

CONTRIBUCION A LA REDUCCION DE LA HUELLA ECOLOGICA DEL HORMIGON

Iris Sánchez Soloaga¹, Angel Oshiro², María Positieri²

CINTEMAC. Centro de Investigación, Desarrollo y Transferencia en Materiales y Calidad.
Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Córdoba-Cruz Roja esq. Maestro López. Córdoba. Argentina
Tel: +54-0351-598-6050. C.P. (X5016ZAA).

Recibido: 13/08/12; Aceptado: 26/09/12

RESUMEN: Se presentan resultados obtenidos del cálculo de la *HE*-Huella Ecológica de un hormigón convencional utilizado en la provincia de Córdoba-Argentina y se propone para la reducción de la *HE* un hormigón con reemplazo del agregado grueso por plástico multicapas proveniente de la *CRESE*-Empresa de Recolección de Residuos. Se diseñaron tres familias de hormigones: un hormigón patrón sin plástico, otro con reemplazo del 10% del agregado grueso por plástico y otro con reemplazo del 20%. Se evaluaron sus propiedades mecánicas y térmicas. El asentamiento en los hormigones con incorporación de plástico disminuye a medida que aumenta el porcentaje de plástico. En estado endurecido la diferencia de la resistencia a compresión entre el hormigón patrón y el hormigón con incorporación del 20% de plástico, es significativa, con un comportamiento térmico alentador. Los resultados obtenidos permiten concluir que los agregados plásticos son adecuados para su uso en la industria de la construcción.

Palabras clave: Huella Ecológica, Hormigón, Plástico.

INTRODUCCION

La huella ecológica es un indicador definido como «el área de territorio ecológicamente productivo (cultivos, pastos, bosques o ecosistemas acuáticos) necesaria para producir los recursos utilizados y para asimilar los residuos generados por una población dada con un modo de vida específico de forma indefinida» (Wackernagel y Rees, 2001). Su objetivo fundamental consiste en evaluar el impacto sobre el planeta de un determinado modo o forma de vida y, compararlo con la biocapacidad del planeta.

Consecuentemente es un indicador clave para la sostenibilidad. El cálculo de la huella ecológica es complejo, y en algunos casos, imposible, lo que constituye su principal limitación como indicador. Básicamente sus resultados están basados en la observación de los siguientes aspectos:

- La cantidad de hectáreas utilizadas para urbanizar, generar infraestructuras y centros de trabajo.
- Hectáreas necesarias para proporcionar el alimento vegetal necesario.
- Superficie necesaria para pastos que alimenten al ganado.
- Superficie marina necesaria para producir el pescado.
- Hectáreas de bosque necesarias para contrarrestar la generación del CO₂ que provoca nuestro consumo energético, entre otros.

En este sentido no sólo incidiría el grado de eficiencia energética alcanzado sino también las fuentes empleadas para su obtención: a mayor uso de energías renovables, menor huella ecológica. Según Juan Luis Doménech (Doménech, 2007) en el conjunto del mundo, cada persona dispone de los recursos producidos por unas 2 ha de terreno al año, distribuidos del siguiente modo: 0,25 ha de cultivos, 0,6 ha de pastos, 0,6 ha de bosques, 0,03 ha de terreno construido y 0,5 ha de mar. Si descontamos el 12% necesario para la biodiversidad, obtenemos 1,7 ha/cap/año.

La huella ecológica del mundo creció un 50% de 1970 a la actualidad, debiéndose dicho incremento fundamentalmente al aumento en el consumo de la energía eléctrica necesaria para producir bienes y servicios. La huella ecológica del mundo es actualmente, con los niveles presentes de población de 2,3 ha/cap/año, por lo que en el balance final se obtiene un déficit de 0,6 ha, es decir, sobrepasamos la capacidad de carga global en un 30% como mínimo y por lo tanto estamos viviendo por encima de nuestras posibilidades (Doménech, 2007). Es importante señalar, que todos estos datos, están sujetos a una gran incertidumbre, variando de unos autores a otros.

Planteamiento del problema

El hormigón es el material de construcción más empleado en el mundo, y tras el agua, es el producto más consumido del planeta. Cada año, la industria del hormigón emplea 1.6 billones de toneladas de cemento, 10 billones de toneladas de roca y

¹ Becaria Doctoral CONICET.

² Profesor Titular.

arena y un billón de toneladas de agua (Doménech, 2007). Hay que destacar que por cada tonelada de cemento, se requiere 1.5 toneladas de roca caliza y gran consumo de combustibles fósiles.

La gran popularidad del hormigón se debe a sus excelentes características, como gran durabilidad, resistencia, etc. No obstante, su uso también acarrea grandes costes medioambientales, destacando particularmente, la enorme cantidad de energía consumida y CO₂ liberado durante su elaboración.

En este apartado, se abordarán, uno por uno, los principales componentes del hormigón, analizando en que medida contribuyen al impacto ambiental del producto final, tomando como referencia el libro de Meg Calkings “Materials for Sustainable Sites” (Calkins, 2008):

1. Partículas enviadas a la atmósfera: partículas materiales, óxidos de Nitrógeno (NO_x), dióxido de Azufre (SO₂)
2. Consumo de Agua: en la fabricación del cemento se requiere de un importante consumo de agua, empleada en: controlar las emisiones de polvo al aire, refrigerar los gases salientes de los hornos, enfriar el producto, etc.
3. Consumo de Agregados: Los agregados gruesos y finos suponen entre un 60% y un 75% del volumen total dentro del hormigón. Estos pueden proceder de una mina o bien ser manufacturados a partir del machaqueo de piedra. Los principales impactos que estas actividades suponen son:
 - suelen alterar hábitats de plantas y animales, contribuir a la erosión del suelo y a la contaminación del aire y del agua.
 - el procesado de materiales como la sílice libera partículas en el aire que pueden causar irritaciones en ojos y sistema respiratorio humano.
 - por último, suele ser necesaria maquinaria pesada capaz de emprender estas tareas, lo cual se traduce en un considerable consumo de combustible con su correspondiente emisión de CO₂ a la atmósfera.
4. Transporte del hormigón: en cuanto al transporte, es obvio que el factor ambiental predominante son las emisiones de CO₂. Afortunadamente, en la actualidad existe un alto número de plantas de hormigón e incluso plantas elaboradoras establecidas expresamente para obras de gran envergadura.
5. Emisiones de dióxido de carbono (CO₂): la industria cementera produce alrededor del 5% de las emisiones totales de CO₂ de acuerdo con los datos de emisiones disponibles en Oficemen (Agrupación de Fabricantes de Cemento de España); el 60% se deben al proceso de descarbonatación (transformación de la caliza en cal viva), y entre el 30 y 40%, aproximadamente, corresponde al uso de los combustibles necesarios en el proceso.

Asimismo el crecimiento de la industria del plástico mundial ha sido enorme, desde un poco más de 3 millones de toneladas en 1955 a 30 millones de toneladas en el 1977 (Jain et al., 1977). Esta cifra alcanzó los 100 millones de toneladas en 2001 (www.wasteonline.org.uk). Su uso intensivo ha generado un problema de residuos difícil de manejar ya que tienen la desventaja de no ser degradables, por lo que son responsables en gran parte de los desechos contaminantes que se acumulan en la naturaleza.

La gestión de los residuos sólidos es uno de los principales problemas ambientales en el mundo. Con la escasez de espacio para el depósito en vertederos y debido a su costo cada vez mayor, la incorporación de residuos en el hormigón se ha convertido en una alternativa atractiva para su disposición final.

ANTECEDENTES

El análisis Huella ecológica ha sido aplicado a varios niveles, desde la escala global (Wackernagel y Rees, 2001) hasta el nivel hogareño (Chambers, et al. 2000). Simmons y Chambers (Simmons, et al. 2000), calcularon la primera serie de algoritmos capaces de convertir “Uso de Recursos” a “Área de Tierra Equivalente”, titulado “Metodología Eco-índice” (Chambers, et al.2000). También el Instituto del Medioambiente de Estocolmo adoptó este acercamiento pionero.

Otro caso de estudio es el del centro Politécnico de Curitiba (Freitas, et al. 2010) en el que se estudió la importancia del hormigón en la generación de CO₂ para el caso de un edificio. Se tomaron como datos para este estudio la eliminación de CO₂ que se genera en los procesos de obtención de las materias primas más importantes de la construcción tales como cemento Portland, cal, ladrillos y baldosas de cerámica, acero y aluminio.

También profesores de la facultad de Engenharia Civil, Universidade Positivo (Aline de Oliveira, et al. 2011) estudiaron el análisis del ciclo de vida del hormigón con el fin de verificar el impacto medioambiental del producto. Los materiales que se analizaron son: arena natural, arena artificial, grava y cemento Portland CP IV-32. Los datos fueron recogidos de las empresas ubicadas en Curitiba y región metropolitana. Para este análisis se siguió los lineamientos de la norma NBR ISO 14.040:2009 (ABNT NBR ISO 14.040, 2009).

En la actualidad, a nivel mundial, se trabaja a lo largo de diversas líneas de investigación, con el fin de mejorar el cálculo de la huella ecológica, siendo cada vez más representativo y con un porcentaje de error menor. Así pues, cabe destacar el trabajo de Juan Luis Doménech, en el desarrollo de la denominada metodología MC3, aplicable al cálculo de la huella ecológica corporativa, en base a la contabilidad de la empresa. Este método es el que se aplicó, para la realización del presente estudio,

al caso particular del consumo de hormigón en la provincia de Córdoba-Argentina, como una primera aproximación a un tema complejo cuya resolución requiere un trabajo más extenso.

Como antecedente propio se menciona el trabajo “Cálculo de la HE del Hormigón” presentado en el V Congreso Internacional organizado por la AATH (Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón). Para el cálculo del consumo de hormigón por cada cordobés se tomo como referencia el consumo per cápita de cemento, 378 kilos, en promedio siete bolsas y media según lo especificó la ministra de Industria Débora Giorgi en LA MAÑANA de Córdoba, (2011).

Con una dosificación para un hormigón convencional cuyos datos se presentan en la Tabla 1 y a partir del dato de 378 kilos de cemento por habitante, se estima que la cantidad de hormigón consumido en kg por cada cordobés por año es de 2836 kg, tal como se presenta en la Tabla 2.

	Cemento	Agua	Agregado Fino	Agregado Grueso	Peso por m3
Peso [kg]	320	180	760	1140	2400

Tabla 1. Hormigón de uso común, en peso para un metro cúbico.

	Cemento	Agua	Agregado Fino	Agregado Grueso	Peso por m3
Peso [kg]	378	213	898	1347	2836

Tabla 2. Materiales para hormigón consumidos por c/cordobés por año en kg.

Con los datos anteriormente presentados se obtiene el consumo de energía, materias primas y emisiones que se generan en la elaboración del hormigón y que se presentan en la Tabla 3. Esta tabla está elaborada a partir de un estudio hecho por Häkkinen y Vares (1998) el cual muestra el perfil medioambiental de un hormigón y establece una guía sobre la proporción entre las cantidades involucradas de un material y de otro. Se destaca el impacto en el consumo de agregados gruesos y finos, como así también la importancia del tipo de energía que se utiliza para su fabricación

Energía	Consumo	Unidad
Fuel fósil	2637.48	MJ
Electricidad	567,2	MJ
Materias primas	Consumo	Unidad
Cemento	378000	g
Arena Fina	898000	g
Piedra	1347000	g
Agua	226880	g
Emisiones	Emisiones Fugitivas.	Unidad
Dióxido de carbono (CO ₂)	340320	g
Óxido de nitrógeno (NOx)	1559,8	g
Óxido de sulfúrico (SO ₂)	397,04	g
Metano (CH ₄)	368,68	g
Componentes orgánicos volátiles (COVtot)	510,48	g
Polvo	65,23	g
Metales pesados (Cr,As,Cd,Hg,Tl,Pb)	56720	µg

Tabla 3. Perfil medioambiental del hormigón por hab/año en Córdoba.

Como conclusión de este estudio se pudo observar que en el caso de la energía utilizada, el mayor consumo es de fuel fósil. Cuando se utiliza energía térmica (carbón-fuel) la huella aumenta considerablemente a diferencia del uso de la energía hidráulica. Esto denota la importancia de la elección de la energía a utilizar en la generación de un servicio o elaboración de un producto.

Dentro de las emisiones directas se ha tenido en cuenta, las emisiones de CO₂ procedentes de la descarbonatación de la piedra caliza durante la fase de cocción en el horno de clínker de cemento. Con respecto a la energía eléctrica, es necesario destacar que, también en este campo, el descenso del porcentaje de uso de clínker es fundamental.

En cuanto a los materiales, son la parte más influyente de la huella total, 9 ha/hab/año. Los volúmenes de clínker que se emplean, asociados a que tiene una gran huella intrínseca, hacen que sea precisamente la partida de materiales la que requiera un análisis más profundo (Sánchez et al., 2012).

DESARROLLO

Teniendo en cuenta los antecedentes citados se propuso como objetivo principal elaborar un hormigón con reemplazo del agregado grueso por plástico multicapa (pp, opp y pvc) proveniente de la CRESE y evaluar sus propiedades mecánicas y

térmicas desarrollando criterios para su diseño y aplicación. De esta manera se procura generar una alternativa para la reducción de la *HE* del hormigón convencional.

Como objetivos específicos se propone:

- Analizar y seleccionar con criterios tecnológicos los materiales reciclados plásticos.
- Desarrollar dosificaciones para hormigones livianos sustentables que incorporen agregados procedentes de residuos plásticos.
- Caracterizar física, mecánica y térmicamente las mezclas de hormigones livianos sustentables con residuos plásticos.

PLAN EXPERIMENTAL

A continuación se definen las etapas para alcanzar los objetivos delineados con anterioridad:

- Caracterización de los materiales.
- Diseño de hormigones.
- Análisis del comportamiento de hormigones con residuo plástico en estado fresco.
- Análisis del comportamiento de hormigones con residuo plástico en estado endurecido.
- Estudio de la conductividad térmica de hormigones con residuo plástico.

CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Cemento: Se utilizó cemento normal, categorizado como CPN40, según IRAM 50.000. Procedencia Catamarca, Argentina. Densidad relativa: 3,15.

Aditivo: El aditivo que se utilizó es un hiperfluidificante de última generación de base éter policarboxilato; su residuo sólido es de 36,2 %.

Plástico Multicapa: Se caracterizó el material plástico para conocer sus características físicas tales como la densidad relativa y granulometría. En la Tabla 3 se presentan los resultados de su caracterización y en la Figura 1 su aspecto.

Plástico multicapa (pp, opp y pvc)	
Densidad Relativa	0,83
Modulo de finura	6,18

Tabla 3: Propiedades físicas del plástico multicapas.



Figura 1: Aspecto del plástico multicapas

Agregado grueso: Se utilizó como agregado grueso un triturado pétreo de uso normal en la zona cuyas características físicas se presentan en la Tabla 4.

Agregado Grueso	
Tamaño máximo	19 mm
Densidad relativa.	2,78 kg/dm ³
Absorción	0,75%

Tabla 4: Propiedades físicas del agregado grueso.

Agregado Fino: Se utilizó una mezcla de arenas naturales (fina y gruesa) para lograr una granulometría continua bajo curvas límites, según normativa IRAM 1627. En la Tabla 5 se presentan las características físicas de la arena mezcla.

Agregado Fino	
Modulo de finura	3,11
Densidad relativa.	2,63 kg/dm ³
Absorción	0,9 %

Tabla 5: Propiedades físicas del agregado fino.

DISEÑO DE LOS HORMIGONES

Una vez caracterizados los materiales a utilizar en la mezcla se procedió a diseñar tres grupos de hormigones: un hormigón patrón de referencia sin plástico; un hormigón con reemplazo del 10% del agregado grueso por plástico multicapa y el otro con reemplazo del 20%.

En la Tabla 6 se presentan las distintas dosificaciones siendo su denominación la siguiente:

HP0: Hormigón patrón sin plástico multicapa.

HPN30: con 30kg de plástico por m3 de hormigón (10% Ag. Grueso).

HPN58: con 58kg de plástico por m3 de hormigón (20% Ag. Grueso).

Material (Kg)	HP0	HPN30	HPN58
Cemento	350	350	350
Agua	190	190	190
Ag. Fino 1	735	735	735
Ag. Fino 2	184	184	184
Ag. Grueso	971	874	777
Plástico	----	30	58
Aditivo	1,75	1,75	1,75

Tabla 6: Dosificación para un m3 de hormigón.

RESULTADOS

• Análisis del comportamiento de hormigones con residuo plástico en estado fresco.

Con el objetivo de verificar la influencia de plástico en la trabajabilidad del hormigón se realizaron ensayos en estado fresco determinando el asentamiento con el cono de Abrams, según Norma IRAM 1536. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 7 y en la Figura 2.

Consistencia	HP0	HPN30	HPN58
Asentamiento (cm)	5,0	3,0	2,5

Tabla 7: Asentamiento. Estado Fresco.

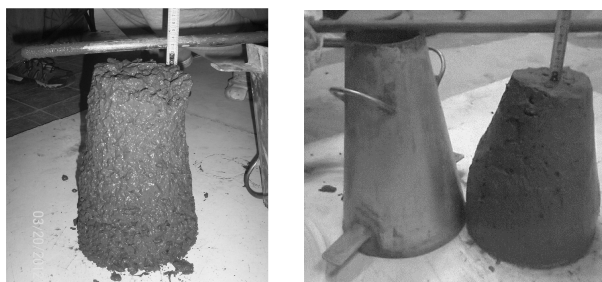


Figura 2: Asentamiento del HPN30 y del HPP50.

El asentamiento en los hormigones con incorporación de plástico es más bajo que en el hormigón patrón y disminuye a medida que aumenta el porcentaje de plástico.

• Análisis del comportamiento de hormigones con residuo plástico en estado endurecido.

En estado endurecido se obtuvieron buenos resultados a compresión a edades de 7 y 28 días con los HPN.

Edades	HP0	HPN30	HPN58
7 días	25,8	21,9	21,9
28 días	32,2	27,2	24,15

Tabla 8: Resistencia a compresión. Estado endurecido.

A los 7 días de edad la resistencia a compresión es similar en los tres hormigones con no siendo notoria la diferencia con el hormigón patrón (HP0).

A la edad de 28 días la diferencia de la resistencia a compresión entre el hormigón patrón y el hormigón con incorporación del 20% de plástico, es significativa.

• **Estudio de la conductividad térmica de hormigones con residuo plástico.**

Para analizar el comportamiento térmico de los hormigones se determinó el coeficiente de conductividad térmica mediante un equipo de placa caliente, de acuerdo a Norma IRAM 11.559 (Determinación de la resistencia térmica y propiedades conexas en régimen estacionario. Método de la placa caliente) cuyas probetas se muestran en la Fig. 3. Estas determinaciones se realizaron en el Departamento de Termodinámica de la Universidad Nacional del Nordeste, obteniendo resultados alentadores los que se presentan en la Tabla 9.

Conductividad	HP0	HPN30	HPN58
λ [W / m °K]	1,4	1,34	1,21

Tabla 9: Resultados conductividad térmica.

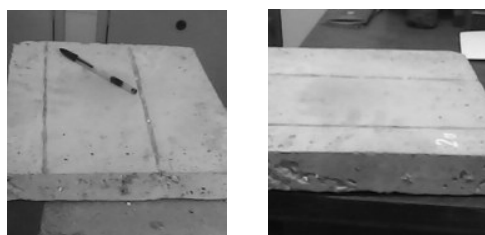


Figura 3: Probetas para el ensayo de conductividad térmica.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de los hormigones ensayados tanto en estado fresco como en estado endurecido permiten estimar que los agregados plásticos son adecuados para su uso en la industria de la construcción.

Los resultados obtenidos en estado fresco muestran que la forma irregular y angulosa del plástico multicapa dificulta la trabajabilidad del hormigón.

Con respecto a los resultados obtenidos en estado endurecido la resistencia disminuye a medida que aumenta el porcentaje de incorporación de residuo plástico. Sin embargo los resultados son buenos en comparación con el hormigón patrón.

Los resultados del estudio de conductividad térmica son alentadores disminuyendo la conductividad de los hormigones a medida que se incorpora mayor porcentaje de plástico.

Este caso de estudio presenta una herramienta que abre una posibilidad para conocer la opción más sostenible en la fase de diseño de proyecto; una vez conocidos los datos de inversión y los costos de explotación, se pueden diseñar diferentes opciones de hormigones calculando la huella ecológica y analizando cual será la más sostenible. Se pueden ensayar diferentes materiales y diferentes tipos de recursos de entrada con el fin de averiguar cuáles darán lugar a la mayor ecoeficiencia.

Se continuará con la investigación estudiando la incorporación del plástico multicapas al hormigón. Su dosificación, características mecánicas y de durabilidad y especialmente sus propiedades de conductividad térmica, a los fines de verificar su capacidad aislante. Para finalmente analizar las ventajas y puntos débiles, planificar medidas correctivas y así contribuir a la sostenibilidad reduciendo la HE del hormigón en Córdoba-Argentina.

REFERENCIAS

- ABNT NBR ISO 14.040: 2009 - Avaliação do ciclo de vida, princípios e estrutura.
- Aline de Oliveira S.; Dziejczak M.; Sato Daher C. (2011). "Análise do Ciclo de Vida, do Berço ao Transporte, do Concreto Usinado Destinado à Confecção de Estruturas de Edificações de Curitiba-PR". 53º Congresso Brasileiro do Concreto.
- Calkins M. (2008). Materials for Sustainable Sites: A Complete Guide to the Evaluation, Selection, and Use of Sustainable Construction Materials.
- Chambers et al. (2000). Metodología Eco-índice.
- Chambers et al. (2000). Sharing Nature's Interest. Ecological Footprints as an Indicator of Sustainability. London: Earthscan.
- Doménech J.L. (2007). Huella ecológica y desarrollo sostenible. AENOR. Asociación española de normalización y certificación. ISBN 9788481435177.
- Freitas J; Parchen C., Rodrigues Parchen M. F. (2010) Importância do concreto na geração de CO2 em um caso de obra de um edifício. 52º Congresso Brasileiro do Concreto. Centro Politécnico - Jd. das Américas - Curitiba.
- Häkkinen, T.; Vares, S. (1998); Environmental Burdens of concrete and concrete products, Technical Research Centre of Finland
- Jain et al.; (1977). Environmental Impact Analysis.

La Mañana de Córdoba. (2011) Medios del interior S. A. Córdoba - República Argentina.
Sánchez S.; Oshiro A.; Positieri M. (2012); "Cálculo de la huella ecológica del hormigón" Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. AATH.
Simmons, C., Lewis, K., Barratt, J., (2000). Two feet - two approaches Ecological.
Wackernagel M.; Rees W. (1996). Nuestra Huella Ecológica. Reduciendo el Impacto Humano sobre la Tierra. (2001) ISBN: 956-282-405-5. Título original. Our Ecological Footprint. Reducing Human Impact on the Earth.

ABSTRACT: Presents the results obtained of calculation of is Ecological Footprint of a conventional concrete used in the province of Cordoba-Argentina and proposed for the reduction of her Ecological Footprint concrete with coarse aggregate replacement for multilayer plastic from the CRESE (Company Waste Collection). Three families of concretes were designed: a concrete pattern without plastic, different with replacement of 10 % replacement of coarse aggregate for replacement plastic and other one with replacement of 20 %. There were evaluated his mechanical and thermal properties. The slump in the plastic concrete with incorporation decreases with increasing the percentage of plastic. In hard condition the difference of the resistance to compression between the concrete pattern and the concrete with incorporation of 20 % of plastic, is significant, with a thermal encouraging behavior. The results obtained indicate that aggregates plastics are suitable for use in the building industry.

Key words: Ecological Footprint, Concrete, Plastic.