

SUSTAINABILITY IN THE PREPARATION, TRANSPORT AND CASTING OF CONCRETE IN SPAIN: ANALYSIS OF ENERGY CONSUMPTION AND CO₂ EMISSIONS

Mel Fraga, José¹; Del Caño Gochi, Alfredo²; De la Cruz López, M.Pilar²

¹ Ministerio de Defensa, ² Universidad de La Coruña

Building a concrete structure involves not only concrete components production (cement, aggregate, steel reinforcement). It also includes mixing, transporting and casting operations. In Spain, the environmental impact of these processes has not been widely studied, for the moment. This work analyses energy demand and carbon dioxide emissions in ready-mix concrete plants, concrete mixer trucks, concrete pumping and vibrating equipment, based on technical information from manufacturers. These results are of interest for its use in the sustainability assessment of structural concrete, according to the Spanish reality.

Keywords: *Ready-mix concrete; Concrete mixer truck; Casting; Energy consumption; CO₂ emissions; Spain*

SOSTENIBILIDAD EN LA PREPARACIÓN Y PUESTA EN OBRA DE HORMIGÓN EN ESPAÑA: ANÁLISIS DE CONSUMO ENERGÉTICO Y EMISIONES DE CO₂

Además de los procesos de producción de los componentes del hormigón armado y pretensado (cemento, áridos, acero), la ejecución de una estructura de este tipo implica también operaciones de dosificación y mezclado, transporte, vertido y compactado, entre otras. El impacto ambiental de estos procesos no ha sido, analizado en profundidad, por el momento, al menos en nuestro país. Este trabajo ofrece una cuantificación de los consumos energéticos y emisiones de dióxido de carbono correspondientes a la preparación de hormigón en planta, al transporte de hormigón fresco en auto-hormigonera, al bombeo en obra y al vibrado, estimados en base a la información técnica ofrecida por fabricantes de los diferentes equipos. Estos resultados son de interés para el uso en la evaluación de la sostenibilidad de estructuras de hormigón, de forma que se ajuste a la realidad española.

Palabras clave: *Hormigón preparado; Auto-hormigonera; Puesta en obra; Consumo energético; Emisiones CO₂; España*

1. Introducción

1.1. Plantas de Hormigón Preparado

Las plantas de hormigón preparado tienen como objeto mezclar, en las proporciones adecuadas según la prescripción concreta para cada caso, los componentes que forman parte del hormigón (cemento, áridos, aditivos y agua) y cargar éste en los medios de transporte que lo trasladarán hasta su punto de utilización en obra.

Existen diferentes tipos de planta de hormigón, en función de sus características y tamaños (véase Tiktin, 1998). Estas instalaciones se encuentran distribuidas por toda la geografía española, dado que su radio de acción viene limitado por el tiempo máximo de permanencia del hormigón fresco en la cuba de transporte, que es de 1,5 horas (OFICEMEN y ANEFHOP, sin fecha). El número de plantas registradas era de 2.263 en 2006 (CEDEX, 2011) año en el que se registró el máximo histórico de producción de hormigón en nuestro país, con un total de 97.761.000 m³, según ANEFHOP (2013). A partir del tercer trimestre de 2007 comienza un descenso acusado de la producción, que en 2012 fue de 21.577.000 t, dentro del contexto general adverso de la economía española durante este periodo. Esta situación ha provocado el cierre de numerosas plantas. En el portal de la patronal del sector, ANEFHOP, se indica que en 2013 se encontraban activas 282 empresas. Normalmente cada una de ellas dispone de varias plantas. En algunos casos se trata de grandes grupos con un número elevado de instalaciones.

A grandes rasgos, puede describirse una planta de hormigón genérica del siguiente modo:

- La instalación dispone de almacenamientos para los áridos, habitualmente al aire libre, y el cemento, que se almacena en silos. Los aditivos se almacenan en tanques.
- Los componentes se mezclan con agua en una amasadora, según una dosificación predeterminada por la planta en función de las prestaciones requeridas al hormigón. Para conseguir las proporciones adecuadas se dispone de básculas para los distintos componentes.
- La mezcla fresca se carga en el camión cuba, que se encargará del transporte a obra.
- Hay un número relevante de plantas en las cuales se carga en seco el camión, y se añade el agua posteriormente.
- Se toman probetas para controlar la calidad del hormigón producido.
- El agua empleada puede proceder de captaciones propias o del exterior. Las plantas pueden disponer de sistemas de reciclaje del agua de lavado de las cubas y de los residuos de hormigón generados.
- Estas instalaciones pueden ser operadas por una plantilla muy reducida, dado su nivel de automatización.
- Existen también plantas móviles o temporales, que pueden instalarse en obra y evitar transportes por carretera. Son rentables si la cantidad de hormigón a emplear va a ser considerable (por encima de 25.000 m³, según indica un empresario del sector que ha sido consultado).
- La energía empleada es eléctrica. La potencia depende del tamaño y capacidad de la planta.

1.2. Transporte de Hormigón Fresco

Habitualmente el transporte de la masa fresca entre las plantas de hormigón y el emplazamiento de la obra se realiza por carretera, mediante auto-hormigoneras. Éstas son camiones dotados de una cuba giratoria en la que el hormigón se amasa en continuo durante el viaje. Para evitar el inicio del fraguado antes del vertido del hormigón, se limita el tiempo de permanencia en la cuba a 1,5 horas. Esto acota la distancia máxima de transporte que puede ser cubierta con garantías en dicho período de tiempo, que probablemente no va más allá de los 60-80 km, en el mejor de los casos. Dependiendo de las limitaciones de velocidad de las infraestructuras viarias, de los problemas de tráfico, y de las colas de espera de camiones que se pueden producir en las obras de mayor tamaño, estas distancias suelen ser sensiblemente menores que las que se acaban de mencionar.

La cuba puede ser accionada por el propio motor del camión, o ir montada sobre un semirremolque que incorpore un motor independiente. En ambos casos el combustible empleado es gasóleo, y los consumos dependerán de la capacidad del tambor. Se puede encontrar una descripción más detallada de estos equipos en Tiktin (1998).

1.3. Vertido y Operaciones en Obra

Una vez que el hormigón llega a la obra, las características de la misma y de los elementos estructurales que se van a ejecutar condicionarán los trabajos a realizar y los equipos empleados para ello. Por este motivo no es sencillo establecer una generalización a este respecto. Para alcanzar el objetivo de este trabajo, se ha decidido tener en cuenta las operaciones de bombeo y vibrado del hormigón, dado que ambas son comunes a gran parte de las obras actuales.

El bombeo de hormigón permite llegar a puntos de vertido más allá del alcance de la auto-hormigonera, tanto en horizontal como en vertical, y conseguir que el reparto del material en fresco sea más uniforme. Para ello se emplean bombas estacionarias o móviles, en este último caso montadas sobre camión o remolque. Existen también auto-hormigoneras que incorporan su propia bomba.

El vibrado es necesario para homogeneizar la mezcla, una vez vertida dentro de los encofrados, evitando la formación de coqueas en el seno del hormigón, o la acumulación de áridos en determinadas zonas. Un vibrado ineficiente o escaso puede ser la causa de problemas de durabilidad posteriores. Existen diferentes tipos de vibradores, aunque en general se trata de equipos portátiles de pequeño tamaño y potencia, dada su utilización manual.

2. Objetivos

Además del obvio consumo de cemento, áridos y acero, la ejecución de una estructura de hormigón requiere de una serie de procesos de preparación, transporte y vertido de dicho hormigón. El presente trabajo pretende abordar estos procesos desde el punto de vista del consumo energético y la emisión de dióxido de carbono, como factores contribuyentes al impacto global del hormigón dentro de su ciclo de vida. Esta comunicación se centra en ambos aspectos, como primera parte de un trabajo en curso que supone realizar modelos de evaluación de la sostenibilidad que tengan también en cuenta otros aspectos medioambientales, económicos y sociales.

A diferencia de estudios anteriores, relativos a la producción de cemento y de áridos, en este caso la dispersión y variabilidad de instalaciones y sistemas dificulta la obtención de datos estadísticos fiables que puedan extrapolarse a la generalidad del sector. Por este motivo el estudio se aborda desde el plano teórico, planteando una serie de hipótesis de

funcionamiento en base a la información técnica proporcionada por fabricantes de los principales equipos empleados.

3. Metodología

Las plantas de hormigón, auto-hormigoneras, bombas y vibradores son, en general, equipos comerciales que se venden o instalan por empresas especializadas. Para realizar el presente análisis de sus consumos energéticos y emisiones de dióxido de carbono se ha optado por estimar estos parámetros a partir de las características técnicas de la maquinaria, aportadas por los fabricantes. Desafortunadamente, en este caso no se dispone de una recopilación de datos reales procedentes de una empresa concreta o de una asociación de empresarios del sector.

El desarrollo del cálculo será detallado para cada uno de los casos estudiados en el apartado siguiente. Como metodología general se pueden indicar los siguientes pasos:

1. Consulta de los diferentes equipos existentes en el mercado.
2. Establecimiento del rango de tamaños o capacidades disponibles y estimación del valor más probable.
3. Determinación de la potencia consumida, en función de las especificaciones técnicas.
4. Valoración del consumo eléctrico o de gasóleo por unidad de volumen de hormigón manejado, y traducción del mismo a términos de energía primaria y emisiones de CO₂.
5. Estimación de los consumos y emisiones asociados al ciclo de vida del equipo / instalación.

La base de cálculo empleada será, en todos los casos, un metro cúbico (1 m³) de hormigón.

SEOPAN (2008) aporta datos generales de consumos energéticos en función de la potencia instalada, así como de los consumos secundarios (mantenimiento, reparación, etc.), expresados como un porcentaje de los anteriores. Aunque en dicha referencia estos consumos secundarios se contabilizan en términos económicos, se entiende que es asumible considerar los mismos porcentajes en términos energéticos. Se recopila esta información en la tabla 1.

Tabla 1. Consumos principales y secundarios en maquinaria de construcción (SEOPAN, 2008)

	Consumo principal	Consumo secundario
Gasóleo (L/h por kW instalado)	0,15 - 0,20	15% del consumo ppal.
Gasolina (L/h por kW instalado)	0,30 - 0,40	8% del consumo ppal.
Electricidad (kWh por kW instalado)	0,60 - 0,70	5% del consumo ppal.

Por otra parte, la tabla 2 recoge los factores de energía primaria y emisiones de CO₂ asociados a los consumos de gasóleo y de energía eléctrica, y al transporte por carretera, con indicación de las referencias de las que proceden.

Tabla 2. Factores de energía primaria y emisiones de CO2 para el gasóleo, la energía eléctrica y el transporte por carretera

Concepto		Referencia
Valor Calorífico Neto gasóleo (GJ/t)	43,00	Unión Europea (2007)
Factor Energía Primaria gasóleo	1,085	Furuholt (1995)
Factor Energía Primaria energía eléctrica 2010 (GJ/MWhe)	6,20	Mel et al. (2013)
Factor de emisión del gasóleo (tCO ₂ /tgasóleo)	3,182	Unión Europea (2007)
Factor de emisión en la producción de gasóleo	1,10	Furuholt (1995)
Intensidad energética transporte en camión (MJ/t·km)	1,470	Pérez y Monzón (2008) Eriksson et al. (1996)
Factor de emisión electricidad 2010 (tCO ₂ /MWhe)	0,301	Mel et al. (2013)
Factor emisión transporte en camión (kgCO ₂ /t·km)	0,980	Pérez y Monzón (2008) Eriksson et al. (1996)

4. Resultados

4.1. Plantas de Hormigón Preparado

Se han consultado los catálogos de varios fabricantes (Schwing-Stetter, 2013; Liebherr, 2013; Sany Group, 2013; Meka, 2013; Elkon, 2013; Putzmeister, 2013). Todos ellos ofrecen diferentes modelos de plantas, cuyas capacidades oscilan entre los 20 m³/h para una planta móvil compacta, hasta los 180 m³/h de una instalación estacionaria de gran tamaño. Analizando la potencia eléctrica total y la capacidad de las plantas ofrecidas por los fabricantes Schwing-Stetter y Meka, se observa que la relación entre ambos parámetros, dentro de un mismo fabricante y tipología de planta, se aproxima adecuadamente mediante una recta de regresión lineal.

Mediante las ecuaciones de las rectas de regresión de cada gráfica se han determinado las potencias teóricas de tres plantas, de capacidades pequeña (40 m³/h), mediana (100 m³/h) y grande (180 m³/h). A continuación se halla la media de las potencias, y ésta se divide por la capacidad de la planta para obtener la potencia eléctrica instalada por m³ de hormigón. Los resultados se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Potencia específica de plantas de hormigón.

Capacidad (m ³ /h)	Potencia Media (kW)	Potencia Específica (kW/m ³)
40	83,31	2,08
100	183,25	1,83
180	361,49	2,01

Con los datos anteriores se obtiene un rango de potencias por m³ de hormigón de 1,83 a 2,08 kW/m³. El valor medio dentro de este rango sería de 1,96 kW/m³.

Dadas las potencias específicas anteriores, se pueden obtener los consumos eléctricos correspondientes por m³ de hormigón, empleando el factor de 0,7 kWh/kW indicado en la tabla 1. El consumo resultante debe ser incrementado en un 5% para cubrir los consumos secundarios, como se indica en la tabla 1.

A falta de datos más precisos, se estima el impacto de las restantes etapas del ciclo de vida de la planta (fabricación, transporte, desmantelamiento y reciclaje) en otro 5% adicional sobre la energía consumida durante el funcionamiento. En SEOPAN (2008) se indica, de modo orientativo, que la vida media de este tipo de instalación es de aproximadamente 10.000 h, con un funcionamiento estimado de 1.000 h/año.

Por último, los consumos anteriores pueden ser traducidos en términos de energía primaria y emisiones de CO₂, mediante los factores indicados en la tabla 2. Los resultados de este proceso se reflejan en la tabla 4.

Tabla 4. Rango de valores obtenido para el consumo energético y la emisión de CO₂ por m³ de hormigón procesado en planta

Valor	Potencia específica (kW/m ³)	Consumo (kWh/m ³)	Consumo total (kWh/m ³)	Energía primaria (MJ/m ³)	Emisión CO ₂ (kgCO ₂ /m ³)
Mínimo	1,83	1,28	1,41	8,76	0,425
Medio	1,96	1,37	1,51	9,38	0,455
Máximo	2,08	1,46	1,61	9,95	0,483

De esta forma, el consumo energético asociado a la operación de una planta de hormigón se encontraría entre 8,76 y 9,95 MJ/m³, y la emisión de dióxido de carbono entre 0,425 y 0,483 kgCO₂/m³.

En otras comunicaciones de los autores al presente Congreso se han determinado estos parámetros ambientales para los principales componentes del hormigón estructural: el cemento, los áridos y el acero. En las plantas de hormigón preparado se incorporan, además, aditivos para mejorar las propiedades del material. Se ha obtenido información acerca de los mismos en Roncero (2011). La cantidad de aditivo añadida al hormigón es muy pequeña, suele estar por debajo del 1%, y por ello su impacto ambiental podría desprejiciarse. No obstante, se indican en la tabla 5 los factores energéticos y de emisiones de diferentes aditivos, citados por Roncero.

Tabla 5. Consumo energético y emisiones de CO₂ de aditivos empleados en la producción de hormigón (Roncero, 2011)

Parámetro	Aditivo					
	Plastificante	Super - Plastificante	Retardante de fraguado	Acelerador de fraguado	Incluser de aire	Hidrofugante de masa
Energía (MJ/kg)	4,60	18,30	15,70	22,80	2,10	5,60
Emisiones (KgCO ₂ /kg)	0,22	0,72	0,076	1,20	0,086	0,25

El rango de energías se encontraría entre 2,10 y 22,80 MJ/kg, y el de emisiones entre 0,076 y 1,2 kgCO₂/kg. Los aditivos plastificantes son los más empleados, dado que las consistencias más habituales en España son las blandas y fluidas, según la publicación indicada. Los incluseros de aire o los hidrofugantes de masa se emplean únicamente en aplicaciones muy concretas.

Es necesario también incorporar al cálculo la contribución realizada por los procesos de transporte de las materias primas. Dada la gran dispersión de instalaciones por todo el territorio nacional, estos transportes se realizan por carretera, de un modo muy mayoritario, aunque en el caso del cemento también se recurre al transporte ferroviario o marítimo.

Las distancias recorridas dependen del material. Los áridos habitualmente son de origen próximo, debido a su relativa abundancia y a que el transporte a grandes distancias multiplica su precio. Por este motivo se considera que la distancia de transporte puede oscilar entre 15 y 60 km. El cemento puede tener que realizar trayectos de mayor alcance, que podrían llegar a los 400 km; existen 35 fábricas de cemento repartidas por España, la mayoría en el entorno de grandes zonas urbanas o en la costa, que pueden expedir sus productos, bien directamente, bien a centros de distribución secundarios. Consultadas diversas fuentes del sector, se nos han propuesto los 200 km como valor más probable. Los aditivos, según Roncero (2011), suelen ser de fabricación local, proviniendo de subproductos de otras industrias o del refino del petróleo. Se toma para ellos un rango de entre 50 y 300 km, siendo el valor más probable el de 150 km. En la tabla 6 se indican los valores mínimos, medios y máximos de distancias de transporte considerados.

Tabla 6. Distancias mínimas, medias y máximas de transporte de los componentes del hormigón.

Componente	Distancia de transporte (km)		
	Mínima	Media	Máxima
Cemento	50	200	400
Árido	15	30	60
Aditivos	50	150	300

La cantidad que se necesita transportar de cada componente para producir 1 m³ de hormigón depende, como es evidente, de la dosificación empleada. La dosificación estará condicionada por el tipo de hormigón requerido. Las dosificaciones empleadas por las plantas de hormigón suelen ser reservadas, dado que en ellas radica parte de la ventaja competitiva de la empresa sobre sus competidores. Teniendo en cuenta que los hormigones más empleados en España son del tipo HA-25 y HA-30, se propone como base de cálculo una dosificación media con relación agua/cemento a/c = 0,57, usando 350 kg de cemento, 1.850 kg de áridos y 15 kg de aditivo por m³ de hormigón (2.400 kg). Con esta dosificación y los factores energéticos y de emisiones asociados al transporte por carretera, indicados en la tabla 2, se elabora la tabla 7.

Tabla 7. Valores mínimo, medio y máximo de energía y emisión de CO₂ en transporte de los componentes del hormigón a la planta por m³ de hormigón producido

Valor	Energía de transporte (MJ/m ³ hormigón)	Emisiones de transporte (kgCO ₂ /m ³ hormigón)
Mínimo	67,62	4,733
Medio	187,79	13,145
Máximo	375,59	26,291

4.2 Transporte de Hormigón Fresco

Consultando los catálogos electrónicos de varios fabricantes (Scwing-Stetter, 2013; Liebherr, 2013; Sany, 2013; Putzmeister, 2013), se encuentra que existen en el mercado

auto-hormigoneras con capacidades comprendidas entre los 6 y los 15 m³. Las cubas pueden ser accionadas por el propio motor del camión o incorporar un motor auxiliar independiente. En ambos casos, el consumo de combustible será mayor que en un transporte por carretera convencional.

Se ha observado que la potencia del motor del camión no está tan correlacionada con la capacidad de la cuba como ocurría en las plantas de hormigón preparado. De esta forma, las auto-hormigoneras Schwing-Stetter con capacidades entre 9 y 12 m³ comparten el mismo motor auxiliar de 88 kW, y los vehículos del fabricante Sany de entre 6 y 10 m³ emplean un motor de 240 kW para el conjunto camión – cuba.

El rango de valores de consumo energético y emisión de CO₂ durante el transporte del hormigón dependerá, por un lado, del vehículo empleado; a mayor capacidad de la cuba, menor será la repercusión de los consumos por m³ servido. Por otra parte, dependerá de la distancia recorrida; a mayor distancia, mayor consumo.

A continuación se determina, en primer lugar, el consumo por m³ de hormigón transportado, en base a la información ofrecida por Sany (2013) (la documentación de otros fabricantes no incluye los datos de potencia y consumo). La tabla 8 muestra las capacidades, potencias y pesos de los vehículos de su gama.

Tabla 8. Capacidad nominal, potencia del motor y peso en vacío de camiones hormigonera

Capacidad (m ³)	6	8	9	10	12
Potencia (kW)	240	240	240	240	292
Peso (kg)	14.000	14.000	14.800	14.800	16.500

Para el conjunto de vehículos anterior, el fabricante indica unos valores medios de consumo de gasóleo de 34 L/h con la cuba cargada y 32 L/h descargados, a una velocidad de 50 km/h. De esta forma se puede determinar el consumo por km, y a partir de ahí obtener la energía primaria consumida y las emisiones de dióxido de carbono, mediante los factores incluidos en la tabla 2.

Dado que también se conoce el peso de los vehículos, es posible realizar una estimación del impacto de la construcción del equipo en su ciclo de vida. Se asumen las siguientes hipótesis:

- El 90% del peso de la auto-hormigonera es acero.
- El acero empleado es el considerado como medio a nivel mundial (Hammond y Jones, 2011): 60% de acero primario y 40% de acero reciclado.
- Los consumos asociados al acero suponen el 95% de los correspondientes a la fabricación del vehículo.
- La vida útil media de una auto-hormigonera es de 6.500 horas. En SEOPAN (2008) se indica un rango de 5.000 a 8.000 h.
- La velocidad media durante su funcionamiento es de 50 km/h.

Además debe tenerse en cuenta que, como se indica en la tabla 2, los equipos diesel presentan unos consumos secundarios del orden del 15% del consumo principal, en mantenimiento y reparaciones. Con las hipótesis anteriores se obtiene que la energía y emisiones asociados a la producción del camión hormigonera se encuentran entre un 4,2 y un 4,9 % de las correspondientes a la vida útil del equipo (consumos principal y secundarios), en la línea de lo asumido para las plantas de hormigón y de lo indicado en

Eriksson et al. (1996) para el transporte ordinario por carretera (5%). La tabla 9 incluye los resultados de los cálculos realizados.

Tabla 9. Energía primaria y emisiones de CO₂ en transporte de hormigón fresco, por m³ y km

Capacidad (m ³)	6	8	9	10	12
Energía primaria (MJ/m ³ ·km)	2,627	1,970	1,758	1,582	1,329
Emisiones CO ₂ (kgCO ₂ /m ³ ·km)	0,197	0,148	0,132	0,119	0,100

De dicha tabla se obtienen rangos de energía primaria y emisiones de 1,33 a 2,63 MJ/m³·km y 0,10 a 0,20 kgCO₂/m³·km, respectivamente. Los valores medios son los correspondientes a la cuba de 9 m³: 1,758 MJ/m³·km y 0,132 kgCO₂/m³·km.

La segunda variable a considerar es la distancia de transporte. Ésta se encuentra limitada por el tiempo que puede permanecer el hormigón dentro de la cuba, que es de 90 minutos. A una velocidad media de 50 km/h, el alcance máximo serían 75 km. Consultando con empresarios del sector, se indica que distancias superiores a 60 km son muy infrecuentes, aunque dependen de las comunicaciones disponibles. Se adoptan 15 km como distancia mínima y 30 km como la más probable. A diferencia de otros tipos de transporte, en los que el viaje de retorno del camión puede ser aprovechado para mover otro material, en el caso de las auto-hormigoneras resulta evidente que siempre regresan vacías, por lo que es necesario contabilizar tanto el trayecto de ida como el de vuelta. En la tabla 10 se calculan la energía y emisiones correspondientes a los dos trayectos, para una cuba de 9 m³ de capacidad.

Tabla 10. Energía primaria y emisiones de CO₂ por m³ en transporte de hormigón fresco a diferentes distancias

Distancia (km)	15	30	60
Energía específica (MJ/m ³)	52,742	105,483	210,967
Emisiones específicas (kgCO ₂ /m ³)	3,964	7,929	15,857

4.3. Puesta en Obra del Hormigón

Los equipos a emplear para verter el hormigón y construir con él los diferentes tipos de elementos estructurales varían de una obra a otra, en función de las características y necesidades de ejecución. Para intentar disponer de un rango de valores similar a los determinados en apartados anteriores, se ha optado por estudiar dos procesos que pueden aparecer en gran parte de las realizaciones en hormigón, como son el bombeo y el vibrado. Adicionalmente se considerará un porcentaje sobre lo calculado para estas dos operaciones, como estimación de otras contribuciones no analizadas.

Para estimar los consumos y emisiones debidos al bombeo de hormigón se han empleado las características de una serie de bombas estacionarias convencionales del fabricante Schwing-Stetter, montadas sobre remolque y accionadas por motores diesel. Quedarían, en este aspecto, por debajo de las bombas de altas presiones empleadas en circunstancias especiales, y obviamente por encima de las obras en las que no se bombea hormigón. Las bombas seleccionadas y sus características se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Características de bombas de hormigón estacionarias

Tipo	Producción (m ³ /h)	Potencia (kW)	Peso (kg)
SP305	23	36	1520
SP500	35	54	2495
SP750	54	75	3334
SP2800	101	129	5000

Para este conjunto de equipos se han determinado sus consumos y emisiones de CO₂ principales, a partir del consumo teórico indicado en la tabla 1 (de 0,2 L de gasóleo por hora y kW) y de los factores de energía primaria y emisión de la tabla 2. Además, resulta necesario añadir a ambos resultados un 15% adicional en concepto de consumos secundarios (tabla 1). Por último, es preciso también valorar el impacto de la construcción de la máquina, basándose en el peso de la misma y en las consideraciones ya empleadas al hacer lo propio con las auto-hormigoneras en el apartado anterior, suponiendo que el 90% del peso es acero con composición 60% primario y 40% reciclado, la energía y emisiones asociados al acero suponen el 95% de los totales, y la vida útil media de una bomba es de 5.100 horas, según SEOPAN (2008). En la tabla 12 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 12. Energía primaria y emisiones de CO₂ por m³ en bombeo de hormigón en obra

Tipo	Energía primaria específica (MJ/m ³)	Emisiones específicas (kgCO ₂ /m ³)
SP305	14,285	1,072
SP500	14,109	1,059
SP750	12,690	0,953
SP2800	11,636	0,873

El rango de valores de energía primaria está entre 11,64 y 14,30 MJ/m³, con una media de 13,18 MJ/m³. En emisiones de CO₂, los extremos son 0,87 y 1,07 kgCO₂/m³, y la media 0,99 kgCO₂/m³.

Para estudiar los equipos de vibrado se utiliza el catálogo de vibradores de Dynapac (2013). En los vibradores de aguja se puede observar que la capacidad de vibración, en m³/h, depende del diámetro del vibrador, mientras que la potencia de los accionamientos (eléctricos o mecánicos) suele mantenerse constante para una familia de equipos. Se han seleccionado tres vibradores eléctricos y tres de gasolina, componiéndose cada terna con los dos extremos de la gama, de mayor y menor diámetro, más uno de tipo medio, como se muestra en la tabla 13.

A partir de los datos anteriores se desarrolla un cálculo, bajo el mismo esquema indicado anteriormente para las bombas de hormigón, y cuyos resultados se presentan en la tabla 14.

En este caso existen grandes diferencias entre los vibradores eléctricos, más eficientes, y los de gasolina, las cuales probablemente existan también en cuanto al coste. Sin embargo, los equipos accionados por motor de explosión siguen siendo necesarios en obras en las que no se dispone de electricidad en las inmediaciones. Los vibradores de pequeño diámetro, empleados para pilares, piezas de sección reducida o elementos muy armados, tienen una capacidad muy escasa, y ello hace aumentar fuertemente sus consumos energéticos y emisiones. El rango total de energía primaria estaría entre los 28,3 MJ/m³ del vibrador de gasolina de 25 mm de diámetro y los 0,21 MJ/m³ para el vibrador de 90 mm accionado eléctricamente por un convertidor de frecuencia, siendo el valor medio de 14,25

MJ/m³. En emisiones de CO₂, el rango va de 0,010 a 1,99 kgCO₂/m³, con un valor medio de 1 kgCO₂/m³.

Tabla 13. Características de vibradores de hormigón

Tipo	Producción (m ³ /h)	Potencia (kW)	Peso (kg)
AT29	1,5	1,47 (eléctrico)	6,3
AT59	20	1,47 (eléctrico)	8,9
AN90	40	1,8 (eléctrico)	44,3
AA25	1,5	3 (gasolina)	23,9
AZ56	20	3 (gasolina)	25
AA77	35	3 (gasolina)	42

Tabla 14. Energía primaria y emisiones de CO₂ por m³ en vibrado de hormigón en obra

Tipo	Energía primaria específica (MJ/m ³)	Emisiones específicas (kgCO ₂ /m ³)
AT29	4,492	0,219
AT59	0,338	0,016
AN90	0,212	0,010
AA25	28,340	1,989
AZ56	2,126	0,149
AA77	1,218	0,086

Por último, cabría considerar dentro de los cálculos anteriores otros procesos relacionados con la ejecución de estructuras de hormigón, que involucran utilización de maquinaria, consumos de recursos energéticos y emisiones atmosféricas de dióxido de carbono, por ejemplo, por utilización de grúas, equipos de fratasado, corte, o pulido, entre otros. Ante la creciente dificultad e imprecisión de estas estimaciones a medida que se profundiza dentro de la ejecución, se ha asumido que los procesos de puesta en obra estudiados (bombeo y vibrado) pueden suponer el 75% de los consumos y emisiones totales. De esta forma, los valores totales de energía primaria y emisión de dióxido de carbono por m³ de hormigón procesado en la puesta en obra quedarían como se indica en la tabla 15.

Tabla 15. Valores mínimo, medio y máximo de energía y emisión de CO₂ en la puesta en obra de 1 m³ de hormigón

Valor	Energía de puesta en obra (MJ/m ³ hormigón)	Emisiones de puesta en obra (kgCO ₂ /m ³ hormigón)
Máximo	56,80	4,080
Medio	36,57	2,653
Mínimo	15,80	1,173

5. Conclusiones

La tabla 16 resume los resultados obtenidos tras los análisis anteriores. Dichos resultados sirven para mejorar el modelo de cálculo de energía primaria y emisiones propuesto por Mel et al. (2013), para el cual se tomaron como valores de referencia 9,99 MJ/m³ y 0,97 kgCO₂/m³ para la producción de hormigón en planta, y 121,6 MJ/m³ y 9,0 kgCO₂/m³ para la puesta en obra. Estos factores procedían de la reelaboración de los indicados en Flower y Sanjayan (2007), para adaptarlos a las características del sistema eléctrico español. Como se observa, los resultados son similares en el caso de las plantas de hormigón, especialmente en cuanto a la energía consumida, y notablemente inferiores en cuanto a la puesta en obra.

Tabla 16. Resumen de resultados de los cálculos realizados

Concepto	Energía primaria (MJ/m ³)		Emisiones de CO ₂ (kgCO ₂ /kg)	
	Rango	Media	Rango	Media
Transporte de MMPP a planta de hormigón	69,65 – 386,85	193,43	4,733 – 26,291	13,145
Producción de hormigón en planta	8,76 – 9,95	9,38	0,425 – 0,483	0,455
Transporte de hormigón fresco a obra	52,74 – 210,97	105,48	3,964 – 15,857	7,929
Puesta en obra del hormigón	15,80 – 56,80	36,57	1,173 – 4,080	2,653

En Mel et al. (2013), los procesos de transporte suponían de media 259,95 MJ/m³ y 47,49 kgCO₂/m³. Mientras que el valor energético es similar, aunque inferior, a los indicados en la tabla 16, las emisiones resultan claramente inferiores en los cálculos actuales. Los factores para el transporte ordinario por carretera fueron, en aquel caso, tomados de Venkatarama y Jagadish (2003), mientras que los empleados en el transporte de hormigón se tomaron de Goggins et al. (2010). En Mel et al. (2013) se incluía además el transporte de las armaduras de acero, aspecto que queda fuera del trabajo que aquí se presenta.

Agradecimientos

Los trabajos reflejados en esta comunicación se enmarcan en el proyecto MIVES IV, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (proyecto código BIA2010-20789-C04-02)

6. Referencias bibliográficas

- ANEFHOP (accedido el 07.10.2013), Boletines Estadísticos Trimestrales, www.anefhop.com
- CEDEX (accedido el 27.01.2011), Catálogo de Residuos Utilizables en Construcción. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). www.cedexmateriales.vsf.es/view/default.aspx
- Dynapac – Atlas Copco Group (accedido el 07.10.2013), Catálogo 2013, www.dynapac.com.
- Elkon Concrete Batching Plants (accedido el 07.10.2013), Catálogo 2013, www.concretebatchingplants.com.
- Eriksson, E., Blinge, M., Lovgren, G., (1996). Life cycle assessment of the road transport sector. *The Science of Total Environment*, nº 189/190, págs. 69-76, PII: S0084-9697(96)05192-3.
- Flower, D., Sanjayan, J., (2007), Greenhouse gas emissions due to concrete manufacture. *International Journal on Life Cycle Assessment*, vol. 12, nº 5, págs. 282-288.
- Furuholt, E.,(1995), Life cycle assessment of gasoline and diesel. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 14, págs. 251-263.

- Goggins, J., Keane, T., Kelly, A., (2010), The assessment of embodied energy in typical reinforced concrete building structures in Ireland. *Energy and Buildings* vol. 42, págs. 735-744.
- Hammond, G., Jones, C., (2011). Inventory of Carbon and Energy (ICE). Version 2.0. Sustainable Energy Research Team, Dept. Of Mechanical Engineering, University of Bath, www.bath.ac.uk/mech-eng/serf/embodied.
- Liebherr (accedido el 07.10.2013), Catálogo 2013, www.liebherr.com.
- Meka Concrete Batching Plants (accedido el 07.10.2013), Catálogo 2013, www.mekaconcretebatchingplants.com.
- Mel, J., Del Caño, A., De La Cruz, P., (2013). Análisis del consumo energético y de las emisiones de CO₂ en la construcción de estructuras de hormigón en España. *Dyna. Ingeniería e Industria*, vol. 88, nº 1, págs. 59-67.
- OFICEMEN y ANEFHOP, (sin fecha). Manual de Consejos Prácticos sobre Hormigón. Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (OFICEMEN) y Asociación Nacional Española de Fabricantes de Hormigón Preparado (ANEFHOP).
- Pérez, P., Monzón, A., (2008). Consumo de energía por el transporte en España y tendencias de emisión. *Observatorio Medioambiental*, nº 11, págs.127-147.
- Putzmeister Ibérica (accedido el 07.10.2013), Catálogo 2013, www.putzmeister.es.
- Roncero, J., (2011). El papel de los aditivos químicos en la sostenibilidad. *Monografía ACHE (Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural): Sostenibilidad y Construcción*, págs. 151-166.
- Sany Group (accedido el 07.10.2013), Catálogo 2013, www.sanygroup.com.
- Schwing – Stetter Ibérica (accedido el 07.10.2013), Catálogo 2013, www.schwing.es.
- SEOPAN, (2008), Manual de Costes de Maquinaria 2008. Asociación de Empresas Constructoras de Ámbito Nacional (SEOPAN).
- Tiktin, J., (1998), Procedimientos Generales de Construcción – Procesamiento de Áridos, Instalaciones de Hormigonado, Puesta en Obra de Hormigón. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid. ISBN: 84-7493-205-X.
- Unión Europea. Decisión 2007/589/CE de la Comisión, de 18 de julio de 2007, por la que se establecen directrices para el seguimiento y la notificación de emisiones de gases de efecto invernadero de conformidad con la Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, 31 de agosto de 2007, núm. 229, pp. 33-34.