

Los costos de producción fueron calculados usando la metodología de referencia del Grupo Empresarial de Cemento, GECEM en Cuba. Los ahorros en costo en relación al cemento P35 están sobre el 15%, en dependencia de la distancia de la cantera de arcilla, del medio de transporte y del clínquer que se emplea. Estos son resultados preliminares aun, que están en vías de perfeccionamiento por la industria. A partir de 200 km, la producción de cemento LC3 deja de ser favorable comparada con el cemento P35, debido a los altos costos de transportación. Cuando se trabaja con el tren, esta distancia puede ser mucho mayor.

La rentabilidad de una inversión de capital en la industria fue a partir del método conocido como ROCE (*Return on Capital Employed*). La metodología ROCE se aplica a la industria de cemento cubana en el período 2016-2020, usando datos públicos e información brindada por la industria. En el caso cubano se acepta que el WACC es de 12%. Este valor es utilizado por el Ministerio de Finanzas y Precios y el Ministerio de Economía y Planificación.

El cálculo de ROCE evidencia la baja rentabilidad de la producción actual de cemento en Cuba, y que el hecho de maximizar la producción de cemento puzolánico no implica grandes mejoras en términos de rentabilidad. La introducción del cemento LC3, combinado con el incremento de la producción de cementos puzolánicos, trae algunas mejoras en el ROCE, aunque este está aún muy por debajo del WACC, indicando la baja rentabilidad en general de la producción de cemento. Esta tendencia es común en la industria de cemento en el mundo.

Novedad científica

Se ha demostrado de forma conclusiva, y con suficiente evidencia científica que:

- a) Es posible formular y producir a escala industrial un cemento de bajo carbono, con materias primas cubanas, que cumpla con los requerimientos de comportamiento mecánico y durabilidad exigidos por las normas, como una alternativa para poder cubrir el incremento de la demanda de cemento que se debe producir a corto plazo en Cuba. Este cemento ha sido aplicado de forma exitosa como cemento de uso general en la producción de una variada gama de productos de hormigón.
- b) La realización de la evaluación económica y ambiental del cemento de bajo carbono producido usando modernas herramientas de cálculo. El estudio prueba la reducción de las emisiones de Gases de Efecto de Invernadero en la producción de cemento superior al 30%. El cemento producido, con un 50% de clínquer, tiene un costo de producción ligeramente menor que el cemento P35, con 88% de clínquer, y permite una mayor rentabilidad de la inversión.

Impactos

Económico: La introducción del cemento LC3 en la producción nacional de cemento permite aumentar la producción de cemento entre un 17-45% en dependencia de la tecnología, para la disponibilidad actual de clínquer. Esto permite abastecer la creciente demanda de cemento en el corto plazo (2016-2020), y evitar la realización de importaciones para cubrir el déficit.

Social: el incremento de producción de cemento podrá consolidar el programa de producción y venta local de materiales del MICONS, a partir de incrementar las existencias de cemento en los mercados de venta de materiales de construcción del MINCIN.

Ambiental: la introducción de la producción del cemento LC3, unida a la maximización de la producción de cementos puzolánicos, permitiría a la industria de cemento cubana ampliar la reducción de emisiones de CO₂ de la industria a niveles superiores al 20-30% sin necesidad de realizar grandes inversiones.

Principales publicaciones que avalan este resultado

1. Antoni M., Rossen J., F. Martirena, Scrivener K. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. Cement and Concrete Research, 2012. 42(12): p. 1579-1589. **(WoS)**
2. Prachi Patel, Jose Fernando Martirena Hernandez (feature editor), A Concrete Path to Sustainability, Material Research Society, MRS Bulletin 09/2013; 38(09):678-679. DOI:10.1557/mrs.2013.213 • Impact Factor 5.07 **(WoS)**
3. Martirena F., Vizcaíno L., Antoni Mathieu, Pierre Henocq, Adrian Alujas, Karen Scrivener "Durability of reinforced concrete made with low clinker, ternary blend cement", Proceedings XIII 67th RILEM Week. XIII Conference on Durability of Building Materials and Composites, Sao Paulo, 1-5 September 2014. **(WoS)**
4. Vizcaíno Andrés, L. M., Antoni, M. G., Martirena Hernández, J. F., Scrivener, K. L., Effect of fineness in clinker-calcined clays-limestone cements, Advances in Cement Research 04/2015; DOI:10.1680/adcr.14.00095 • Impact Factor 0.49 **(WoS)**
5. L.M. Vizcaíno-Andrés, S. Sánchez-Berriel, S. Damas-Carreras, A. Pérez-Hernández, K.L. Scrivener, J.F. Martirena-Hernández, Industrial trial to produce a low clinker, low carbon cement, Materiales de Construcción 03/2015; 65(317):e045. DOI:10.3989/mc.2015.00614 . Impact Factor 0.73 **(WoS)**
6. Adrian Alujas; Rodrigo Fernandez; Rafael Quintana; Karen L Scrivener; Fernando Martirena; Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays: Influence of calcination temperature and impact of calcination products in OPC hydration; Applied Clay Science 02/2015; 108. DOI:10.1016/j.clay.2015.01.028 • Impact Factor 2.70 **(WoS)**
7. Ernesto Díaz, Fernando Martirena, Adrian Alujas, Roberto Torrent; Low Carbon Cement: Durability Performance Assessment with Laboratory and Site Tests. RILEM Bookseries 10, DOI 10.1007/978-94-017-9939-3_34 **(WoS)**
8. A. Perez, A. Favier, F. Martirena, K. Scrivener; Influence Of The Manufacturing Process On The Performance Of Low Clinker, Calcined Clay-Limestone Portland Cement; RILEM Bookseries 10, DOI 10.1007/978-94-017-9939-3_35 **(WoS)**
9. Fernando Martirena, Karen Scrivener, Development And Introduction Of A Low Clinker, Low Carbon, Ternary Blend Cement In Cuba. RILEM 2015. RILEM Bookseries 10, DOI 10.1007/978-94-017-9939-3_40 **(WoS)**
10. Adrián Alujas, J. Fernando Martirena Influence Of Calcination Temperature In The Pozzolanic Reactivity Of A Low Grade Kaolinitic Clay. RILEM Bookseries 10, DOI 10.1007/978-94-017-9939-3_41 **(WoS)**
11. Adrián Alujas, Roger S. Almenares, Sergio Betancourt, Carlos Leyva, Pozzolanic Reactivity Of Low Grade Kaolinitic Clays: Influence Of Mineralogical Composition. RILEM Bookseries 10, DOI 10.1007/978-94-017-9939-3_42 **(WoS)**
12. Vizcaino Leng, Antoni Mathieu, Alujas Adrian, Martirena Fernando, Scrivener Karen; Industrial Manufacture Of A Low-Clinker Blended Cement Using Low-Grade Calcined Clays And Limestone As SCM: The Cuban Experience. RILEM Bookseries 10, DOI 10.1007/978-94-017-9939-3_43. **(WoS)**