

HACIA LA SOSTENIBILIDAD EN LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO EN AMÉRICA LATINA: CEMENTO EN BASE A ARCILLAS CALCINADAS Y CALIZA (LC3)

Autores: Prof. José Fernando Martirena-Hernandez, Universidad Central de las Villas, Cuba
Prof. Karen Scrivener, Instituto Federal de Tecnología de Lausana, EPFL, Suiza

RESUMEN

América Latina tiene una fuerte presión para mejorar la sostenibilidad de la producción de cemento. La utilización de una combinación de arcillas calcinadas y calizas permite producir un cemento conocido como “LC3”, que con solamente un 50% de clínquer alcanza propiedades similares a las de un cemento puro. El nuevo cemento permite reducir más de un 30% de las emisiones de carbono asociadas a la producción, y su aplicación en concretos garantiza una mayor durabilidad, en especial en las zonas donde hay una alta concentración de cloruros. Se han realizado pruebas a escala industrial en varios países, que han demostrado la robustez del proceso productivo y su posibilidad de escalado. Su producción demanda solamente la incorporación de un calcinador de arcillas, y puede aprovechar el resto de la infraestructura instalada en una planta de cemento. La abundante disponibilidad de materias primas en la región y los excelentes parámetros económicos y ambientales auguran un buen futuro para esta propuesta, que de ser implementada, podría permitir llegar a un factor de clínquer cercano al 55%, con una reducción de más de 35 millones de toneladas de carbono anuales en la producción de cemento en la región.

INTRODUCCIÓN

La región Latinoamérica (Sur América incluyendo Brasil, América Central y el Caribe) tiene una demanda anual de cemento que oscila entre 200-250 millones de toneladas, aproximadamente el 5% de la producción mundial; esta demanda debe crecer entre 350-400 millones de toneladas en el 2050 [1]. El factor de clínquer promedio en la región está en 65-70%, y la sustitución de clínquer se realiza principalmente con calizas, cenizas volantes, escorias y puzolanas naturales [2]. Si se considera un promedio de 0.8 ton de CO₂ emitida por cada tonelada de cemento producida, las emisiones de la industria en la región están entre 160-200 millones de toneladas, y representan aproximadamente el 0.45-0.55% de las emisiones globales de CO₂ [3]

En los próximos años se prevé una reducción de la disponibilidad de Materiales Cementicios Suplementarios (MCS) en la región, especialmente cenizas volantes y escorias. Esto obligará al sector a buscar nuevas alternativas para poder mantener los niveles actuales de sustitución de clínquer. Las disponibilidades de cenizas volcánicas están principalmente en la faja volcánica desde Centroamérica hasta el sur. En la región del El Caribe hay menores reservas de puzolanas naturales, al igual que en algunos países en el continente. [4]

Las arcillas caoliníticas, sin embargo, son materiales con una distribución geográfica bastante regular en la región, y las reservas estudiadas son abundantes, similar que con las calizas [5]. El presente artículo presenta la experiencia en el desarrollo e introducción de un cemento ternario, conocido como “LC3” por sus siglas en inglés

(Limestone Calcined Clay Cement), producido con una combinación de arcillas calcinadas, calizas y cemento Portland.

PUZOLANAS A PARTIR DE ARCILLAS CAOLINÍTICAS

Los materiales arcillosos se forman producto de la intemperización de rocas volcánicas en épocas geológicas. Entre las arcillas, las del grupo de las caolinitas son las que demuestran una mayor reactividad al ser activadas térmicamente. [6] Cuando estas arcillas se calcinan a temperaturas entre 350-650 °C se eliminan los grupos hidroxilos y se crea un nivel de desorden que favorece la reactividad del material calcinado. [7]

Las arcillas caoliníticas vienen generalmente acompañadas de otros minerales arcillosos como las micas, esmectitas, carbonatos y óxidos de hierro. El cuarzo y los feldespatos forman generalmente parte de la fracción más gruesa de las arcillas calcinadas. Estudios recientes han demostrado que arcillas caoliníticas con relativamente poco contenido del mineral caolín pueden ser excelentes MCS al ser activadas [7]. Esto podría incidir en el aumento de la disponibilidad del material, y evidentemente impacta el precio final del producto.

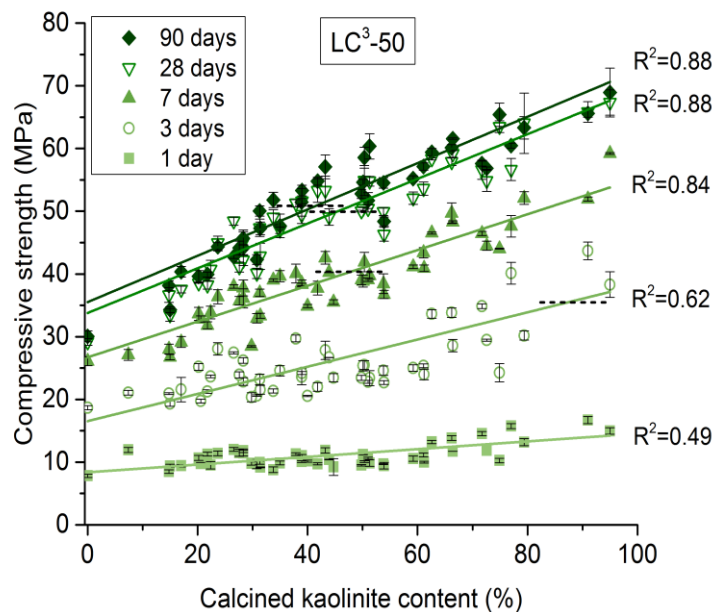


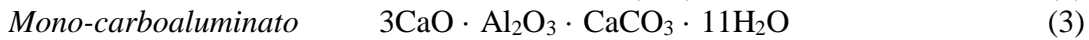
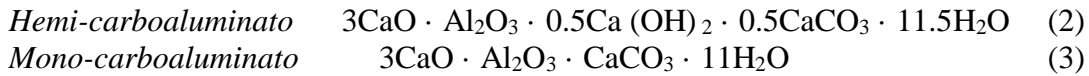
Figura 1: relación entre el contenido de caolinita y la resistencia a compresión en morteros estandarizados (Fuente: [8])

La Fig. 1 muestra una gráfica donde se relaciona la resistencia a compresión de morteros estandarizados (Norma EN-196) con el contenido de caolinita. Este estudio ha demostrado que el contenido de caolinita es, por encima de cualquier otro parámetro, el principal criterio a considerar en la evaluación de la reactividad del candidato evaluado.[8]

LA SINERGI A ENTRE LA ARCILLA CALCINADA Y LA CALIZA

La reacción puzolánica en cementos que contienen arcillas calcinadas se produce cuando estas reaccionan con el Hidróxido de Calcio (HC) producido con la hidratación del clínquer. El límite de sustitución está dada por la disponibilidad de HC que se

produce durante la hidratación del clínquer; para sustituciones de más de un 35% de clínquer las propiedades del cemento se comprometen debido a la pobre disponibilidad de HC. Sin embargo, la adición de carbonato de calcio o magnesio a través de la incorporación de un volumen mayor de caliza permite que la fase aluminica continúe reaccionando para formar carbo-aluminatos como se describe a continuación: [10]



La cantidad adicional de caliza añadida al sistema permite aumentar la sustitución de clínquer, en este caso por la caliza, un material mucho más barato que con frecuencia se consigue como material de desecho [11], manteniendo el mismo contenido de puzolana. Las proporciones ideales son clínquer (50%), arcilla calcinada (30%), caliza (15%) y yeso (5%). Este cemento alcanza valores de resistencia similares a los cementos puros, incluso a edades muy tempranas. La línea de puntos en cada edad en la Figura 1 corresponde al valor de resistencia del cemento puro (contenido de clínquer superior al 90%). Es evidente que arcillas con contenido de un 40% de caolinita alcanzan la resistencia de un cemento puro desde los 7 días de curado.

CALCINACIÓN DE ARCILLAS CAOLINÍTICAS

La calcinación de arcillas caoliníticas debe garantizar una total deshidroxilación del material. Este proceso ocurre a temperaturas entre 350-650 °C, pero para efectos industriales es oportuno trabajar a temperaturas en el material entre 700-800 °C, y en ningún caso alcanzar la temperatura de re-cristalización del material, aproximadamente 950 °C [9,12].

El proceso de calcinación ocurre de la siguiente forma: (i) el material original entra en el horno en su estado natural, generalmente en grumos de hasta 50 mm de diámetro y con una humedad que oscila entre 10-20%; (ii) en la primera fase en el horno el material pierde el agua por evaporación, en un proceso que puede demorar 10-15 min; (iii) el material deshidratado entra en la zona de calcinación, a una temperatura en la cámara de aproximadamente 900 °C donde ocurre la deshidroxilación, proceso que transcurre entre 15-25 min. Al final del proceso el material debe ser enfriado hasta una temperatura final de aproximadamente 50 °C.

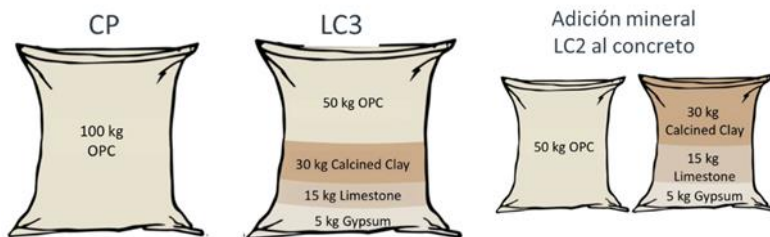


Figura 2: Opciones de fabricación del cemento LC3 (fuente: K. Scrivener)

FABRICACIÓN DE CEMENTOS TERNARIOS EN BASE A ARCILLA CALCINADA Y CALIZA

La molienda de cementos multi-componente implica retos en lograr las propiedades finales del producto. En el caso de los cementos del tipo LC3 los materiales más blandos como la arcilla calcinada y la caliza son molidos en exceso durante la intermolienda, y el clínquer quede relativamente grueso. Los problemas de finura se

pueden resolver usando aditivos intensificadores de molienda o realizando la molienda separada. Por esta última se prepara la adición mineral llamada “LC2”, consistente en 65% de arcilla calcinada, 30% de caliza y 5% de yeso, que es luego mezclada con el cemento Portland puro. Ver Figura 2 para más detalles.

Se han realizado pruebas industriales de producción de cemento LC3 en Cuba (Siguaney 2013, Siguaney (LC2) 2018) [13], en la India (2017) [14], y en Guatemala. Las arcillas caoliníticas empleadas tienen contenidos de caolín entre 40-55%. La Figura 3 presenta algunos resultados de resistencia en morteros estandarizados realizados. Se incluye la referencia de los valores prescriptivos del cemento de uso general GU y del cemento de alta resistencia inicial HE. De forma general todos los cementos LC3 producidos, con contenidos de clínquer alrededor del 50%, alcanzan los valores prescriptivos de un cemento de alta resistencia inicial, que generalmente tiene altos contenidos de clínquer.

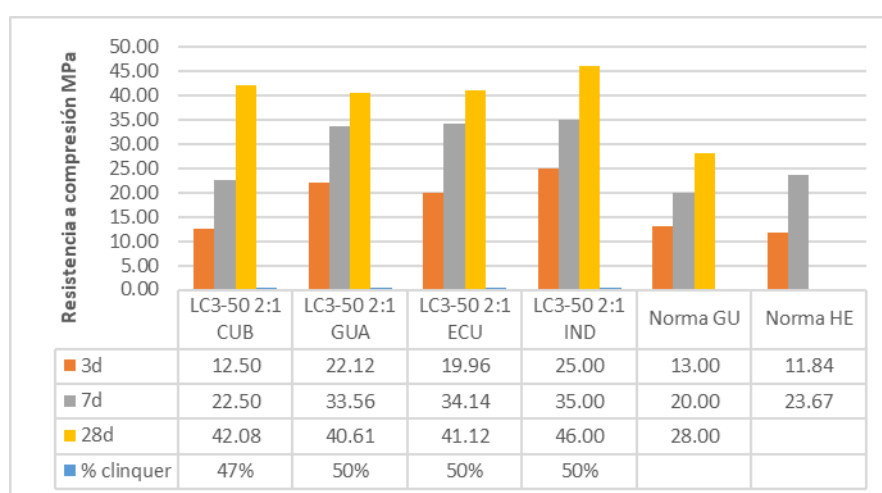


Figura 3: Resultados de resistencias en morteros estandarizados (EN-196) de cementos producidos en pruebas industriales

Tabla 1: Valores de resistencia en concretos producidos en pruebas industriales

	cemento	SP %	agua/cem.	cm	Res 7d	Res 28d
ECU concreto	412	2.00	0.34	7.50	26.57	47.00
CUB concreto	410	1.5	0.45	16.00	30.63	39.93
GUA concreto	290	2	0.4	7.00	39.59	53.37
IND concreto 1	400	0.7	0.4	19.00	39.2	44.7
IND concreto 2	450	1.2	0.3	20.00	45.4	61.7

Fuente: resultados de pruebas en Cuba, Guatemala (Cementos Progreso), India (*Indian Institute of Technology Madras*, y Ecuador (Cementos Atenas)

APLICACIONES DEL CEMENTO LC3

La fabricación de concreto utilizando cementos con arcillas calcinadas tiene que enfrentar el reto del incremento de la demanda de agua que se produce por la alta superficie específica de las arcillas calcinadas. [15]. Debido a la alta capacidad de adsorción de las arcillas es recomendable utilizar aditivos químicos de alta eficiencia, del tipo Poli-Carboxilatos Éter (PCE). No obstante, las pruebas realizadas demuestran que es perfectamente posible producir concretos utilizando cemento LC3 con 50% de clínquer que alcanzan una resistencia a los 28 días superior a 40 MPa. La Tabla 1

presenta algunos de los resultados logrados en los concretos producidos en los países donde se han realizado pruebas industriales.

DURABILIDAD DE HORMIGONES PRODUCIDOS CON CEMENTO LC3

Estudios realizados demuestran que la sinergia que se produce entre las arcillas calcinadas y las calizas permiten formar una microestructura más densa, con diámetros de poros 5-10 veces más pequeños que los de matrices cementicias producidas con cemento Portland [16,17]. Esta densa estructura de poros crea una barrera física que impide a agentes externos como cloruros o sulfatos ingresar y migrar dentro de la estructura del concreto.

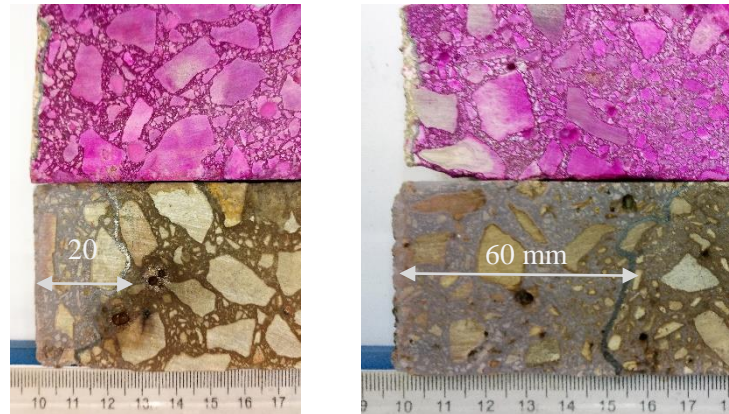


Figura 4: Evaluación de penetración de cloruros y carbonatación de especímenes sujetos a 4 años de exposición en condiciones marinas al norte de Cuba: (izq.) concreto con LC3-50 2:1; (der.) concreto con CP

Estudios de más de 5 años en concretos producidos con LC3 y cemento Portland que han sido expuestos a agresivas condiciones marinas (ver Figura 4) demuestran que la penetración de cloruros es tres veces menor en los concretos producidos con LC3 que en los producidos con cemento Portland [18]. La carbonatación puede ser mayor en dependencia de la Humedad Relativa (HR) del ambiente donde esté el elemento. En caso de condiciones costeras, debido a la alta HR, la carbonatación es prácticamente despreciable luego de cuatro años de mediciones (ver Figura 4).

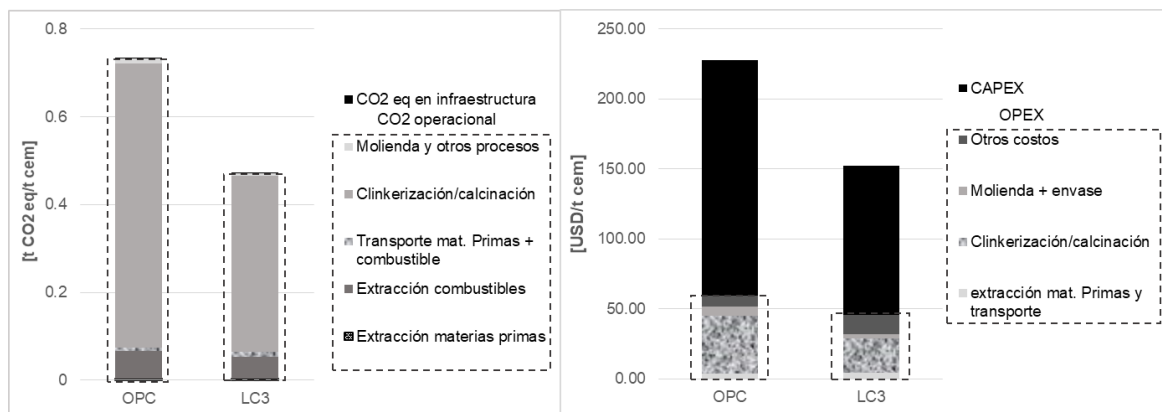


Figura 5: (izq.) Impacto ambiental del LC3 en comparación con CP; (der.) análisis de costo de la producción del LC3 vs. la producción tradicional del CP. Fuente: [20]

IMPACTOS DEL EMPLEO DEL CEMENTO LC3

La reducción del clínker hasta contenidos cercanos al 50% produce importantes impactos de tipo económico y ambiental. La Figura 5 presenta un análisis preliminar de

los impactos ambientales y económicos de la implementación de la producción del nuevo cemento. Estudios posteriores confirman las indudables ventajas económicas de la producción del cemento LC3 en dependencia de las condiciones de infraestructura y la distancia de transporte de las materias primas, que pueden ser resumidas en: (i) reducción de más de un 30% de las emisiones de CO₂ asociadas a la producción; (ii) reducción de los costos de inversión en más de 120 \$US/ton; (iii) reducción de los costos operacionales entre un 9-15% en relación al cemento Portland; y (iv) retorno de la inversión en un período entre 2-4 años [19].

CONCLUSIONES

La sostenibilidad en la producción de cemento en la región demanda el incremento de la sustitución del clínquer. La utilización de una combinación de arcillas calcinadas y calizas se perfila como una opción atractiva para este fin. Las arcillas caoliníticas cuentan con grandes reservas en varias regiones del continente, así como en la zona insular. El nuevo cemento LC3 muestra propiedades similares a las de un cemento puro a pesar de tener solo un 50% de clínquer. Las pruebas industriales realizadas en Cuba, Guatemala, Ecuador y la India demuestran la robustez del proceso y la posibilidad de adaptación de la industria actual a su producción. Las aplicaciones en concreto demuestran la posibilidad de producir materiales de excelentes prestaciones sin grandes variaciones en el proceso. Los costos de inversión y de operación para la fabricación del cemento LC3 son muy atractivos. La implementación de este cemento permitiría el incremento de la disponibilidad de MCS en la región en más de 30 millones de toneladas por año, y con esta se podría reducir el factor de clínquer a valores cercanos a 55-60%. Por esta vía podrían reducirse cada año unas 35 millones de toneladas de CO₂ (más del 20%) asociadas al proceso productivo, manteniendo los niveles actuales de producción.

REFERENCIAS

- [1] A.A.D. de P. de Cemento, perspectiva del crecimiento mercado de cemento en América Latina y el Caribe, El Nuevo D. (2019) 2019.
- [2] WBCSD, Cement Industry and CO₂ Performance “Getting the Numbers Right,” 2009.
- [3] IEA 2018, Global Energy & CO₂ Status Report 2017, 2018.
- [4] K.L. Scrivener, V.M. John, E.M. Gartner, Eco-efficient cements: POtential, economically viable solutions for a low CO₂, cement based materials industry, 2016.
- [5] A. Ito, R. Wagai, Global distribution of clay-size minerals on land surface for biogeochemical and climatological studies, 2017.
- [6] B. Sabir, S. Wild, J. Bai, Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: A review, *Cem. Concr. Compos.* 23 (2001) 441–454. doi:10.1016/S0958-9465(00)00092-5.
- [7] A. Alujas, R. Fernández, R. Quintana, K.L. Scrivener, F. Martirena, Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays : Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration, *Appl. Clay Sci.* 108 (2015) 94–101. doi:10.1016/j.clay.2015.01.028.
- [8] F. Avet, K. Scrivener, Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC 3), *Cem. Concr. Res.* 107

- (2018) 124–135. doi:10.1016/j.cemconres.2018.02.016.
- [9] R. Fernandez, F. Martirena, K.L. Scrivener, The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite, *Cem. Concr. Res.* 41 (2011) 113–122. doi:10.1016/j.cemconres.2010.09.013.
- [10] M. Antoni, J. Rossen, F. Martirena, K. Scrivener, Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone, *Cem. Concr. Res.* 42 (2012) 1579–1589. doi:10.1016/j.cemconres.2012.09.006.
- [11] S. Krishnan, S. Kumar, S. Mithia, S. Bishnoi, Hydration kinetics and mechanisms of carbonates from stone wastes in ternary blends with calcined clay, *Constr. Build. Mater.* 164 (2018) 265–274. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.12.240.
- [12] A. Tironi, M. a. Trezza, A.N. Scian, E.F. Irassar, Kaolinitic calcined clays: Factors affecting its performance as pozzolans, *Constr. Build. Mater.* 28 (2012) 276–281. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.08.064.
- [13] L. Vizcaíno-Andrés, S. Sánchez-Berriel, S. Damas-Carrera, A. Pérez-Hernández, K. Scrivener, M.-H. Fernando, Industrial trial to produce a low clinker , low carbon cement, *Mater. Construcción.* 65 (2015). doi:http://dx.doi.org/10.3989/mc.2015.00614.
- [14] S. Bishnoi, S. Maity, A. Mallik, S. Joseph, S. Krishnan, Pilot scale manufacture of limestone calcined clay cement : The Indian experience, *Indian Concr. J.* 88 (2014) 22–28.
- [15] L. Vizcaíno-Andrés, M. Antoni, F. Martirena-Hernández, K.L. Scrivener, Effect of fineness in clinker-calcined clays-limestone cements, *Adv. Cem. Reseach.* (2015).
- [16] Y. Dhandapani, M. Santhanam, Assessment of pore structure evolution in the limestone calcined clay cementitious system and its implications for performance, *Cem. Concr. Compos.* (2017). doi:10.1016/j.cemconcomp.2017.08.012.
- [17] Y. Dhandapani, T. Sakthivel, M. Santhanam, R. Gettu, R.G. Pillai, Mechanical properties and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC3), *Cem. Concr. Res.* 107 (2018) 136–151. doi:10.1016/j.cemconres.2018.02.005.
- [18] H. Maraghechi, F. Avet, H. Wong, H. Kamyab, K. Scrivener, Performance of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) with various kaolinite contents with respect to chloride transport, *Mater. Struct. Constr.* 51 (2018). doi:10.1617/s11527-018-1255-3.
- [19] Cementis, Financial Attractiveness of LC3, (2019).
- [20] S. Sanchez, A. Favier, E. Rosa, R. Sanchez, U. Heierli, K. Scrivener, F. Martirena, G. Habert, Assessing the environmental and economic potential of Limestone Calcined Clay Cement in Cuba, *J. Clean. Prod.* (2016) 1–9. doi:10.1016/j.jclepro.2016.02.125.