

Análisis de Ciclo de Vida en la determinación de la energía contenida y la huella de carbono en el proceso de fabricación del hormigón premezclado. Caso estudio planta productora Región del Bío Bío, Chile.

Artículo recibido 13-05-14
 aceptado 12-08-14

Using Analysis of Life Cycle tool in determining the embodied energy and carbon footprint in the manufacturing processes of the ready-mixed concrete Case manufacturing plant Bío Bío region study - Chile

CLAUDIA MUÑOZ SANGUINETTI.
 Centro de Investigación de Tecnologías de la Construcción CITEC UBB, Departamento Ciencias de la Construcción. Universidad del Bío-Bío, Concepción Chile/
 clmunoz@ubiobio.cl

FRANCISCO QUIROZ ORTIZ.
 Facultad de Ingeniería. Universidad del Desarrollo, Concepción Chile/
 fquirozo@udd.cl

Palabras clave:
 energía contenida, emisiones de gases efecto invernadero, hormigón premezclado, análisis de ciclo de vida.

RESUMEN

El presente artículo muestra resultados acerca de la determinación de la energía contenida y la huella de carbono asociadas al proceso de fabricación de hormigones, en una planta premezcladora en la región del Biobío, Chile, a través de un Análisis de Ciclo de Vida simplificado. El inventario ambiental consideró primordialmente: transporte de materias primas, proceso de dosificación, carguío y despacho de los principales insumos materiales. Para todas estas actividades se cuantificaron consumos energéticos y emisiones de CO₂ durante un año de producción, excluyendo consumo energético y huella de carbono corporativa. Al aplicar el "inventario ciclo de vida" (ICV), según ISO 14040-2006, el caso de estudio mostró que para producir un metro cúbico de hormigón premezclado se requieren 342 MJ, lo que genera una huella de carbono de 26 Kg/CO₂. Al comparar este resultado con bases de datos internacionales, el mismo caso demostró ser un 37,5% más bajo en energía contenida y más de un 50% inferior en emisiones de CO₂.

Esta investigación permitió concluir que el proceso unitario con mayor impacto ambiental desde el punto de vista del consumo energético y emisiones de CO₂, está constituido por los transportes indirectos de las materias primas, principalmente áridos, que representan un 46% del total del sistema estudiado.

Keywords:
 contained energy, greenhouse gases emissions, ready-mixed concrete, Life cycle Assessment.

ABSTRACT

This paper shows the results of a simplified Life Cycle Assessment, made to determinate the energy and carbon footprint associated to the manufacturing process of a ready-mixed concrete plant in the Region of Biobío, Chile. The energy consumption and CO₂ emissions were measured during one year of production and excluding the corporate measure. The used environmental inventory mainly considers major inputs of raw materials transportation, dispensing process, loading and delivery. Applying the life cycle inventory (LCI) as ISO 14040-2006, the study case showed that, it is necessary 342 MJ, with a carbon footprint of 26 Kg/CO₂ to produce a cubic meter of ready-mixed concrete. Comparing these results with international databases, the study case proved to be a 37, 5% lower in embodied energy and more than 50% less of CO₂ emissions.

This investigation concluded that the unitary process with the most environmental impact, considering energy consumption and CO₂ emissions, it was related to the indirect transportation of raw materials, mainly aggregates, which represent a 46% of the total system studied.

1 INTRODUCCIÓN

A nivel global y local, la industria de la construcción contribuye significativamente al consumo de energía y de recursos naturales, así como a la generación de impactos ambientales, como emisiones a la atmósfera y generación de residuos. Esta situación ha motivado el interés por evaluar los impactos de las construcciones desde un enfoque de ciclo de vida, considerando las etapas de obtención de materias primas, manufactura, transporte, uso y demolición (Argüello, Aragüelles y Badillo, 2013).

Recientemente, se han propuesto indicadores y certificaciones relacionados con el desempeño energético de las edificaciones, lo que se ha traducido en una mayor atención a estos temas en toda la cadena de valor de este sector productivo. Aparte del consumo de electricidad y combustible que ocurre en las actividades de construcción y uso, también se constatan importantes requerimientos energéticos en las diferentes etapas de elaboración de los materiales utilizados en la construcción, por lo que éstos deben ser considerados implementando dicho enfoque de ciclo de vida (Zabalza, Aranda y Scarpellini, 2009).

Aunque no existe un método estándar para el cálculo de la energía incorporada en los materiales de construcción, sí se dispone de una definición generalmente aceptada: La energía incorporada de un material de construcción incluye toda la energía utilizada en los distintos procesos para llevar el material a su lugar en el edificio: desde la extracción de las materias primas, hasta su manufactura y construcción; debe incluir la energía asociada al transporte, así como la parte proporcional de los equipos y maquinaria necesarias para todos esos procesos. (Woolley *et al.*, 1997)

Si bien existen antecedentes de estudios que han evaluado el impacto del consumo energético de la edificación y su impacto ambiental asociado (García, Fortea y Reyes, 2012; Wadel Avellaneda y Cuchí, 2010; Zaragoza, 2010; entre otros), en Chile se desconoce cuál es la energía contenida en los materiales de construcción y su respectiva huella de carbono, la que podría diferir considerablemente con los datos de otros países, ya que éstos dependen de la matriz energética, la tecnología utilizada en cada proceso productivo y de los sistemas de transporte (Bustamante, 2009). En particular, interesa generar una base de datos nacional que incluya los principales insumos de construcción como, por ejemplo, el hormigón premezclado, el cual es uno de los materiales de construcción que presenta los principales aportes a la masa total de una edificación.

Al respecto, estudios realizados por el Instituto Nacional de Estadística (INE) (2007), han establecido que a nivel nacional el hormigón es el material con mayor utilización en edificaciones (considerando muros de edificios) en el país, alcanzando, en este sentido, un 38% del total nacional; tendencia mantenida hasta el año 2013, según el Informe de Macroeconomía y Construcción (Cámara

Chilena de la Construcción, 2013), en Figuras 1 y 2, se muestran dos ejemplos de proyectos de edificación con uso de material hormigón en Chile.

Según el Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón, la región del Bío Bío es una de las regiones con mayor producción de hormigón premezclado. En el mismo año 2013, se despachó un total de 826.770 m³ de ese material, lo que equivale al 11,2% del total nacional, lo cual permite que la región ocupe el segundo lugar a nivel nacional después de la Metropolitana (40,6%).



Fig. 1 Edificio Facultad de Medicina UFRO, Región de la Araucanía, Chile.



Fig. 2 Vivienda particular Lago Ranco, Región de los Ríos, Chile.



Fig. 3 Hormigón premezclado con alta fluidez.

2 ASPECTOS TEÓRICOS

Según la NCh 1934, un hormigón premezclado corresponde a un hormigón dosificado en una central hormigonera, mezclado en la misma central o en un camión mezclador, transportado a un lugar determinado y entregado en el sitio de la descarga.

El hormigón es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados pétreos y pasta. La pasta, compuesta de cemento y agua, une los agregados (gruesos y finos), para formar una masa semejante a una roca, pues la pasta endurece debido a la reacción química entre el cemento y el agua (Kosmatka y Panarese, 1992).

Adicionalmente y con la finalidad de mejorar las propiedades rheoplásticas de los hormigones y los tiempos de traslado y operación, el diseño y fabricación de hormigones premezclados considera la incorporación de aditivos químicos, dentro de los cuales pueden mencionarse: reductores de agua, súperplastificantes, incorporadores de aire, etc. La figura 3 muestra el efecto y aspecto de un hormigón premezclado mejorado a partir de la incorporación de un aditivo súperplastificante y reductor de agua.

La figura 4, ilustra de manera simplificada el ciclo de vida de un hormigón premezclado, considerando los diversos aspectos e impactos ambientales presentes en la cadena productiva del proceso, los que son parte del objeto de estudio, entre ellos: materias primas (cemento, áridos, aditivos, fundamentalmente), consumos energéticos y agua (transporte y producción), emisiones (GEI, residuos).

Los aspectos ambientales del ciclo de vida de un hormigón premezclado, se asocian principalmente a una alta demanda de materias primas naturales (agregados pétreos, agua), así como materias primas procesadas (cemento, aditivos), junto con un alto consumo energético, utilizado tanto en el proceso de producción como en el de transporte a la obra.

Otros importantes aspectos ambientales a tener en cuenta son la emanación de residuos sólidos (inertes) y líquidos (aguas residuales) y la generación de emisiones diversas (material particulado, CO₂, ruido, etc.), como también el impacto a la infraestructura vial (por traslado de materias primas y producto final).

Según Doménech (2007), el hormigón es el material de construcción más empleado en el mundo, y tras el agua, sería 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 arena y un billón de toneladas de agua. Aquí destaca que por cada tonelada de cemento, se requiere 1.5 toneladas de roca caliza y un gran consumo de combustibles fósiles (Sánchez y Positieri, 2012).

Desde el punto de vista del consumo energético y generación de gases de efecto invernadero (GEI), en el ciclo de vida de un hormigón premezclado, las mayores asignaciones estarían dadas por el aporte de la energía contenida en el material cemento, específicamente en la elaboración del *Clinker* (Carvalho, 2001). No obstante, dado que en Chile el foco de estudio ha tendido a centrarse en la cadena productiva del hormigón premezclado, desde una perspectiva operacional, no ha sido posible cuantificar cada uno de los *inputs* energéticos presentes en dicho proceso, a partir de un enfoque de ciclo de vida que considere las condiciones específicas de este país.

El presente trabajo muestra el desarrollo y obtención de resultados de un inventario ambiental, a partir del cual se determina la energía contenida y la huella de carbono asociada al proceso de fabricación de hormigones, en una planta premezcladora en la región del Biobío, Chile, poniendo en práctica el mencionado enfoque de ciclo de vida.

3 DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA

Para la determinación de la energía contenida y la huella de carbono asociada al proceso de fabricación de hormigones en una planta premezcladora, se ha escogido, como herramienta de gestión ambiental, el Análisis de Ciclo de Vida, de acuerdo a los principios normativos establecidos en la ISO 14.040 – 2006 (Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework), como asimismo en la “Especificación para la evaluación del ciclo de vida de las emisiones de gases de efecto invernadero de productos y servicios PAS 2050”.

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una técnica que permite determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto, compilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema, evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio (ISO 14040, 2006).

La metodología general del ACV, considera en su conjunto cuatro etapas o fases, según se muestra en la Figura 5: estructura de un Análisis de Ciclo de Vida; definición de objetivos y alcance; inventario; y evaluación de impacto. Resulta posible realizar estudios simplificados en los que se trabaje sólo con algunas de las etapas señaladas, dependiendo principalmente de los objetivos del estudio y la información disponible para la aplicación de esta herramienta.

En este caso y dado que el objetivo principal se centra en la obtención de energía contenida y huella de carbono (categorías de impacto: consumo energético y emisiones de CO₂), generado en el proceso de fabricación del hormigón premezclado, se trabaja con un Análisis

de Ciclo de Vida Simplificado (ACVs), considerando: definición de objetivos y alcance, análisis de inventario (ICV) e interpretación de resultados.

3.1 Definición del objetivo y alcance del estudio.

El estudio fue realizado en la región del Biobío, en la ciudad de Concepción, Chile. Se trabajó con la planta de hormigón premezclado con mayor cantidad de despachos en la provincia de Concepción, los que alcanzan, como promedio en el periodo 2011-2013, entre un 45 y 50% del total de despachos en esta zona.

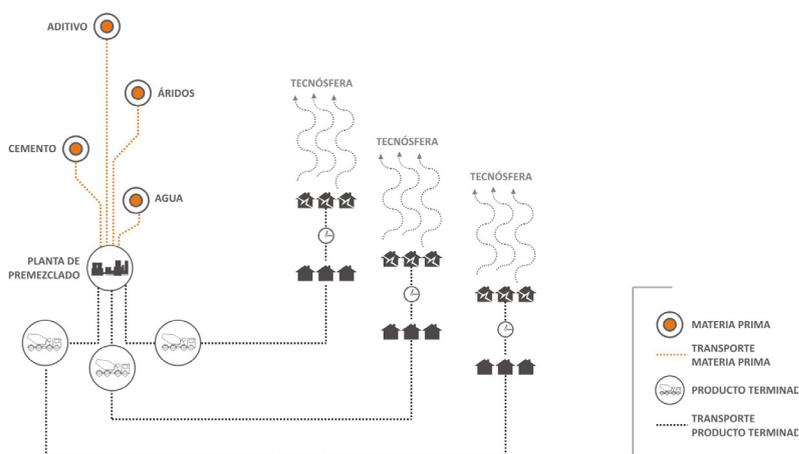


Fig. 4 Esquema simplificado ciclo de vida hormigón premezclado.

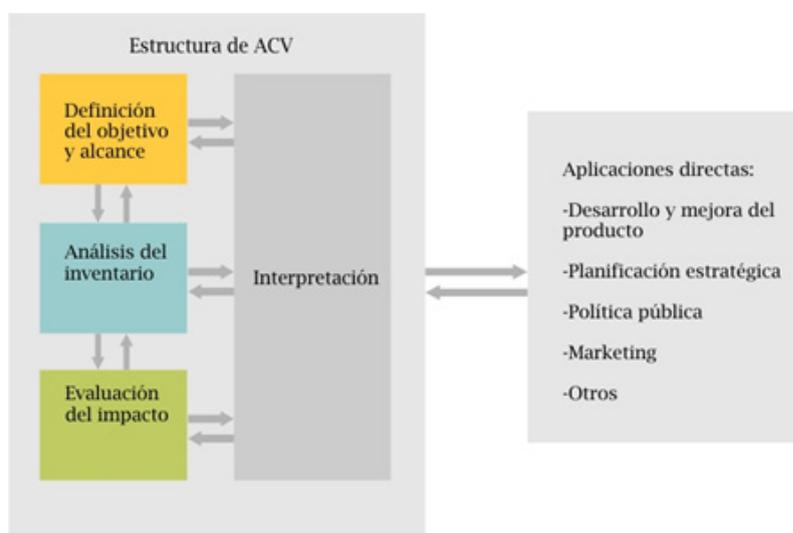


Fig. 5 Estructura de ACV. ISO 14.040–2006.

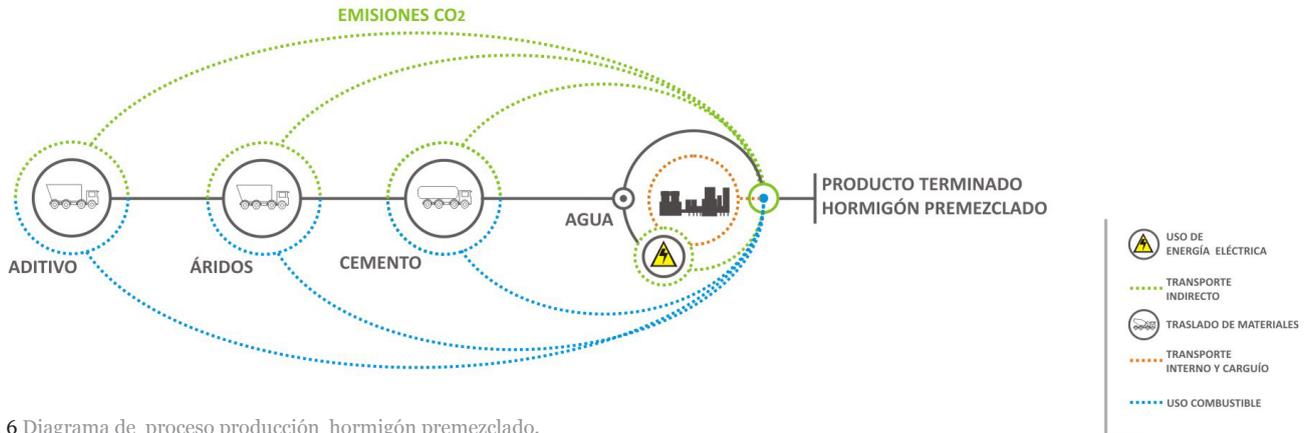


Fig. 6 Diagrama de proceso producción hormigón premezclado.

Para el estudio fueron contemplados los consumos de energías utilizadas en el proceso de fabricación del hormigón premezclado, esto es, máquinas y equipos, planta dosificadoras, cargadores frontales, camiones *mixer* y transporte de materias primas.

Dado que el objetivo del inventario ambiental se concentra solamente en los flujos elementales de la cadena productiva de fabricación, en este estudio no fueron considerados los consumos de energía generados por parte de la administración y recursos humanos que intervienen en el proceso.

De acuerdo a lo establecido en ISO 14.040-2006, se definió una *unidad funcional* correspondiente a m³/año y un *flujo de referencia* expresado en MJ/año.

Los límites iniciales del sistema, consideraron la evaluación de cada uno de los subprocesos, en los cuales la utilización de energía era incidente y significativa en el resultado final. Se exceptuaron aquellos procesos en donde el empleo del recurso energético era inferior al 5% del total del flujo final del proceso, de acuerdo a los principios normativos que rigen la investigación.

3.2 Inventario de ciclo de vida (ICV)

El análisis de inventario comprende la recolección de datos y procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas pertinentes de un sistema de producción (ISO 14040-2006).

En la realización del ICV, fueron analizados los aspectos ambientales presentes en cada proceso unitario, desde el punto de vista de las categorías de impacto asociadas al consumo energético y a las emisiones de CO₂.

En concreto, se consideraron las etapas principales referidas a los flujos energéticos del proceso. Para tal efecto, se trabajó con el diagrama de flujo del *sistema producto*, representado en la Figura 6, la cual muestra los procesos unitarios modelados, incluyendo sus interrelaciones sistémicas.

Aplicando como criterio la inclusión de datos, se consideró información primaria, obtenida de las bases de datos de producción de la planta estudiada, para una cobertura temporal de un año.

En el procesamiento de datos y obtención de resultados preliminares, y con la finalidad de determinar el grado de dispersión o variabilidad existente en el grupo de variables del estudio, fueron, por una parte, utilizadas herramientas estadísticas de tendencia central y de dispersión, para cada una de las entradas de materias primas y energías asociadas a la producción, y por otra, análisis de las salidas en el proceso de fabricación de hormigón premezclado, de acuerdo a la temporalidad estudiada.

A) Entradas: materias primas, combustibles y energía eléctrica.

a1) *Materias Primas*: áridos gruesos: grava y gravilla, áridos finos, cemento, aditivos químicos y agua.

a2) *Combustibles y Energía eléctrica*: Petróleo, utilizado en transporte directo (cargadores frontales y camiones *mixer* empleados en el mezclado del hormigón). Transporte indirecto, traslado de materias primas (cemento, áridos y aditivos). Energía eléctrica para funcionamiento planta dosificadora y bombas agua.

B) Salidas: Las salidas consideradas corresponden principalmente al producto final obtenido: el hormigón, pero también a las emisiones de CO₂.

b1) *Hormigón Premezclado*: Como una manera de simplificar el inventario ambiental, se consideró la totalidad del volumen de hormigón producido por la planta como un solo tipo de hormigón (producto final).

b2) *Emisiones de CO₂*: Emisiones que son cuantificadas

tanto para las emisiones directas como para las indirectas (traslados internos y transporte de materias primas), según lo señalado por el principio normativo PAS 2050.

En el tratamiento de cálculos para los datos de entradas y salidas (*inputs* y *outputs*) del sistema estudiado, y con respecto a las entradas de energía asociadas al transporte indirecto (proveedores), se estimó el consumo de petróleo de cada uno de los despachos de materias primas desde su lugar de origen hasta la planta de hormigón premezclado. Se contempló, asimismo, la distancia recorrida por cada uno de los proveedores, los rendimientos de los camiones y condiciones de retorno de estos (con o sin carga), dado que, según PAS 2050, la huella de carbono del producto aumenta si el camión regresa vacío a su lugar de origen.

En la Figura 7, se da cuenta del consumo anual de combustible por efecto del transporte de cada materia prima para la fabricación de hormigón premezclado, en el caso de estudio evaluado. A priori, se aprecia que los consumos de combustible anuales por transporte indirecto de materias primas correspondientes a áridos gruesos, son los que presentan el mayor gasto, debido a tres factores relevantes: la distancia recorrida, y la cantidad y frecuencia del transporte de estos materiales a la planta.

En el caso específico del árido fino, que es el material con mayor volumen entrante a la planta, el consumo de combustible para su transporte es menor en relación a los materiales nombrados con anterioridad, debido a la reducida distancia existente entre el punto de despacho y la planta estudiada, lo que evidencia que los resultados de este estudio podrían verse modificados de acuerdo a otras condiciones geográficas presentes en la planta de producción y/u origen de proveedores de materias primas.

Los consumos asociados al transporte directo -considerado como aquel transporte de materiales dentro de los límites de la planta- y al transporte indirecto -vinculado a los cargadores frontales y camiones *mixer*, en los cuales se contempla el combustible (petróleo), alcanzaron valores como media geométrica de 2.693 litros/año y 36.000 litros/año, respectivamente.

El consumo de combustible (diésel), por parte de los camiones *mixer*, se liga a la etapa de mezclado y homogenización del producto y a la de despacho, cuyo cálculo es variable y los resultados presentan cierto grado de incertidumbre, ya que son múltiples los puntos de despachos, como también las variaciones en las distancias y en la cantidad de metros cúbicos transportados.

El consumo de energía eléctrica se asocia, principalmente, al proceso de dosificación de la planta y funcionamiento de las motobombas, empleadas para la extracción de agua desde el acuífero existente, y a la extracción y pesaje de los aditivos. Debe considerarse que la energía eléctrica es proveniente del Sistema Interconectado

Central chileno (SIC), dato relevante a la hora de la cuantificación de la huella de carbono, dado que los resultados diferirían notablemente al considerar otro sistema, como lo es el Sistema del Norte Grande chileno (SING), cuya energía eléctrica se halla mayormente carbonizada, por lo que arrojaría un mayor valor en relación a la huella de carbono del producto estudiado.

De este modo, para el ICV analizado aquí, los resultados revelaron un consumo anual de energía eléctrica de 19,2x10³kWh, como promedio anual.

3.2.1 Cálculo energías contenidas y huella de carbono

A partir de la obtención de los resultados correspondientes a los consumos energéticos por concepto de transporte directo, indirecto y consumo de energía eléctrica por producción mensual, se determinó el consumo energético asociado a un mes de funcionamiento de la planta, el cual queda resumido en la Tabla 1.

Para el cálculo de la huella de carbono el procedimiento contempló las energías aportadas en cada subproceso y los factores de emisión de los combustibles y fuentes de energía utilizadas (diésel y energía eléctrica respectivamente) en cada proceso, de forma mensual y anual. En tabla 2, se muestran los resultados obtenidos respecto al proceso de fabricación de hormigón premezclado, con las consideraciones establecidas para este estudio.

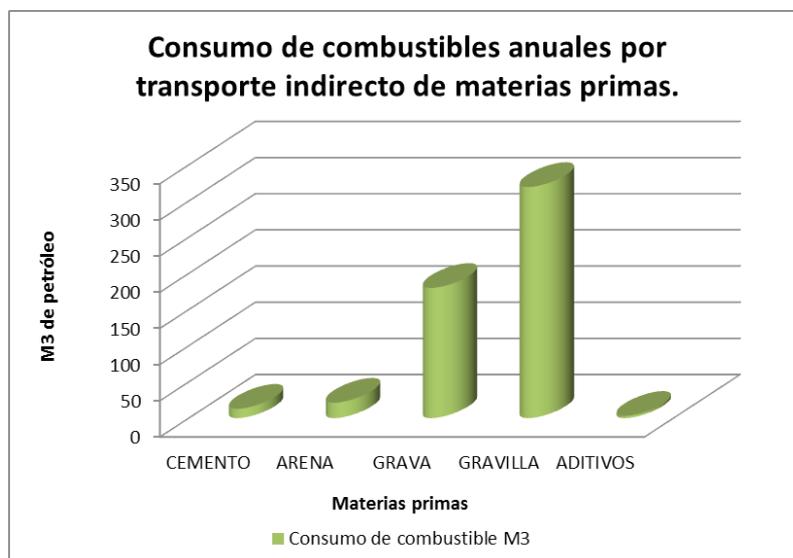


Fig. 7 Gráfico consumo de combustibles – transporte combustible.

Actividades	Mensual [MJ]	Anual [MJ]
Energía aportada por transporte indirecto	1.563.769	18.765.228
Energía aportada por transporte directo	1.381.469	16.577.628
Energía aportada por energía eléctrica	78.681	920.172
Total de energía consumida en Mega Joule	3.023.919	37.248.527

Tabla 1 Resumen energías en Mega Joule consumidas por actividad anual.

Actividades	Mensual [kg CO ₂ emitidos]	Anual [kg CO ₂ emitidos]
CO ₂ aportada por transporte indirecto	115.875	1.390.500
CO ₂ aportada por transporte directo	102.367	1.228.404
CO ₂ aportada por energía eléctrica	10.076	120.912
Total de CO ₂ aportado en el proceso de fabricación	228.318	2.813.673
CO ₂ emitido por metros cúbico producido	26	26

Tabla 2 Resumen emisiones CO₂ – proceso fabricación.

Actividades	Cálculo PCI (anual /MJ)	Cálculo PCS (anual /MJ)	Δ energías (MJ)
transporte indirecto	19.164.462,9	20.670.242	1.505.779
transporte directo	17.091.446	18.434.346	1.342.899
Total energía consumida (MJ)	37.248.527	40.097.206	2.848.679
Energía contenida anual (MJ/m ³)	342,2	368,4	26,2

Tabla 3 Resumen incidencia poderes caloríficos versus energías contenidas.

UNIDADES CASO 1	[MJ/m ³]	[kg CO ₂ /m ³]
Estudios SimaPro 7.3 Base de datos Ecoinvent.	55,95	256,78
Caso Estudio Chile	19,88	1,96
UNIDADES CASO 2	[MJ/m ³]	[kg CO ₂ /m ³]
ICE	547,2	74,9
Caso Estudio Chile	342,2	25,9

Tabla 4 Análisis comparativo bases de datos- caso estudio.

A partir de los resultados expresados en la Tabla 1, se puede inferir que, para un consumo energético de 37.248.527 MJ y considerando un volumen promedio de producción anual del orden de 108.848 m³, el valor de la energía contenida anual –en cuanto primera aproximación-, alcanzaría a 342,2 MJ/m³, con una huella de carbono de 26 kgCO₂/m³ producido (de acuerdo al valor indicado en la Tabla 2).

Asimismo, se puede señalar que los factores de emisión relacionados con consumo eléctrico, estimados para el Sistema Interconectado Central Norte Grande (SING) y para el Sistema Interconectado Central SIC, son de 1084 y 461 Kg CO₂ / MWh, respectivamente (Zaror, 2000); y que el factor de emisión ligado al diésel es de 3.186 kg CO₂/ton (Intergovernmental Panel of Climate Change, 2007).

3.2.2 Análisis de sensibilidad.

De acuerdo a lo establecido en la norma ISO 14040-2006, se realiza un análisis de sensibilidad para estimar los efectos que tienen los métodos elegidos y los datos sobre el resultado del estudio realizado.

De este modo, los resultados fueron sensibilizados considerando los poderes caloríficos inferior y superior del petróleo, presentes en el inventario de ciclo de vida estudiado, principalmente para las actividades de transporte indirecto y directo, y excluyendo la etapa de dosificación, debido a que esta sólo muestra consumo de electricidad (véase Tabla 3).

Al comparar los incrementos de energía entre las actividades modificadas, se puede apreciar una variación del 4.04% en el transporte indirecto y un 3.61 % en el transporte directo, con respecto al total de la energía utilizada en el proceso de fabricación y con respecto al poder calorífico inferior del petróleo.

En cuanto a la energía contenida, el análisis comparativo de los resultados expresados en la Tabla 3, revela un incremento porcentual del 7.6%, con respecto los 342.21 [MJ/m³] inicialmente estimados. La misma tendencia se da para las emisiones de CO₂ calculadas.

La importancia de realizar el análisis de sensibilidad en estas dos etapas radica, principalmente, en que ellas concentran el 97.4% de la energía utilizada en todo el proceso.

3.2.3 Análisis comparativo con bases de datos internacionales

A partir de los resultados obtenidos, se realiza un análisis comparativo empleando dos importantes bases de datos. La primera de ellas corresponde a ECOINVENT, base mundialmente reconocida por su amplia variedad de datos de inventario de ciclo de vida de materiales y procesos productivos. La segunda, ICE

(Inventory of carbon and energy), versión 2.0 (enero 2011), de la University of Bath, cuenta con estudios de distintos hormigones premezclados, los cuales asocian valores de energía contenida y emisiones de CO₂, para los diferentes grados de hormigón, en relación a su resistencia mecánica.

Para lograr la correcta comparación entre la producción total de hormigón premezclado de la planta en estudio, fue necesario acotar partes de los procesos unitarios buscando la similitud y disminuyendo la asimetría de los casos de estudio. De este modo, en dicho análisis comparativo no fue considerado el transporte indirecto y los despachos de hormigón fueron excluidos de la etapa de transporte directo. Para el cálculo de las emisiones de CO₂, se utilizaron los mismos criterios y simplificaciones.

No obstante y tal como se muestra en la Tabla 4, al comparar los resultados, se observa una alta disparidad, dada fundamentalmente por los límites de los sistemas estudiados y las condiciones específicas de los procesos productivos cotejados.

Al comparar las emisiones de CO₂, se aprecia que las producidas en el proceso productivo estudiado, alcanzan un orden de un 0,76%, con respecto a las generadas en la producción del hormigón de referencia (Ecoinvent). Esto podría deberse a la disparidad de los límites del sistema en estudio, como también a la diferencia en los tipos de combustibles utilizados, en los factores de emisión, en las tecnologías y/o en los equipos empleados.

En el análisis comparativo con base de datos ICE, se aprecia un diferencial del 37,5%, correspondiente a una cantidad de energía contenida mayor de 205 MJ/m³ de hormigón producido. Al igual que las distancias con Ecoinvent, estas pueden haberse generado aquí debido a la heterogeneidad de los límites del sistema estudiado, lo que hace visible, por tanto, la necesidad de contar con bases de datos que definan en forma clara los límites de los sistemas estudiados y, de tal manera, realizar comparaciones más rigurosas.

En relación a las emisiones de CO₂, es factible observar diferencias superiores al 50% entre un estudio y otro. De esta información, se concluye la importancia de los combustibles utilizados en cada estudio, donde los factores de emisiones cobran gran relevancia, junto con sus poderes caloríficos. Sumado a ello, se debe tener en consideración que las matrices energéticas de cada país son diferentes, en consecuencia, también lo son las emisiones asociadas a su producción de energía.

4 CONCLUSIONES

El ICV del proceso productivo del hormigón premezclado estudiado ha permitido establecer cuáles son los procesos unitarios que generan los mayores consumos energéticos. Así, es el transporte indirecto de materias primas el que aporta un 51,5% del consumo total de energía, a diferencia de los consumos internos de transporte directo y proceso de dosificación y carguío de la planta hormigonera, los que, combinados, representan un 48,6% del consumo total de energía. Se trata de los procesos unitarios más relevantes desde el punto de vista del consumo energético, de modo que es en ellos donde habría que formular medidas de ahorro, considerando que, además, constituyen actividades estratégicas dentro del proceso global.

Se advierte, asimismo, que la entrada de distintas materias primas a la planta conlleva un gasto o un consumo de energía asociado al transporte de estas, como lo es el elevado consumo de energía originado por el transporte de áridos, específicamente, de gravilla y grava, los cuales corresponden a cerca del 59,5% y 33,5%, respectivamente, del consumo total del transporte indirecto.

Del mismo modo, las mayores emisiones de CO₂ del sistema estudiado están vinculadas al transporte de agregados gruesos: gravilla, que representa un 28,7% del total de las emisiones anuales, y grava, que lo hace con un 16,9%. Por consiguiente, podemos concluir que tanto la energía contenida como las emisiones de dióxido de carbono asociadas al transporte indirecto de estos dos materiales, son las que presentan una mayor incidencia en todo el estudio.

A partir de estos resultados, surge la necesidad de considerar alternativas de estudio para evaluar los efectos de una posible reducción tanto de energía contenida como de huella de carbono, considerando variables determinantes como: uso de mejores tecnologías en maquinarias de transporte, con mayor rendimiento y menor cantidad de emisiones; aumento en la capacidad de carga de las máquinas de transporte; cercanía de los proveedores a la planta; frecuencia de los transportes; tipos de combustibles utilizados; uso de materias primas alternativas en la fabricación de hormigón, etc.

Como resultado final de la investigación se determinó que para producir un metro cúbico de hormigón premezclado en la planta en estudio, se requieren 342,2 Mega Joules de energía, los que generan 25,8 kg/CO₂. Ello, en comparación con otros estudios (con cierta simetría en los límites de los procesos), significa que dicha planta presenta un 64,46% más de la energía contenida y un 99,3% más de generación de dióxido de carbono, respecto a las emisiones calculadas.

Finalmente, y tal como señala Zabalza (2012), puede indicarse que el Análisis de Ciclo de vida (ACV) de los productos de construcción es altamente complejo. Esto, debido a las variadas dimensiones espaciales

y temporales que intervienen en sus procesos de producción, así como también a la propia estructura del sector, lo que dificulta la elaboración de un análisis completo del producto, desde el punto de vista medioambiental.

Los resultados de este trabajo son incipientes y buscan, principalmente, aportar en la investigación y al desarrollo científico e informativo de la construcción, en especial al área de diseño sustentable, con miras a generar criterios respecto a la elección de materiales, desde el punto de vista energético, y de cargas medio ambientales asociadas a su producción, a través de una estrategia de diseño integral con un enfoque de ciclo de vida.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo formó parte del proyecto Fondef D0911162 desarrollado por el Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción CITEC- UBB y del trabajo de Tesis Doctoral *Estudio de la energía incorporada y emisiones de GEI en el ciclo de vida de viviendas en Chile* para el Programa Doctorado en Arquitectura y Urbanismo (DAU) – Universidad del Bío-Bío Chile.

BIBLIOGRAFIA

ARGÜELLO Teresa, ARAGÜELLES Beatriz, BADILLO Rosa. Análisis de Ciclo de Vida y Ecodiseño para la construcción en México. México: Universidad Autónoma de San Luis de Potosí, 2013.

BUSTAMANTE, Waldo. *Guía de diseño para la eficiencia energética en la vivienda social*. Santiago de Chile: MINVU y Programa País de eficiencia Energética, 2009.

CARVALHO, Arnaldo. *Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento* – Aportaciones al análisis de los inventarios del ciclo de vida del cemento. Tesis Doctoral Universitat Politècnica de Catalunya – Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, España, 2001.

CÁMARA CHILENA DE LA CONSTRUCCIÓN. Informe Match N°33, agosto 2011, Chile [en línea]. Consultado 11 de octubre 2012. Disponible en: <http://www.cchc.cl/publicacion/informe-mach-33/>

DOMÉNECH, José Luis. *Huella Ecológica y desarrollo sostenible*. AENOR. Asociación española de normalización y certificación, 2007.

GARCÍA, Justo; FORTEA, Manuel y REYES, Antonio. Análisis comparativo en base a la sostenibilidad ambiental entre bóvedas de albañilería y estructuras de hormigón. *Rev. ing. constr.* [en línea]. 2012, vol.27, n°1, pp. 5-22.

ISO 14040:2006. *Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework*. Ginebra: ISO, 2006.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (INE). *Informe anual 2011*, Chile [en línea] Consultado 28 de agosto 2012. Disponible en: http://www.ine.cl/canales/publicaciones/calendario_de_publicaciones/anuario_edificacion_2011.pdf

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (Chile). *Hormigón preparado en central hormigonera*. NCh1934. Santiago, Chile, 1992.

INTERGOVERNMENTAL PANEL OF CLIMATE CHANGE (IPCC). Special Report: Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System. Chapter 7 Foams. *IPCC/TEAP* [en línea], 2007. Consultado 3 marzo 2011. Disponible en: <http://www.ipcc.ch>

KOMATZKA Steven y PANARESE William. *Diseño y control de mezclas de concreto*. México: Instituto Mexicano el Cemento y del Concreto, A.C., 1992.

PAS 2050. Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. Londres: BSI British Standards, 2011.

SÁNCHEZ Cleide y POSITIERI María. Contribución a la reducción de la huella ecológica del hormigón. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol.16, 2012.

WADEL Gerardo, AVELLANEDA José y CUCHÍ Albert. Sustainability in industrialized architecture: closing the materials cycle. *Informes de la Construcción*, 2010, vol. 62, n°517, pp. 37-51.

WOOLLEY, Tom; KIMMINS, Sam; HARRISON, Pat y HARRISSON, Rob. *Green Building Handbook V1*. London: E & FN Spon, 1997.

ZABALZA, Ignacio, ARANDA Alfonso y SCARPELLINI Sabina. LCA in buildings: State-of-the art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. *Building and Environment*, 2009, n°44, pp. 2510-2520.

ZABALZA Ignacio. Proyecto EnerBuiLCA: Desarrollo de una base de datos y una herramienta de análisis de ciclo de vida de edificios adaptada a la región sudoeste de Europa. *Congreso Nacional del Medio Ambiente (CONAMA)*, Madrid 10 al 12 diciembre 2012.

ZARAGOZA, Aniceto. Circuito cerrado para una industria sostenible, aportaciones del sector cemento. *Informes de la Construcción*, 2010, vol. 62, n°517, pp. 53-59.

ZAROR, Claudio. *Introducción a la Ingeniería Ambiental para la Industria de Procesos*. Chile: Universidad de Concepción, 2000.