

Comparación técnica, económica y ambiental de los cementos cubanos portland P-350 y PP-250 con sus equivalentes puzolánicos PP-350 y PZ-250¹

Artículo de Investigación - Fecha de recepción: 5 de junio de 2012 - Fecha de aceptación: 30 de agosto de 2012

Berlan Rodríguez

Ingeniero Industrial, Doctor en Saneamiento Ambiental y Seguridad Tecnológica, Universidad de Cienfuegos. Cienfuegos, Cuba
brguez@ucf.edu.cu

Rosa María León

Ingeniera Industrial, Universidad de Cienfuegos. Cienfuegos, Cuba, romaleon@gmail.com

José Luis Romero

Ingeniero Electricista, Cementos Cienfuegos S. A. Cienfuegos, Cuba, cokito@gmail.com

RESUMEN

En este estudio se aplica la metodología del Análisis de Ciclo de Vida a la producción de cementos en la empresa Cementos Cienfuegos S. A., con el objetivo de cuantificar los impactos ambientales que ocasiona la producción de cementos, identificar mejoras potenciales y seleccionar la más factible. Según el análisis realizado, el principal impacto que se produce en el proceso es la producción de clínker, por lo que las medidas de mejora están encaminadas a disminuir su uso, siendo sustituido por puzolanas. Se realizan experimentos para comprobar las características de los nuevos cementos y se emplean técnicas de análisis económico para evaluar las propuestas. Para el análisis ambiental con enfoque de ciclo de vida se utiliza el método Eco-speed, soportado por el software SimaPro. Como resultado del trabajo se obtiene que la adición de puzolanas al cemento disminuye el uso de clínker, reduciendo el impacto ambiental de su producción.

Palabras clave

Análisis de Ciclo de Vida, impacto ambiental, producción de cemento, cementos puzolánicos.

1. Artículo derivado del proyecto: *Análisis de Ciclo de Vida para la mejora ambiental de productos y procesos*, Universidad de Cienfuegos. Cienfuegos, Cuba.

*Technical, economic and environmental comparison of Portland
cuban cements P-350 and PP-250 with its pozzolanic equivalents
PP-350 and PZ-250*

ABSTRACT

In this study, Life-Cycle Assessment methodology is applied to cements production in “Cementos Cienfuegos SA” company with the objective of quantifying environmental impact in cement production, identifying potential improvement efforts and selecting the most feasible. According to the analysis, the main negative impact is clinker production. For this reason, improvement measures are aimed to reduce it use and replace it with pozzolana. Experiments are carried out to check characteristics of new cements and techniques of economic analysis are used to evaluate proposals. For environmental assessment with life-cycle outlook, “Eco-speed” method is used, which is supported by SimaPro software. Results demonstrate that pozzolanas addition to cement decreases the use of clinker, hence, reducing the environmental impact of its production.

Keywords

Life-Cycle Assessment, environmental impact assessment, cement production, puzolanic cements.

INTRODUCCIÓN

En la industria del cemento, hoy es un aspecto vital la reducción de las emisiones de CO₂. La industria del cemento necesita reducir las emisiones en más del 50% para poder mantener los niveles de consumo energético y emisiones del presente en los siguientes 10 años. Este reto implica un cambio de paradigmas en la producción y utilización del cemento, que permita una adecuación a las exigencias ambientales actuales.

La industria de la construcción, como muchas otras, se encuentra en un constante proceso de mejora de sus materiales [1]. El Análisis de Ciclo de Vida se ha convertido en una herramienta para ayudar a la aplicación de la eco-eficiencia [2]. Incluso existen programas informáticos basados en Análisis de Ciclo de Vida que están diseñados específicamente para evaluar proyectos de la construcción como por ejemplo la herramienta VERDE [3].

Una obra de construcción siempre lleva asociadas diversas cargas ambientales, las que en algunas ocasiones pueden ser importantes para la población que se encuentra cerca de las industrias [4], es por ello que se debe tratar de buscar alternativas que conlleven a una mitigación de los impactos ambientales, pero para evitar el traspaso de los problemas ambientales se debe utilizar un enfoque holístico como el Análisis de Ciclo de Vida [5]. Además se han realizado estudios del desempeño energético de los edificios como parte de las mejoras integrales que se pueden realizar con Análisis de Ciclo de Vida [6].

La metodología de Análisis de Ciclo de Vida tiene dentro de sus pasos la evaluación de impacto ambiental de ciclo de vida; para la realización de esta etapa, la metodología más adecuada, si se aplica el estudio en América Latina, resulta ser Eco-Speed [7] la cual está desarrollada por varios miembros de la Red Latinoamericana de Análisis de Ciclo de Vida empleada en este trabajo.

El proceso de fabricación del cemento parte de las canteras, donde existen varios impactos ambientales y retos asociados a esta etapa [8]; quizás los más difíciles son los horizontes temporales de los impactos ambientales [9] y las demandas de los consumidores, las cuales son las que halan el proceso [10].

Los retos de la aplicación del Análisis de Ciclo de Vida están planteados y se han trazado estrategias para mejorar la fiabilidad de los resultados que se obtienen y seguir aplicándola a varios sectores, entre ellos el de la construcción [11].

Entre las organizaciones que pretenden que se generalice la herramienta se encuentra el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y la Sociedad Europea de Química y Toxicología [12], ya que para llevar a cabo un verdadero desarrollo sostenible, sin frenar el progreso y sin comprometer la sostenibilidad, se requiere de evaluaciones medioambientales que permitan reconocer, cuantificar y calificar los impactos ambientales que se producen de diferentes formas en las distintas etapas del ciclo de vida de los productos, y dan lugar a efectos contaminantes sobre el entorno ambiental [5].

Desarrollar e implementar de forma práctica soluciones de este tipo puede convertirse en una prioridad máxima para la humanidad en los próximos años. En el caso específico de Cuba, este tipo de desarrollo es de hecho una prioridad estatal, y una preocupación de la industria cubana del cemento.

En este sentido, se trabaja con el objetivo principal de: Desarrollar el análisis del Ciclo de Vida de la producción del cemento aplicando el procedimiento descrito en la serie de normas ISO 14 040 [13], para proveer a la empresa de una herramienta de carácter proactivo como soporte en la toma de decisiones para disminuir su impacto ambiental y evaluar su eficiencia.

DESARROLLO METODOLÓGICO

Definición de unidad funcional y límites del sistema

El sistema analizado se define como la fabricación de una (1) tonelada de cemento portland, y engloba desde la obtención de las materias primas o el transporte hasta el lugar de su manipulación, la preparación de los componentes y, finalmente, la obtención del clinker y el cemento a punto para ser distribuido en el mercado.

Los límites del sistema responden al tipo de análisis de cuna a puerta ya que se concluye cuando el clinker y el cemento ya está listo para la carga a granel e inicia con la obtención de sus materias primas. Esto es, en el momento de la extracción de los áridos de las canteras (caliza, marga); el corrector de hierro y la zeolita se contabilizan a partir del transporte desde el punto de suministro hasta la fábrica de cemento. En los límites

no se incluye la incorporación del cemento como materia prima del hormigón.

Las entradas del sistema que se computan son las principales materias primas consumidas, el total del consumo energético, el consumo de agua e insumos relacionados con impactos ambientales; como salidas: los principales residuos y emisiones al medio (aire, agua y suelo); y como producto: el clinker y el cemento portland.

Otras materias primas consideradas como los explosivos utilizados en las canteras y el ladrillo refractario, no se evalúan desde el inicio de su propia producción sino que se contabilizan desde el producto como tal, porque se considera, como criterio, que no resulta relevante en el proceso en estudio.

Por lo que respecta a los portadores energéticos, indirectamente también se toman en consideración.

La unidad funcional, como se refiere anteriormente, es una (1) tonelada de cemento. Para cada proceso unitario se define una unidad funcional específica:

- **Cantera:** Tonelada de material extraído.
- **Trituración y secado:** Tonelada de material triturado y secado.
- **Preparación del crudo:** Tonelada de crudo.
- **Piroproceso:** Tonelada de clinker.
- **Producción de cemento:** Tonelada de cemento.

Para el estudio se ha utilizado como soporte informático el paquete computacional

SimaPro 7.1, una herramienta desarrollada por PRé Consultants para el Análisis de Ciclo de Vida que analiza y compara los aspectos medioambientales de un producto de una manera sistemática, siguiendo las recomendaciones de las normas ISO serie 14 040.

Análisis de los datos de entrada y salida

Un aspecto interesante por señalar es la magnitud de consumo de caliza, el cual se sitúa alrededor de 1.2 ton / tonelada de clínker. Este factor es importante, dado que la emisión de CO₂ está influenciada principalmente por la cantidad de caliza que se transforma en la fabricación del clínker.

En lo que respecta al consumo energético, la energía térmica corresponde principalmente a la utilizada en el secador de materias primas y en los hornos de fabricación del clínker. Suelen emplearse recursos fósiles no renovables: diesel para el calentamiento y petcoke, este último es un residuo del proceso de refinación del petróleo, compuesto por 85% carbón, con un contenido de azu-

fre de 4,5%, de manera que el combustible resultante tiene un poder calorífico de 8.506 kcal/kg.

En la Fig. 1 se aprecia que de todas las fases, las que más energía eléctrica consumen (de forma diferenciada) son las de la trituración del crudo, cocción del crudo y preparación del cemento, debido al elevado requerimiento eléctrico del molino de crudo, horno y los molinos de cemento, respectivamente.

Las emisiones de gases y compuestos, en general, se producen básicamente por dos factores:

1. El consumo de combustible en equipos de transporte, en los hornos y operación del secador de materias primas.
2. Las reacciones químicas que sufren las materias primas y el combustible, principalmente cuando se encuentran dentro del horno, durante la clinkerización. En particular, la descarbonatación de la caliza.

Este último genera una producción de 0,95 kg de CO₂ por tonelada de clínker, entre

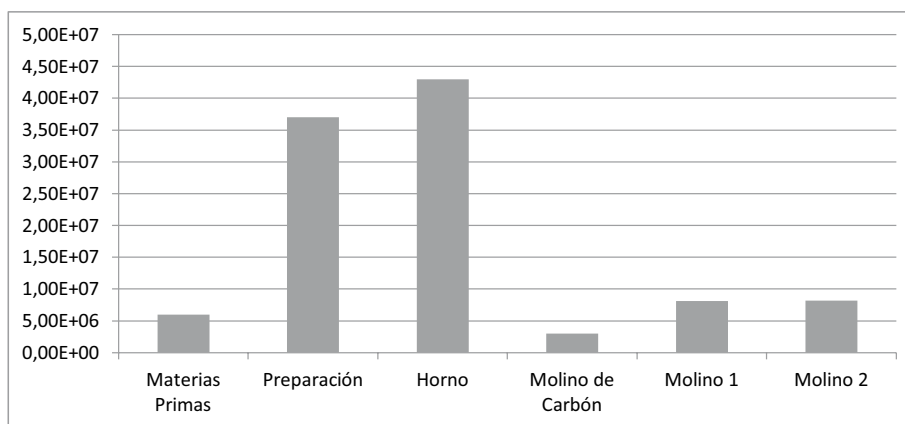


Fig. 1 Distribución del consumo de energía eléctrica por etapas del proceso en kWh

otros gases, correspondiendo el 40% al combustible y el 60% a la descomposición de la materia prima, lo que da una producción aproximada de 978.000 ton de CO₂ al año, como se puede apreciar en la Fig. 2.

Además se deben considerar las emisiones de polvo a la atmósfera, las cuales están cuantificadas y se muestran en la Fig. 3.

Evaluación técnica

Se propone la implementación de un cemento muy similar físicamente al P-350 denominado PP-350, portland puzolánico, con una composición de 80% de clínker, 5% de yeso como regulador de fraguado y 15% de toba zeolítica como aditivo. Y la producción de un cemento alternativo al

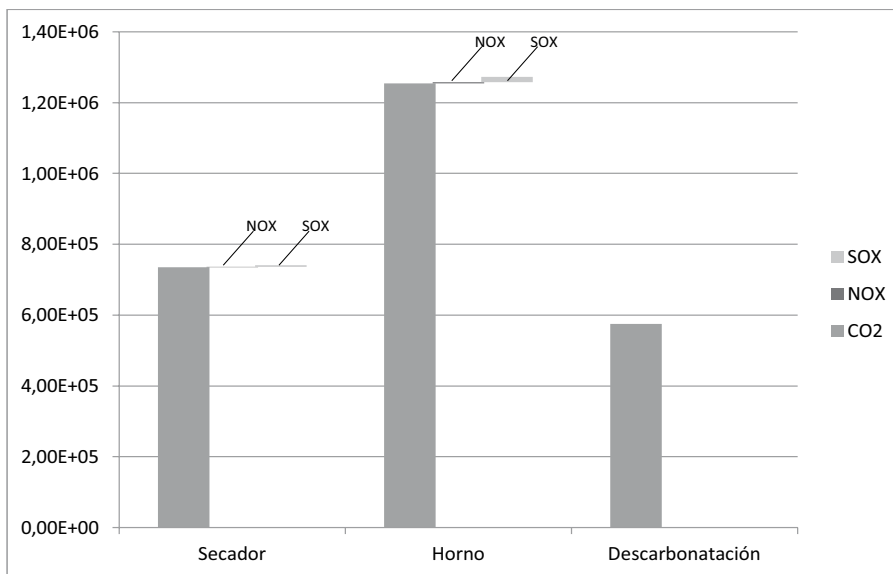


Fig. 2 Procesos que contribuyen a la emisión de gases de efecto invernadero

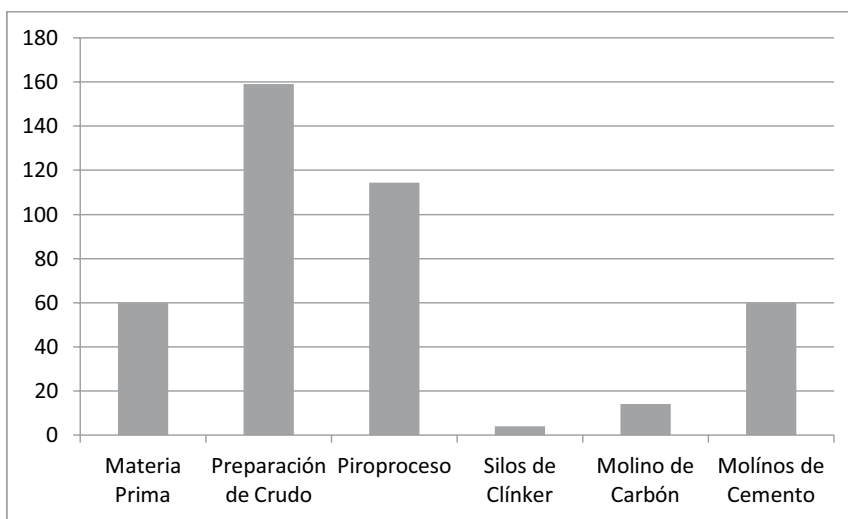


Fig. 3 Emisiones de polvo por etapas del proceso

PP-250 denominado PZ-250 con diferente composición química: 57% de clinker, 5% de yeso como regulador de fraguado y 38% de toba zeolítica como aditivo.

La posibilidad de sustituir clinker en fábrica tiene sus límites físicos, para evitar que se afecten las propiedades del producto. Por lo que para garantizar que ambos cementos conservaran similares propiedades físicas a los actuales, a pesar de su variación química, se incrementa ligeramente la finura de molido a más de $3.400 \text{ cm}^2/\text{g}$, en busca de una mayor superficie específica de reacción, que hace aumentar la reactividad del cemento, y por ende su resistencia inicial.

Los cementos estudiados, si bien pueden usarse indistintamente en muchas obras, tienen campos propios donde ofrecen ventajas técnicas y superan económicamente a los actuales, como lo prueban los resultados de los ensayos de laboratorio aplicados a los cementos PP-350 y PZ-250 y cuyos resultados se pueden visualizar en las Figs. 4 y 5, donde se comparó la resistencia a la

compresión para los morteros de cemento PP-250 y PZ-250 a los 7 y 28 días; para el cemento P-350 y PP-350 a los 3, 7 y 28 días.

Evaluación del impacto ambiental

Se procede a realizar una evaluación preliminar con los tres métodos seleccionados: Eco-indicador, Impact 2002+ y EcoSpeed a través del software SimaPro 7.1, con el objetivo de cotejar los resultados. Aunque los resultados de los demás métodos se pueden utilizar para determinar los efectos en el ecosistema de las emisiones asociadas a los resultados del inventario, sus resultados no resultan completamente satisfactorios, es por ello que se consideran como concluyentes los resultados obtenidos con Eco-Speed, respondiendo a las ventajas que implica su acomodamiento al caso específico de Cuba. Valorando que incluye la categoría *Uso del agua*, que no se contempla en los demás.

Los impactos obtenidos por el Análisis de Ciclo de Vida se ordenan de acuerdo con la prioridad que le concede cada método y se

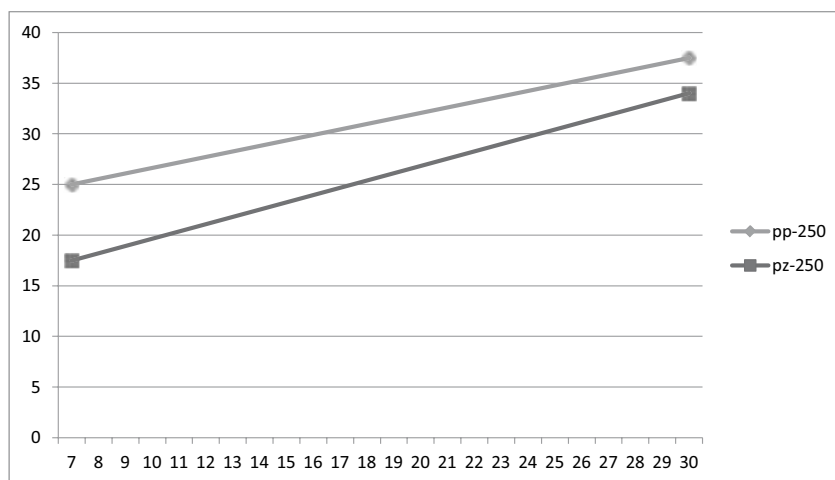


Fig. 4 Resultados del experimento de resistencia a la compresión para los cementos PZ-250 y PP-250

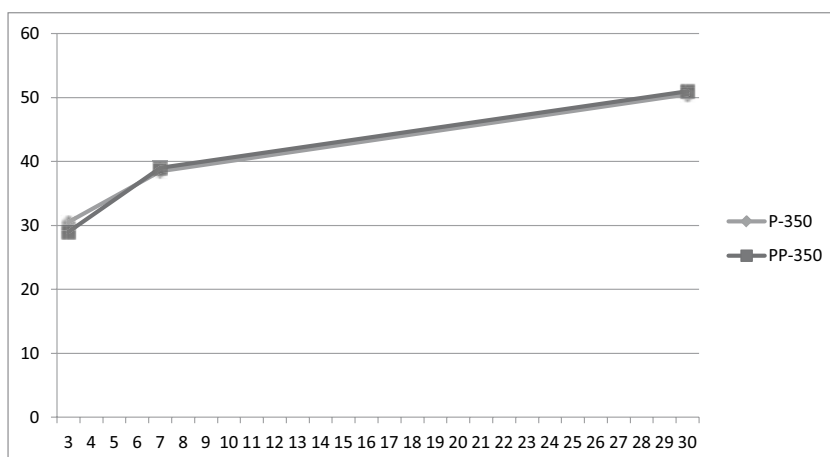


Fig. 5 Resultados del experimento de resistencia a la compresión para los cementos P y PP 350

presentan en los apéndices I al III, donde es posible comprobar que las categorías de impacto causantes del impacto ambiental que genera la producción de 1t de clínker son, en orden de prioridad: el uso de energías no-renovables, la respiración de sustancias inorgánicas y el calentamiento global.

La producción y comercialización de estos nuevos cementos: PP-350 y PZ-250 acarrearía una disminución de un 10% y un 20%, respectivamente, en el consumo de clínker, que por ser el proceso clave del ciclo de producción implicaría significativos ahorros económicos, energéticos y ambientales. Fundamentados en que el costo de los aditivos es sustancialmente inferior al costo del clínker, se debe tener en cuenta que casi el 90% de la energía consumida en el sistema corresponde a la producción de clínker; consecuentemente, los cementos que utilizan menores cantidades de clínker consumen menos energía.

Las emisiones de SOX, NOX, CO₂ dependen de la cantidad de clínker que tiene el cemento, es por ello que si se reduce la

cantidad de clínker se afectaría positivamente las categorías de impacto de mayor importancia (energías no renovables, respiración de sustancias inorgánicas y calentamiento global).

La disminución de un 10% y un 20% en la cantidad clínker de los cementos PP-350 y PZ-250, respectivamente, habría significado en el año 2009 alrededor de 49.220,06 toneladas menos de CO₂, 1,69 toneladas menos de NOX y 991,18 toneladas menos de SOX a la atmósfera, además de los correspondientes ahorros energéticos.

Evaluación del impacto económico

En todos los casos la unidad de cemento puzolánico tendrá un menor costo que el correspondiente normal, por cuanto se ha reemplazado un elevado porcentaje de clínker por puzolana, que tiene un costo de fabricación muy inferior.

Esta disminución de un 10% y un 20% en el consumo de clínker habría significado en el año 2009 alrededor de 51.000 toneladas de clínker menos por producir, implicando

TABLA I
DISMINUCIÓN DE LOS CONSUMOS CONCERNIENTES
A LA PRODUCCIÓN DE CEMENTOS

Disminución	10%	18%
Consumo de clínker (t)	40,862.10	10,612.08
Consumo eléctrico hasta clínker (kwh)	3,730,709.73	968,882.90
Consumo calórico (t)	4,494.83	1,167.33
Consumo de combustible (kg)	17,570.70	4,563.19
Emisión de CO₂ (t)	38, 819.00	10,081.48
Emisión de NOX (t)	1.34	0.35
Emisión de SO₂X(t)	786.84	204.34

un ahorro de USD \$ 2.148.630, adicionales al menor impacto ambiental, además de los correspondientes ahorros energéticos. En la Tabla I se muestran desglosados los ahorros posibles, de acuerdo con las disminuciones de consumo de clínker.

CONCLUSIONES

- La evaluación del impacto de la producción de cemento con el uso del software SimaPro 7.1, empleando el método Eco-Speed, mostró que el proceso de mayores cargas ambientales es la producción de clínker; donde se produce proporcionalmente el mayor consumo energético y la mayor parte de las emisiones de gases que causan impactos al medio ambiente, tanto por las reacciones químicas que origina la decarbonatación de la caliza, como por la quema de los combustibles fósiles.
- Las categorías de impacto más afectadas son: uso de energías no renovables, respiración de sustancias inorgánicas y calentamiento global.
- Como variante de mejora ambiental se propone la implementación de un cemento alternativo al P-350 denominado PP-350, portland puzolánico; y la producción de otro cemento muy similar al PP-250 denominado PZ-250, con una variación en su composición química que contiene como aditivo tobas zeolíticas de un 20-38%. Cementos que pueden usarse indistintamente en muchas obras y tienen campos propios donde ofrecen ventajas técnicas, superando económicamente los actuales. La utilización deberá decidirla en cada caso el especialista de obra, quien tendrá una mayor variedad de opciones.
- Si se planifica al año la producción se reduciría, en alrededor de un 28%, el consumo actual de clínker para hacer cementos, dejándose de emitir al año alrededor de 31.962 t de CO₂ y 646.23 t de SO₂, demostrándose la factibilidad técnica, económica y ambiental de esta propuesta, que favorecería a la empresa con un beneficio de USD \$ 1.679.607.

Agradecimientos

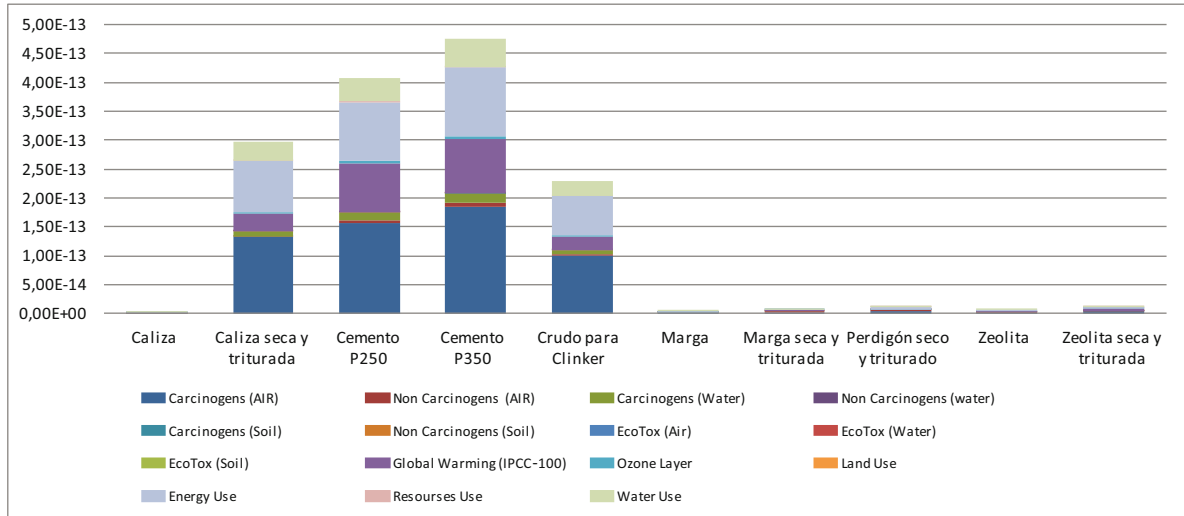
A todos los integrantes de la Red Iberoamericana y en especial a los de la Red Cubana de Análisis de Ciclo de Vida.

REFERENCIAS

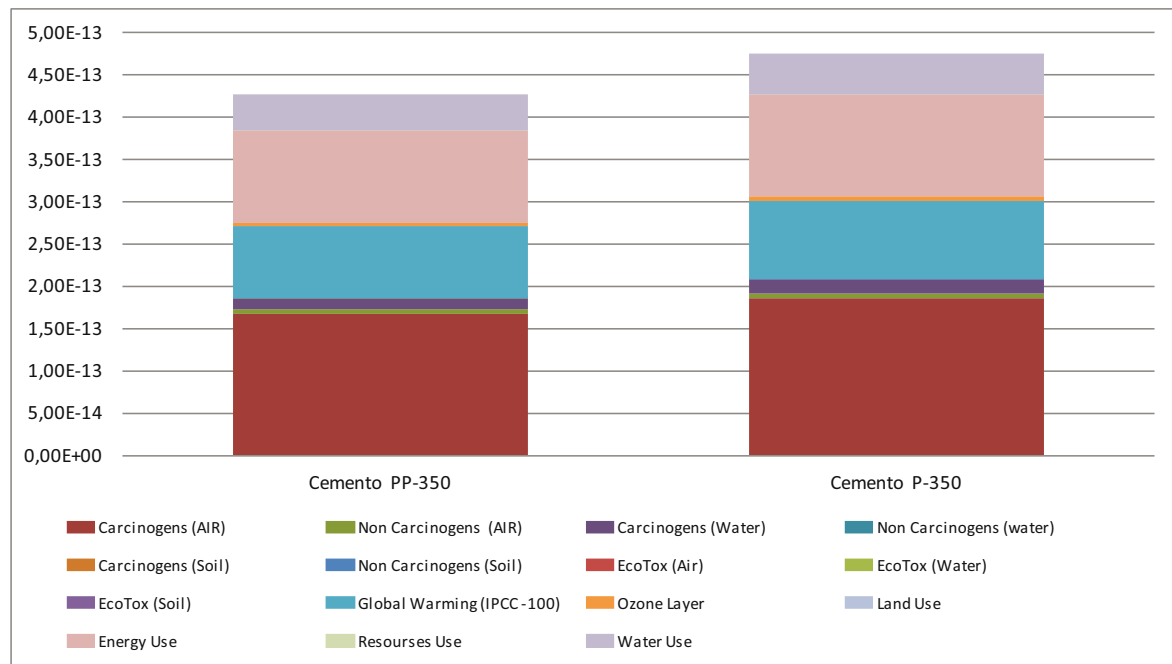
- [1] P.-C. Aitcin, "Cements of yesterday and today. Concrete of tomorrow". In *Cement & Concrete Research* Issue No. 9, Vol. 30. pp. 1349-1359, 2000.
- [2] A. Cardim de Carvalho Filho, Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento - Aportaciones al análisis de los inventarios del ciclo de vida del cemento. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña, 2001. [Online] Disponible en: <http://www.tdx.cat/TDX-0731101-125703>
- [3] M. Macías and J. García Navarro, *Metodología y herramienta VERDE para la evaluación de la sostenibilidad en edificios*. Informes de la Construcción Vol. 62, 517, 87-100, enero-marzo 2010. ISSN: 0020-0883 e ISSN: 1988-3234 doi: 0.3989/ic.08.056
- [4] I. M. Sobrini, C. Martín, and B. Gaite, *Evaluación de impacto ambiental de una molienda de clínker y fábrica de cemento, por el método de escenarios comparados*. Informes de la Construcción, 58, 504, 19-27, 2006.
- [5] N. Suppen, "Conceptos básicos del Análisis de Ciclo de Vida y su aplicación en el Ecodiseño", 2007. [Online] Disponible en: http://www.icyt.df.gob.mx/documents/cursos_diplomados/seminario_empresa/PRESENTACION_NYDIA_SUPPEN.pdf
- [6] W. L. Lee, F. W. H. Yik and J. Burnett, "Assessing energy performance in the latest versions of Hong Kong Building Environmental Assessment Method (HK-BEAM)". *Energy and Buildings*, 39, 343-354, 2007.
- [7] R. E. Rodríguez Berlan and A. M. Contreras, *Eco-Speed: Life Cycle Assessment Methodology for Latin-American Countries*. International Conference on Life Cycle Assessment, Coatzacoalcos, México, 2011.
- [8] M. Yellishetty, P. G. Ranjith, A. Tharumarajah, and S. Bhosale, "Life cycle assessment in the minerals and metals sector: a critical review of selected issues and challenges". *International Journal of Life Cycle Assessment* 14(3): 257-267, 2009.
- [9] P. Collet, A. Hélias, L. Lardon and J.-P. Steyer, *Time and Life-Cycle Assessment: how to take time into account in the inventory step*. Life Cycle Management Conference Proceedings 2011, Berlin, Germany.
- [10] K. Christiansen, M. Wesnæs and B. P. Weidema, *Consumer demands on Type III environmental declarations*. Copenhagen: 2.0 LCA consultants, 2006.
- [11] J. Thiesen, S. Valdivia, G. Sonnemann, J. Fava, T. Swarr, A. A. Jensen and E. Price, *Understanding Challenges and Needs: A Stakeholder Consultation on Business' Applications of Life Cycle Approaches*. CICLA 2007, Sao Paulo, Brazil, 2007.
- [12] UNEP Life Cycle Initiative, *Life Cycle Initiative Phase 2 2007-2010*. UNEP DTIE Project Brief. Paris, France: United Nations Environment Programme, Division of Technology, Industry & Economics, 2007.
- [13] International Organization for Standardization, *Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework*, 2006.

Apéndices

I. Resultados obtenidos de la comparación ambiental del impacto de ciclo de vida por etapas del proceso



II. Resultados obtenidos de la comparación ambiental de los cementos PP-350 y P-350



III. Resultados obtenidos de la comparación ambiental de los cementos PP-250 y PZ-250

