

Hacia una industria cementera más sustentable

PALABRAS CLAVE

CEMENTOS BINARIOS; CEMENTOS TERNARIOS;
CEMENTOS DE BAJO CARBONO; ECOEFICIENCIA

GEMMA RODRÍGUEZ

Arquitecta, doctora y magíster. Profesora titular (IT, FADU-Udelar). Directora de la Maestría en Arquitectura en el área tecnológica. Investigadora SNI (ANII) en Nivel II (2014-2026) y Nivel I (2009-2013). Ha escrito veinticuatro artículos completos para revistas especializadas, tres libros, seis capítulos y ochenta y tres trabajos para eventos. Posee una vasta trayectoria en el campo de la producción técnica (cuarenta y cinco productos de desarrollo tecnológico, procesos y otros).

Resumen

La elaboración de cemento basada en el empleo de clínker llevó a la industria cementera a ocupar el tercer lugar a nivel mundial en el consumo industrial de energía y el segundo en la emisión industrial de CO₂. Por ello han surgido diferentes estrategias para mejorar la ecoeficiencia de la industria cementera. La más importante es la sustitución parcial del clínker por materiales alternativos: materiales cementicios suplementarios [MCS], obtenidos a partir de la transformación de residuos industriales, agroindustriales y otros. De allí que cementos pórtland con *filler* calcáreo [CPF], compuestos [CPC] y de bajo carbono [LC3] constituyen una importantísima herramienta para el desarrollo sostenible de la industria del cemento, pudiéndose sustituir hasta 25,35% y 50% de clínker por MCS —respectivamente—, lo cual implica disminuir tanto la cantidad de combustible requerida para elaborar cemento como las emisiones de CO₂.

Por su capacidad para preservar recursos naturales y mejorar características de los productos basados en su empleo, los CPC se fabrican y comercializan en todos los países del mundo en mayor medida que los CPF. La comercialización de LC3 es más incipiente, por ser un desarrollo relativamente reciente —del 2014—. En Uruguay, si bien tardíamente, hace pocos años se fabrican y comercializan CPF y CPC. No se cuenta con suficiente información sobre los cementos de bajo carbono —a excepción de los datos publicados en la bibliografía internacional— y no se los contempla en las normas de cemento que están siendo actualizadas.

Introducción

Civilizaciones muy antiguas han construido con materiales aglomerantes, pero recién en 1824 fue registrada —por John Aspdin— una patente que designaba como *cemento pórtland* a un producto obtenido por la mezcla en proporciones adecuadas de materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales, que contenía sílice, alúmina y se calentaba hasta la temperatura de clinkerización, moliéndose el clínker resultante (Mehta y Monteiro, 2014). Este material de construcción ha demostrado, durante dos siglos, ser confiable en una amplia gama de condiciones ambientales y de aplicaciones. En relación con ello, cabe observar que el hormigón —basado en el empleo de cemento pórtland— es el material de construcción más empleado en el mundo, siendo superado solo por el agua (Mehta y Monteiro, 2014; Brunauer y Copeland, 1964).

Inicialmente, la producción de cemento pórtland se basaba en la utilización de clínker, que requiere elevadas temperaturas para su obtención —cercas a 1400 °C— y emite gases altamente nocivos para la capa de ozono, como los de tipo NO_x, CO₂, fluorinados y dioxinas, entre otros. Dicho cemento se conoce como *cemento pórtland común* —en inglés: Ordinary Portland Cement, OPC— o cemento pórtland normal —CPN—, como indica la norma uruguaya UNIT 20:2022 (Instituto Uruguayo de Normas Técnicas).

La fabricación de CPN llevó a la industria cementera a ocupar el tercer lugar en el consumo industrial de energía y el segundo en la emisión industrial de CO₂ a nivel mundial (International Energy Agency y Cement Sustainability Initiative, 2018), siendo responsable de un 7% de las emisiones de CO₂ en el mundo. La producción de una tonelada de CPN requiere cerca de 80 kWh de energía y 1500 kg de materias primas, liberando al aire cerca de una tonelada de CO₂ (Mamatha et al., 2017).

En el proceso de fabricación del CPN, el CO₂ se produce a partir de tres fuentes principales (Osby et al., 2016):

- descarbonatación de piedra caliza en el horno: alrededor de 525 kg de CO₂/t de clínker;
- quema de combustible en el horno: alrededor de 335 kg de CO₂/t de cemento,
- utilización de energía eléctrica: alrededor de 50 kg CO₂/t de cemento.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible [ODS] —enunciados por las Naciones Unidas (2015) para tomar medidas urgentes a los efectos de combatir el cambio climático y sus impactos para 2030— posibilitaron crear estrategias para minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero [GEI] de la fabricación de CPN. Las tres más importantes son:

- mejora de la eficiencia energética;
- uso de biocombustibles y otros combustibles alternativos,
- sustitución del clínker por materiales cementicios suplementarios [MCS].

A nivel mundial

La preocupación por la sostenibilidad de la producción de cemento llevó al desarrollo de diversas tecnologías que se utilizan ampliamente en el mundo. El primer conjunto de desarrollos se centró en reducir la energía requerida para la producción de clínker, por lo que se pasó de una producción vía húmeda a una vía seca; es decir, de un consumo de energía —combustible fósil— de 1400 kcal/kg de clínker a 800 kcal/kg de clínker respectivamente (Mehta y Monteiro, 2014). Actualmente, la mayoría de los hornos de clínker están cerca de la máxima eficiencia que es termodinámicamente posible (Sharma et al., 2021).

Por otro lado, el empleo de combustibles alternativos en los hornos para elaborar el clínker está creciendo, pero en una proporción muy pequeña comparada con el total (IEA-CSI, 2018). De allí que la sustitución parcial del clínker por materiales cementicios suplementarios [MCS] surgió como una opción altamente atractiva para reducir sensiblemente el problema y, en consecuencia, propiciar un ahorro energético y una menor afectación al ambiente. Según Aitcin y Mindess (2011), por cada kilogramo menos de clínker que se emplea para fabricar una tonelada de cemento, se reducen las emisiones de CO₂ en 1 kg.

De allí que, a nivel mundial, el cemento pasó a fabricarse mezclando clínker con materiales más finos que el cemento, como cenizas volantes, escorias, puzolanas y piedra caliza finamente molida (filler calizo o calcáreo). Dichos MCS permiten producir cementos que cumplen los requisitos normativos, reduciendo el impacto ambiental de la producción de cemento sin disminuir su facilidad de uso ni su versatilidad; pero cada uno de ellos cambia el comportamiento del cemento bajo determinadas condiciones.

A principios de la década de 2000, se observó que en mezclas binarias —de clínker y un MCS—, el contenido de clínker en el cemento —con los MCS disponibles— ya no podía disminuirse más. Por ejemplo: los *fillers* calcáreos y cenizas volantes, a pesar de su amplia disponibilidad como materiales, solo pueden reemplazar al clínker de forma limitada debido a su baja reactividad. Y las escorias y puzolanas, aunque ofrecen niveles de reemplazo más altos, están disponibles en cantidades limitadas. Por esto, surgieron cementos formados por mezclas ternarias y cuaternarias que ofrecieron el beneficio de niveles más altos de reemplazo de clínker, lo que redujo los efectos indeseables que un solo MCS en particular puede tener en el desempeño del cemento. De allí que la comercialización de CPN pasó a ser escasa en la mayoría de los países del mundo, e incluso nula en algunos.

Más recientemente, se desarrollaron cementos bajos en carbono [Limestone Calcined Clay Cement, LC3]: mezclas ternarias de clínker + *filler* calcáreo + arcilla calcinada, que posibilitan reducir hasta un 50% el contenido de clínker en el cemento y —consecuentemente— las emisiones de CO₂, lo cual permitió que se llegara a elaborar en laboratorio hasta con un 40% de clínker (Antoni et al., 2012).

Suiza, Cuba e India lideraron las investigaciones, el desarrollo y la aplicación del LC3 con financiación —desde 2014— de la Agencia Suiza para el Desarrollo

y Cooperación [SDC]. Actualmente, más de 50 países están produciendo LC3 o bien realizando investigaciones o desarrollos al respecto.¹

A partir de la disponibilidad de piedra calcárea y de arcilla en todo el mundo, recientes desarrollos indican el potencial significativo del empleo de arcillas calcinadas y piedra calcárea de diferentes orígenes y regiones para elaborar LC3 (Krishnan et al., 2018; Huang et al., 2020; Akindaunsi et al., 2020; Lin et al., 2021; Dixit et al., 2021), utilizando diferentes tecnologías y sin requerir equipamientos especiales para su fabricación (Bishnoi et al., 2014; Emmanuel et al., 2016). Además, el conocimiento sobre estos cementos ha crecido exponencialmente en el tiempo y son comercializados en diferentes países, presentándose como una opción muy prometedora para lograr menores emisiones de CO₂ y disminuir costos.

En los cementos LC3, la alúmina de la arcilla calcinada y el carbonato del *filler* reaccionan creando una sinergia entre los tres componentes que posibilita una mayor sustitución de clínker —hasta un 50%—, con lo cual su producción requiere menos energía que la elaboración de CPN, con grandes beneficios tanto medioambientales como técnicos y económicos (Ruiz Rosa et al., 2017; UN Environment et al., 2018; Abrao et al., 2022).

Aquí cabe observar que para la formación de clínker se necesitan temperaturas muy altas —cercanas a 1400 °C—, mientras que las temperaturas de calcinación para el empleo de las arcillas en cemento son bastante inferiores —600-850 °C, según el tipo de arcilla—.

Conjuntamente con el desarrollo de los LC3, se comenzaron a realizar análisis de ecoeficiencia de la producción de dichos cementos, que posibilitaron la evaluación de alternativas relacionadas con la sustitución de clínker. Esos análisis señalan que diferentes indicadores permiten reducir el impacto ambiental sin afectar la competitividad económica de la empresa, logrando identificar áreas en las que se registran mayores desperdicios o pérdidas de recursos, así como posibles oportunidades de inversión (Ruiz Rosa et al., 2017).

En Uruguay

La normativa vigente en nuestro país —la mencionada UNIT 20: 2022— indica cinco tipos de cemento para uso general: cemento pórtland normal [CPN], cemento pórtland con *filler* calcáreo [CPF], cemento pórtland puzolánico [CPP], cemento pórtland con escoria [CPE] y cemento pórtland compuesto [CPC].

Los CPF, CPP y CPE son cementos binarios compuestos principalmente por clínker pórtland y un material cementicio suplementario (*filler* calcáreo, puzolana o escoria, respectivamente). En el CPF, se puede sustituir entre el 6% y el 25% de clínker por *filler* calcáreo; y en el CPP, entre el 15% y el 50% de clínker por puzolana. En el caso del CPE, la sustitución de clínker por escoria puede ser de entre el 6% y el 35%.

1. Para profundizar en el tema, ver: <https://www.lc3.ch>

Los CPC son considerados cementos ternarios, ya que —además de clínker— pueden contener dos o tres componentes en porcentajes que van desde el 6% al 35%, no debiendo ser el contenido de *filler* calcáreo superior al 25%.

Hasta hace pocos años, en Uruguay, entre estas opciones, se fabricaba y comercializaba solo CPN. La fabricación de cementos binarios o ternarios constituye una importantísima herramienta para el desarrollo sostenible, ya que disminuye la cantidad de combustible requerida para elaborarlos y aumenta la ecoeficiencia —eficiencia ecológica-económica-social— de la empresa que los produce, si se compara con los cementos pórtland basados en el empleo de clínker [CPN].

En nuestro país, una de las plantas cementeras de la empresa estatal —ANCAP— fue la primera en desarrollar, fabricar y comercializar CPF, sustituyendo parte de clínker por *filler* calcáreo. Dicha empresa cuenta, en el departamento de Lavalleja, con grandes yacimientos de piedra calcárea que son insumo para elaborar este tipo de cemento. Instrumentó allí la molienda de piedra calcárea para elaborar el *filler* calcáreo y ahorrar energía en la producción de cemento. Pero el CPF obtenido era CPF 30 —con resistencias a compresión a los 28 días de edad entre 30 y 50 MPa—, mientras que el CPN comercializado era CPN 40 —con resistencias a compresión a los 28 días de edad entre 40 y 60 MPa—, por lo que la integración del CPF al mercado local, entre 2010 y 2011, no alcanzó niveles significativos y su fabricación fue discontinuada. De allí que, en Uruguay, hasta aproximadamente 2018, se continuó elaborando y empleando CPN, producto conocido con relación a su desempeño en hormigones y otros materiales cementicios.

En la Udelar, el equipo que investiga el desarrollo y la aplicación de nuevos materiales para construcción analizó el empleo de residuos agroindustriales uruguayos, activándolos de forma adecuada para ser MCS, con el objetivo de mejorar la ecoeficiencia y las características de los productos basados en su empleo.

Se comenzó primeramente con ceniza de cáscara de arroz [CCA], empleándola en hormigón (Rodríguez de Sensale, 2000 y 2006; Giaccio et al., 2007 y 2010; Rodríguez de Sensale et al., 2008; Rodríguez de Sensale, 2010); luego, en cementos para elaborar CPP, sustituyendo parte de clínker por CCA —en el proyecto INIA FPTA 285, 2009-2011— (Rodríguez de Sensale et al., 2013). Si bien los resultados eran excelentes —y la CCA, el residuo agroindustrial más abundante de nuestro país— no alcanzaba para tener una producción continua de CPP. Esto llevó al desarrollo de CPC mediante sustitución parcial de clínker por CCA residual uruguaya y *filler* calcáreo,² quedando demostrado que se puede elaborar CPC con dicho residuo —si se activa adecuadamente para ser empleado como MCS— y obtener beneficios medioambientales además de técnicos (Rodríguez de Sensale y Rodríguez Viacava, 2018).

La CCA es muy liviana, por lo que —para que desde el punto de vista económico resulte viable su empleo— la fábrica de cemento tiene que estar ubicada en las cercanías del lugar donde se genera.

También se estudió, para CPP, cemento ceniza de bagazo de caña de ALUR —integrante del grupo ANCAP—, concluyéndose que no es posible utilizarla tal como se obtiene y necesita una requema (Ruchansky et al., 2014), ya

2. Proyecto ANII FSE-1-2011-1-6476, 2012-2015.

que —desde el punto de vista económico— inviabiliza su empleo para el tipo de cemento considerado, que es binario. Las cenizas de residuos forestales de nuestro país son obtenidas en pequeñas cantidades (Godoy, 2011), lo cual —en tanto la industria cementera requiere grandes cantidades de materias primas— impide considerar cualquier posible estudio sobre la viabilidad de su empleo para elaborar cementos.

Los resultados de dichas investigaciones tuvieron difusión en nuestro país y se tomó conciencia de que no era sustentable elaborar CPC. De allí que una cementera privada comenzara a comercializar —en 2018— CPC con clínker + escoria + *filler* calcáreo. Cabe observar que las escorias empleadas para la elaboración de cementos son escorias granuladas de alto horno, que deben cumplir determinados requisitos normativos. Dado que Uruguay no cuenta con altos hornos para la elaboración del CPC, la escoria se importaba. En ese entonces, ANCAP retomó la producción de CPF, con ajustes en la formulación inicial, para que el cemento fuera CPF40. Desde 2020, aproximadamente, la integración del CPF al mercado uruguayo se ha vuelto significativa: varias empresas lo elaboran hoy, además de la estatal.

En el año 2020, en contexto de pandemia, la única empresa que en nuestro país elaboraba CPC empezó a tener problemas con el suministro de escoria —importada desde Brasil—, ya que se produjo un importante incremento en el costo, lo cual llevó a sustituirla por arcilla calcinada. De allí que el CPC que se está comercializando sea una mezcla de clínker + arcilla calcinada + *filler* calcáreo, siendo el porcentaje de sustitución de clínker por MCS muy inferior y diferente al que se emplea para cementos LC3 a nivel mundial. La sinergia entre los tres componentes establece una importante diferencia.

Consideraciones finales

La industria cementera es esencial para satisfacer la demanda de construcción e infraestructura, pero también gran consumidora de materias primas y energía, así como emisora de CO₂. Por tanto, su papel en la lucha contra el cambio climático es fundamental. En tal sentido, este artículo buscó brindar un breve pero completo panorama de los principales problemas que esa industria enfrenta en materia de sostenibilidad y las estrategias que ha ido adoptando para superarlos tanto a nivel global como nacional.

El empleo de MCS sustituyendo parte de clínker ha sido la estrategia más exitosa para reducir las emisiones de CO₂ a nivel mundial. Los más empleados —cenizas volantes, escorias y puzolanas naturales— representan actualmente menos del 10% de la producción mundial de cemento, lo que ha impulsado el desarrollo de cementos bajos en carbono [LC3], usando arcillas calcinadas conjuntamente con *filler* calcáreo.

En Uruguay, aunque tardíamente, hace pocos años se fabrican y comercializan cementos con MCS. Se tiene poca información sobre los cementos bajos en

carbono y, aunque la norma sobre cementos de uso general se actualizó recientemente, no los contempla. Cabe observar que, por ejemplo, en 2021 la Unión Europea aprobó la norma EN 1975, que incluye al LC3, por lo que sería importante atender a que existe ese camino y seguirlo.

Referencias bibliográficas

- Abrao, P. C., Cecel, R. T., Cardoso, F. A. y John, V. M. (2022). Comparing the ecoefficiency of cements containing calcined clay and limestone filler [Comparación de la ecoeficiencia de cementos conteniendo arcilla calcinada y *filler* calcáreo]. En S. Bishnoi (Ed.), *Calcined Clays for Sustainable Concrete* (pp. 245-255). Singapur: Springer. Recuperado de https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-2806-4_28
- Aitcin, P.C. y Mindess, S. (2011). *Sustainability of Concrete* [Sustentabilidad del hormigón]. Nueva York: Spon Press.
- Akindahunsi, A. A., Avet, F. y Scrivener, K. (2020). The influence of some calcined clays from Nigeria as clínker substitute in cementitious systems [Influencia de algunas arcillas calcinadas de Nigeria como sustituto de clínker en sistemas cementicios]. *Case Studies in Construction Materials*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00443>
- Antoni, M., Rossen, J., Martirena, F. y Scrivener, K. (2012). Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone [Sustitución de cemento por una combinación de metacaolín y piedra caliza]. *Cement and Concrete Research*, 42(12), 1579-1589. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.09.006>
- Bishnoi, S., Mayti, S., Mallik, A., Joseph, S. y Krishnan, S. (2014). Pilot scale manufacture of limestone calcined clay cement: the Indian experience [Fabricación a escala piloto de cemento de arcilla calcinada con piedra caliza: la experiencia hindú]. *Indian Concrete Journal*, 88(6), 22-28.
- Brunauer, S. y Copeland, L.E. (1964). The chemistry of concrete [La química del hormigón]. *Scientific American*, 210(4), 80-93.
- Dixit, A., Du, H. y Pang, S. D. (2021). Performance of mortar incorporating calcined marine clays with varying kaolinite content [Prestación de cemento incorporando arcillas marinas calcinadas con contenido variable de caolinita]. *Journal of Cleaner Production*, 282. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124513>
- Emmanuel A. C., Haldar, P. K., Maity, S. y Bishnoi, S. (2016). Second pilot production of limestone calcined clay cement in India: the experience [Segunda producción piloto de cemento de arcilla calcinada con piedra caliza en India: la experiencia]. *Indian Concrete Journal*, 90, 57-64.
- Giaccio, G., Rodríguez de Sensale, G. y Zerbino, R. (2007). Failure mechanism of normal and high-strength concrete with rice-husk ash [Mecanismo de falla de hormigones normales y de alta resistencia con ceniza de cáscara de arroz]. *Cement and Concrete Composites*, 29(7), 566-574. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.04.005>
- Godoy, D. (2011). *Desarrollo de un sistema muro portante de albañilería basado en bloques de madera-cemento*. [Tesis de maestría inédita]. Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile.

- Huang, Z., Huang, Y., Liao, W., Han, N. y Zhou, Y. (2020). Development of limestone calcined clay cement concrete in South China and its bond behavior with steel reinforcement [Desarrollo de hormigón de cemento de arcilla calcinada en el sur de China y su comportamiento de adherencia con armadura de acero]. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 21(11), 892-907. <https://doi.org/10.1631/jzus.A2000163>
- International Energy Agency y Cement Sustainability Initiative. (2018). *Technology roadmap: Low carbon transition in the cement industry* [Hoja de ruta tecnológica: transición baja de carbono en la industria del cemento]. Recuperado de <https://www.slideshare.net/internationalenergyagency/low-carbon-transition-in-the-cement-industry>
- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. (2018). *Cementos pórtland para uso general. Definiciones y requisitos*. (Norma UNIT 20:2022). Recuperado de <https://www.unit.org.uy/normalizacion/norma/100001384>
- Krishnan, S., Kanaujia, S. K., Mithia, S. y Bishnoi, S. (2018). Hydration kinetics and mechanisms of carbonates from stone wastes in ternary blends with calcined clay [Cinética y mecanismos de hidratación de carbonatos provenientes de desechos pétreos en mezclas ternarias con arcilla calcinada]. *Construction and Building Materials*, 164, 265-274. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.240>
- Lin, R., Lee, H., Han, Y. y Wang, X. (2021). Experimental studies on hydration–strength–durability of limestone–cement–calcined Hwangtoh clay ternary composite [Estudios experimentales sobre hidratación–resistencia–durabilidad del compuesto ternario de piedra caliza, cemento y arcilla calcinada de Hwangtoh]. *Construction and Building Materials*, 269. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.12.1290>
- Mamatha, P., Narayana, S. M. V. y Naresh Kumar, T. (2017). To Evaluate the Mechanical & Durability Properties of Nano Sugarcane Bagasse Ash in Cement Concrete [Evaluar las propiedades mecánicas y durabilidad de nano ceniza de bagazo de caña de azúcar en hormigón de cemento]. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology IJSRSET*, 3(8), 425-430. Recuperado de <https://technoscienceacademy.academia.edu/IJSRSET>
- Mehta, P. K. y Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: microstructure, properties and materials* [Hormigón: microestructura, propiedades y materiales]. New York: McGraw-Hill Education. Recuperado de <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071797870>
- Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. A/RES/70/1. Recuperado de https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1_es.pdf
- Özbay, E., Erdemir, M. y Durmuş, H. I. (2016). Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties. A review [Aprovechamiento y eficiencia de escoria de alto horno granulada molida en propiedades del hormigón. Una revisión]. *Construction and Building Materials*, 105, 423-434. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.153>
- Rodríguez de Sensale, G. (2000). *Estudo comparativo entre as propriedades mecânicas dos concretos de alta resistencia e convencionais com cinza de casca de arroz* [Estudio comparativo entre las propiedades mecánicas de hormigones de alta resistencia y convencionales con ceniza de cáscara de arroz]. (Tesis de doctorado, Universidad Federal de Río Grande del Sur, Porto Alegre, Brasil). Repositorio institucional de FADU, Udelar: <http://www.fadu.edu.uy/sepep/tesis/estudo-comparativo-entre-as-propriedades-mecanicas-dos-concretos-de-alta-resistencia-e-convencionais-com-cinza-de-casca-de-arroz/>
- Rodríguez de Sensale, G. (2006). Strength development of concrete with rice-husk ash [Desarrollo de resistencia de hormigón con ceniza de cáscara de arroz]. *Cement and Concrete Composites*, 28(2), 158-160. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.09.005>
- Rodríguez de Sensale, G. (2010). Effect of Rice-Husk Ash on Durability of Cementitious Materials [Efectos de la ceniza de cáscara de arroz en la durabilidad de materiales cementicios]. *Cement and Concrete Composites*, 32(9), 718-725. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.008>
- Rodríguez de Sensale, G., Ribeiro, A. B. y Goncalvez, A. (2008). Effect of RHA on autogenous shrinkage of portland cement pastes [Efecto de RHA en retracción autógena de pastas de cemento pórtland]. *Cement and Concrete Composites*, 30(10), 892-897. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.06.014>
- Rodríguez de Sensale, G. y Rodríguez Viacava, I. (2018). A study on blended cements containing residual rice husk ash and limestone filler [Un estudio de cementos mezclados conteniendo ceniza de cáscara de arroz residual y filler calcáreo]. *Construction and Building Materials*, 166, 873-888. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.113>
- Rodríguez de Sensale, G., Romay, C., Sabalsagaray, S., Gutiérrez, S., Benitez, A. y Dalchiale, E. (2013). Valorización del residuo obtenido de la quema de la cáscara de arroz. *FPTA-INIA*, (45).
- Ruchansky, A., Borges Masuero, A. y Rodríguez de Sensale, G. (2014). Posibilidades del uso de la ceniza de bagazo de caña como adición mineral al cemento pórtland en Uruguay. En L. Villegas, I. Lombillo, C. Liaño y H. Blanco (Eds.), *Congreso latinoamericano sobre patología de la construcción, tecnología de la rehabilitación y gestión del patrimonio: REHABEND 2014* [CD-Rom] (Santander, España, 1-4 de abril de 2014), 1137- 1144.
- Ruiz Rosa, Y., Rosa Domínguez, E. R., Sánchez Berriel, S., Castillo Hernández, L., Martirena, J.F. y Suppen, N. (2017). Análisis de la ecoeficiencia de la producción de cementos de bajo carbono mediante la sustitución de clínker. *Centro Azúcar*, 44(2), 77-88.
- Sharma, M., Bishnoi, S., Martirena, F. y Scrivener, K. (2021). Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review [Cemento y hormigón de arcilla calcinada y piedra calcárea: Una revisión del estado del arte]. *Cement and Concrete Research*, 149. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106564>
- UN Environment, Scrivener, K., John, V. M. y Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potencial economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry [Cementos ecoeficientes: posibles soluciones económicamente viables para una industria de materiales a base de cemento con bajas emisiones de CO₂]. *Cement and Concrete Research*, 114, 2-26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>