

SUSTAINABILITY IN THE PRODUCTION OF STEEL REINFORCEMENT 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

Steel reinforcement production is subject of study in an environmental life-cycle assessment of structural concrete. Due to the characteristics of the steel sector, an open access for detailed data related to plant operation (production, raw materials, fuels and electricity consumption) is not possible. Energy demand and carbon dioxide emissions for the Spanish sector have been studied analysing the literature and performing interviews with professionals from the steel sector. Results indicates an energy consumption range of 6,64 - 13,63 GJ/t and an emission range of 0,340-0,913 tCO₂/t, in case of recycled steel. Transport processes and reinforcement preparation are also studied. These results are of interest for its use in the sustainability assessment of structural concrete, in accordance with the Spanish reality.

Keywords: *Steel reinforcement; Rebar; Energy consumption; CO₂ emissions; Spain*

SOSTENIBILIDAD EN LA FABRICACIÓN DE ARMADURAS DE ACERO EN ESPAÑA: ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y DE LAS EMISIONES DE CO₂

La producción de armaduras de acero es uno de los procesos a estudiar dentro del análisis del impacto ambiental durante el ciclo de vida del hormigón. Debido a que las características del sector dificultan el acceso a información detallada acerca del funcionamiento de las plantas siderúrgicas (materias primas, combustibles, energía eléctrica, etc.), se ha tratado de estimar el consumo energético y las emisiones de dióxido de carbono asociadas, en el caso español, en base a las aportaciones de la bibliografía y a las consultas realizadas a profesionales españoles de la siderurgia. El rango de valores energéticos obtenidos es de 6,64-13,63 MJ/t, mientras que las emisiones se encuentran en 0,340-0,913 tCO₂/t, siempre teniendo en cuenta la utilización de acero reciclado. Se analizan también los procesos de transporte y preparación de armaduras (ferralla). 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: *Acero corrugado; Armaduras; Consumo energético; Emisiones CO₂; España*

Correspondencia: Alfredo del Caño. Universidad de La Coruña. Escuela Politécnica Superior. Campus de Esteiro. C/ Mendizábal, S/N. C.P. 15403. Ferrol, España

1. Introducción

Existen dos vías principales para la producción industrial de acero. El 69,7% de la producción mundial en 2011 (World Steel Association, 2012) procedió de plantas BOF (*blown oxygen furnace*) o integrales, en las que el mineral de hierro es reducido con carbón en un alto horno para dar lugar a un producto intermedio (arrabio), a partir del cual se obtienen los distintos tipos de aceros primarios. El resto de la producción se efectúa en acerías eléctricas o EAF (*electric arc furnace*), en las que se produce acero reciclado mediante la fusión de chatarra y aleantes en un horno de arco eléctrico. Al ser el acero un material de alta intensidad energética, su reciclaje es muy ventajoso energéticamente y medioambientalmente, como se reflejará en el presente documento.

Los aceros de mayor calidad necesitan ser producidos, en general, en las plantas integrales. Estas plantas son grandes complejos industriales, que integran a su vez varias fábricas diferentes (plantas de coque, de sinterizado, altos hornos, laminación, etc.), con un volumen de producción y de mano de obra muy elevados. En las plantas EAF, que suelen tener un tamaño mucho menor a las anteriores, la calidad del acero producido está condicionada por la calidad de la chatarra cargada en el horno como materia prima. Es posible mejorar esta calidad mediante operaciones de afino, aunque el incremento de coste que ello supone puede hacer que resulte poco rentable frente al proceso integral. Las plantas EAF pueden emplear también como materia prima productos primarios como el arrabio o los prerreducidos de hierro (DRI), si bien no es lo habitual en la actualidad. Según fuentes del sector que se han consultado, la carga de productos de alta calidad en los hornos eléctricos se reduce a lo imprescindible para evitar un empobrecimiento progresivo de la mezcla, siendo en todo caso un porcentaje muy pequeño del total.

Los aceros empleados en la fabricación de armaduras, alambres y cables para estructuras de hormigón armado y pretensado requieren en sus especificaciones menores contenidos de elementos de aleación que los destinados a otros usos (por ejemplo, la industria del automóvil), y por ello son producidos mayoritariamente en plantas eléctricas. En España el porcentaje de reciclaje puede llegar al 100%, dado que la única planta integral existente está orientada a la fabricación de productos planos.

En nuestro país la industria siderúrgica comenzó su andadura a principios del siglo XX (Cuesta, 2006), aprovechando la existencia de cuencas de carbón en el norte, y de yacimientos de mineral de hierro en diversos puntos de España. La primera planta integral española fue Altos Hornos de Vizcaya, fundada en Sestao en 1902. Al mismo tiempo, existían ya plantas de horno eléctrico. En 1950 se fundó con capital público la Empresa Nacional de Siderurgia (Ensidesa), que construyó una planta integral en Avilés. Posteriormente fueron construidos nuevos complejos en Gijón (Unisa) y en Sagunto (Altos Hornos del Mediterráneo). La siderurgia integral se enfrentó a una grave crisis y a un largo proceso de reconversión desde finales de la década de 1970, que finalizó con la desaparición de todos los altos hornos existentes en España, salvo los de Gijón, que fueron modernizados y tienen en Avilés la etapa siguiente de su proceso. Actualmente estas instalaciones pertenecen al grupo Arcelor-Mittal.

Paralelamente al declive de la siderurgia integral, las instalaciones de horno eléctrico cobraron mayor importancia que en otros países, ya desde los años 70 (Navarro, 2004). Al ser mucho menores sus costes de implantación y los tamaños mínimos de producción, se adaptaban mejor a las capacidades financieras de los empresarios españoles y al tamaño del mercado, resultando más competitivas que los altos hornos para productos largos de calidades medias y bajas. En la actualidad disponen de plantas de este tipo los grupos Arcelor-Mittal (en Zaragoza, Madrid y País Vasco), Celsa (en Cataluña y País Vasco), Megasa Siderúrgica (Galicia), Balboa (Extremadura) y Siderúrgica Sevillana, de los cuales

los tres primeros fabrican redondos corrugados. Existen además varias plantas dedicadas a la producción de aceros especiales.

La producción de acero, en miles de toneladas, a nivel nacional, europeo y mundial en 2003, 2007 y 2011 (World Steel Association, 2012) se muestra en la tabla 1. Destaca como característica del sector en España la elevada importancia de la producción de plantas eléctricas frente a las integrales, a diferencia de lo que ocurre a nivel europeo y mundial. También se observa que, tanto a nivel español como europeo, se ha producido un acusado descenso de la producción entre 2007 y 2011, a causa de la profunda y persistente crisis económica. En el caso de los aceros corrugados, la producción en 2011 fue del orden del 50% de la de 2007. Estos descensos, sin embargo, no se dan a nivel mundial.

Tabla 1. Producción de acero total y productos largos corrugados, en miles de toneladas (World Steel Association, 2012)

Ámbito		2003	2007	2011
España	Acero total	16.286	18.999	15.504 (24,8% BOF – 75,2% EAF)
	Corrugados	3.383	4.523	2.355
UE-27	Acero total	192.511	210.179	177.652 (58,5% BOF – 41,1% EAF)
	Corrugado	16.612	20.651	9.547
Mundial	Acero total	969.915	1.347.007	1.518.299 (69,7% BOF – 29,1% EAF)
	Corrugado	81.299	114.181	131.974

2. Objetivos

Existen en la literatura científica diversas publicaciones que analizan el perfil ambiental del acero, tanto el procedente de siderurgia integral como de acerías eléctricas. La Tabla 2 recoge aportaciones de diferentes fuentes e inventarios ambientales de productos de construcción, realizadas por Hammond y Jones (2011), Yellishetty et al. (2011), Dimoudi y Tompa (2008), Alcorn (2003), Burchart-Korol (2013), Sakamoto et al. (1999), Hu et al. (2006). Los datos ofrecidos proceden, en los tres primeros casos, de la World Steel Association; los restantes corresponden a análisis efectuados, respectivamente, en Nueva Zelanda, Polonia, Japón y China. Se han consultado además varios Análisis de Ciclo de Vida realizados en Europa para plantas EAF (en Italia, Suecia, Noruega, Dinamarca y Finlandia) publicados como Declaraciones Ambientales de Producto (International EPD System, 2013).

El acero es un elemento con una importancia capital dentro del estudio de la sostenibilidad de los sistemas estructurales, sean metálicos o de hormigón armado.

Dentro del marco general del estudio del impacto ambiental del hormigón, en términos de consumo energético y emisiones de dióxido de carbono, los autores han efectuado un primer análisis sobre el conjunto de procesos que intervienen en la creación de una estructura de hormigón (Mel et al., 2013). Posteriormente a su publicación, han analizado en mayor profundidad los aspectos anteriores en la producción de cemento y de áridos, en el funcionamiento de las plantas de hormigón preparado, en el transporte de hormigón fresco y en la puesta en obra del mismo. Una idea común de todos estos desarrollos paralelos es la de poder disponer de datos de inventario ambiental específicamente determinados para nuestro país y en el momento presente, de modo que posteriormente puedan ser utilizados para crear modelos de evaluación de la sostenibilidad basados en Análisis de Ciclo de Vida, con una menor dependencia de bases de datos internacionales que podrían no ser por completo extrapolables a la realidad del sector de la construcción en España. El presente

trabajo trata de completar a los anteriores, estudiando el perfil ambiental de las armaduras de acero corrugado, en cuanto al consumo de energía primaria y a la emisión de CO₂ en las diferentes etapas del proceso. Como se detallará a continuación, las circunstancias del sector de producción de acero no permiten, por ahora, el manejo y análisis de datos reales de producción de las plantas españolas, por lo que la intención inicial de esta comunicación se ve recortada y limitada al análisis de la bibliografía, su contraste con opiniones de expertos del sector y el estudio de aspectos complementarios, como los procesos de transporte. No obstante, se mantiene el objetivo de proporcionar una horquilla de valores de emisiones y consumo energético que puedan ser empleados en futuros desarrollos.

3. Metodología

A diferencia de lo que ocurre con el sector del cemento, para la producción de acero no existen recopilaciones estadísticas de acceso público en las que se detallen los consumos energéticos y de materias primas de las diferentes plantas de producción, así como el tipo y volumen de producción de cada una de ellas; existen estadísticas en la web de la Unión de Empresas Siderúrgicas (UNESID, 2013), pero son de carácter general para el conjunto del sector. Los expertos del sector a los que se ha consultado indican que el del acero es un sector muy competitivo, en el que cualquier información relativa al proceso puede tener carácter sensible. Esta opacidad impide el desarrollo de un análisis detallado, como se ha hecho para las fábricas de cemento.

Ante la ausencia de datos detallados se ha optado por realizar una revisión de bibliografía existente sobre el consumo de energía primaria y la emisión de CO₂ en la producción de acero. Dado que se ha podido confirmar con fuentes del sector que la práctica totalidad del acero empleado en España para la producción de armaduras corrugadas procede de acerías del tipo EAF, se orienta principalmente la revisión en este sentido. Se han consultado bases de datos ambientales, publicaciones relacionadas con análisis de ciclo de vida, y certificados ambientales de productos.

Por otra parte, se ha estimado el impacto del transporte del acero desde sus puntos de origen (las plantas siderúrgicas) hasta sus destinos finales, empleando los factores de energía y emisión por tonelada y kilómetro aportados por las referencias Pérez y Monzón (2008) y Eriksson et al. (1996). Las distancias de transporte que se consideran, tanto para la vía marítima como para la terrestre, proceden también de estimaciones efectuadas a partir de las entrevistas mantenidas con profesionales del sector del acero. Estos valores, que se detallan en el epígrafe siguiente, no proceden de un registro estadístico, y suponen una limitación del modelo empleado. Aun así, se considera que pueden representar de una forma aceptable al comportamiento del sector en nuestro país.

4. Resultados

En Remus et al. (2013) se incluye un rango de valores de consumo energético y emisiones para las plantas EAF europeas, procedentes de un estudio realizado en 2004 sobre instalaciones de 11 países. El rango de energías que se indica es de 14,54 a 26,93 MJ/t de origen eléctrico y 0,05 a 15 MJ/t provenientes de combustibles. Por otra parte, las emisiones de CO₂ se estiman entre 0,072 y 0,180 kgCO₂/kg. Es posible que las discrepancias entre estos valores y los registrados por la mayoría de la bibliografía consultada se deban a que en realidad los datos, según se indica en el propio documento, no proceden de un análisis de ciclo de vida completo, sino que están elaborados a partir de las entradas / salidas de las fábricas estudiadas. De esta forma las emisiones reseñadas se corresponderían con las emisiones directas de las plantas, pero no tendrían en cuenta importantes focos de emisiones "aguas arriba", como las procedentes de la generación eléctrica. Por este motivo, no se tendrán en cuenta estos valores a la hora de establecer los rangos de resultados.

En la tabla 2 se recopilan los valores de energía y emisión de CO₂ por kg de acero, tomados de diferentes fuentes bibliográficas. Se incluyen varios datos relativos a acero primario, de modo ilustrativo, aunque como se ha indicado se considerará que todo el acero corrugado empleado en España proviene del reciclaje de chatarra.

Junto a cada entrada de la tabla 2 se incluye la información relativa a las características del estudio que proporciona la referencia original. En la mayoría de los casos se trata de análisis de “cuna a puerta” (*cradle to gate*), en los que la frontera final del sistema se encuentra en la salida del material de la fábrica. Una vez que los productos de acero (redondos corrugados, alambres, mallas electrosoldadas) salen de la planta de producción, éstos deben de ser transportados hasta las plantas de ferralla, en las que se cortan y preparan para conformar las armaduras requeridas en cada proyecto. Las armaduras vuelven a ser transportadas hasta su destino final en la obra. El impacto ambiental de los transportes será tenido en cuenta aparte. En lo referente a los consumos imputables al corte, doblado y manipulación del acero en la ferralla, éstos serán estimados como un pequeño porcentaje de los valores correspondientes a la producción del material, ante la falta de datos.

Varios de los datos de la tabla 2 proceden de Declaraciones Ambientales de Producto (EPD, en sus siglas en inglés). Una EPD (International EPD System, 2013) es una declaración ambiental certificada, elaborada conforme a la norma ISO 14025:2006 (Etiquetas y declaraciones ambientales. Declaraciones ambientales tipo III. Principios y procedimientos; ISO, 2006). Estas certificaciones las emite un sistema internacional operado por el Swedish Environmental Management Council (SEMCo). Se han localizado EPD’s para varias plantas EAF italianas y para las fábricas que la empresa española CELSA posee en el norte de Europa.

Se observa que los datos procedentes de las fábricas italianas son muy similares entre sí, como también lo son los procedentes de las plantas de CELSA. Sin embargo, ambos grupos son diferentes entre sí, situándose respectivamente por encima de los máximos y por debajo de los mínimos indicados en Yellishetty et al. (2011). La explicación puede buscarse en la elevada importancia de la energía eléctrica dentro del acero EAF y las diferencias en los sistemas de generación de ambas regiones. Mientras que las plantas italianas indican que únicamente un 5-6% de su energía proviene de fuentes renovables, en las plantas danesas se alcanza el 40% de energía renovable y en las suecas el 48%.

España se encuentra en un punto intermedio entre las situaciones anteriores. En Mel et al. (2013) se han determinado los factores de emisión y consumo de energía primaria asociados a la generación eléctrica en nuestro país, obteniéndose que en 2010 las fuentes renovables han supuesto en torno a un 22% de la energía primaria de origen eléctrico. Considerando que los valores más elevados para acero reciclado, de los consignados en la tabla 2, son los correspondientes a la plantas de AcciAire di Sicilia y al análisis de ciclo de vida efectuado en instalaciones polacas (13,63 MJ/kg y 0,913 kgCO₂/kg, respectivamente) y los más bajos los correspondientes a Celsa Steel Service AS (6,64 MJ/kg, 0,340 kgCO₂/kg), se propone como valor más probable para el acero corrugado español la media de los anteriores, situada en el entorno de lo que las referencias Yellishetty et al. (2011) y Hammond y Jones (2011) proponen como valores medios. Estos resultados se resumen en la tabla 3.

Tabla 2. Consumo de energía primaria y emisión de CO₂ por kg de acero producido, según varias referencias bibliográficas

Tipo de Acero	Energía (MJ/kg)	Emisiones (kgCO ₂ /kg)	Fuente	Tipo de análisis
Acero general (típico mundial, 61% primario – 39% reciclado)	25,30	1,950		
Acero general 100% primario	35,4	2,890	Hammond y Jones (2011)	Análisis de “cuna a puerta” (<i>cradle to gate</i>) basado en datos internacionales de la World Steel Association.
Acero general 100% reciclado	9,40	0,470		
Acero reciclado en barras	8,80	0,45		
Acero primario BOF	19,80 – 31,20	-	Yellishetty et al. (2011)	Información procedente directamente de World Steel Association (2010).
Acero primario DRI+EAF	28,30 – 30,90	-		
Acero reciclado EAF	9,10 – 12,50	-		
Acero para armaduras, reciclado	9,9	0,474	Dimoudi y Tompa (2008)	Información recopilada en 2001, procedente de referencias internacionales.
Acero primario	31,3	1,242	Alcorn (2003)	Análisis híbrido (procesos / entradas y salidas) “cuna a puerta” realizado en Nueva Zelanda en 2003.
Acero reciclado	8,6	0,352		
Acero primario BOF	35,43	2,459	Burchart-Korol (2013)	Análisis de ciclo de vida según ISO 14040 realizado en Polonia (7 plantas EAF y 1 planta integral), en 2010 y 2011.
Acero reciclado EAF	8,07	0,913		
Acero primario BOF	25	2,15	Sakamoto et al. (1999)	Análisis por procesos realizado en Japón.
Acero reciclado EAF	9,4	0,56		
Acero primario BOF	25,50	1,97	Hu et al. (2006)	Estudio llevado a cabo en China en 2006.
Acero reciclado EAF	11,20	0,59		
Acero EAF corrugado Ferriera Valsabbia	11,65	0,689	International EPD System (2013)	Datos procedentes de EPD 2011 (Italia). Análisis “cuna a puerta”.
Acero EAF corrugado Alfa Acciai	13,06	0,754		Datos procedentes de EPD 2011 (Italia). Análisis “cuna a puerta”.
Acero EAF corrugado AcciAirie di Sicilia	13,63	0,780		Datos procedentes de EPD 2011 (Italia). Análisis “cuna a puerta”.
Acero EAF corrugado Feralpi Siderurgica	12,799	0,762		Datos procedentes de EPD 2011 (Italia). Análisis “cuna

a puerta”.

Acero EAF corrugado I.R. Odolesi	13,60	0,802	Datos procedentes de EPD 2011 (Italia). Análisis “cuna a puerta”.
Acero EAF corrugado Celsa Steel Service AB	7,91	0,360	Datos procedentes de EPD 2011 (Suecia). Análisis “cuna a puerta”.
Acero EAF corrugado Celsa Steel Service AS	6,64	0,340	Datos procedentes de EPD 2011 (Noruega). Análisis “cuna a puerta”.
Acero EAF corrugado Celsa Steel Service OY	7,24	0,390	Datos procedentes de EPD 2011 (Finlandia). Análisis “cuna a puerta”.
Acero EAF corrugado Celsa Steel Service A/S	7,48	0,430	Datos procedentes de EPD 2011 (Dinamarca). Análisis “cuna a puerta”.

Tabla 3. Rango de consumos de energía primaria y emisiones de CO₂ por kg de acero producido

Valor	Energía primaria (MJ/kg)	Emisiones (kgCO ₂ /kg)
Mínimo	6,64	0,340
Medio	10,14	0,623
Máximo	13,63	0,913

La energía suplementaria que es necesario invertir (y sus emisiones correspondientes) para realizar los procesos de preparación de las armaduras, fuera ya de la planta siderúrgica, es atribuible a maquinaria de taller o portátil (cortadoras y dobladoras, soldadura, etc.) y se estima que puede tener un valor muy inferior a los atribuidos a la producción del acero. A falta de datos sobre los que trabajar, se estima un 3% de los valores anteriores. Los resultados se agrupan en la tabla 4.

Tabla 4. Rango estimado de consumos de energía primaria y emisiones de CO₂ en la preparación de armaduras (ferralla)

Valor	Energía primaria (MJ/kg)	Emisiones (kgCO ₂ /kg)
Mínimo	0,20	0,010
Medio	0,30	0,019
Máximo	0,40	0,027

El último aspecto por estudiar es el transporte del acero, que se divide en dos etapas: de la planta siderúrgica a la planta de ferralla, y de la planta de ferralla a la ubicación de la obra. Según las fuentes del sector que se han consultado, la mayoría del acero corrugado empleado en España es de origen peninsular, no estando el mercado repartido en base a la ubicación geográfica de las fábricas. Existen tres productores de redondos corrugados (Arcelor-Mittal, Megasa Siderúrgica y Celsa), que sirven pedidos en toda la península. Para el transporte entre la siderúrgica y la planta de ferralla, en determinados casos se utiliza el transporte marítimo, aunque lo más habitual es el transporte por carretera. En el mercado interior las distancias máximas que recorren los camiones pueden estar en el orden de 1200 km (dos días de viaje), mientras que lo más frecuente es realizar viajes de un día (hasta 600

km). Como valor mínimo se podría tomar el mercado local, con distancias del orden de 100 km. Es una práctica habitual que se procure que los viajes de vuelta de los camiones se hagan cargados con otra mercancía (por ejemplo, chatarra empleada como materia prima en las fábricas) para reducir los costes. Por este motivo, a efectos de cálculo se tiene en cuenta únicamente el viaje de ida.

El transporte entre la planta de ferralla y la obra sí se realiza íntegramente por carretera, siendo estas distancias mucho menores a las anteriores. Se han considerado una distancia máxima y mínima, respectivamente, de 200 y 50 km. La distancia media se estima en 100 km.

El impacto de estos transportes se evalúa empleando los factores de energía y emisiones propuestos por Pérez y Monzón (2008), de 1,4 MJ/t·km y 0,098 kgCO₂/t·km respectivamente para el transporte por carretera y 0,40 MJ/t·km y 0,0309 kgCO₂/t·km para el transporte marítimo entre puertos nacionales (cabotaje). Estos factores se incrementan un 5% en el caso del transporte por carretera, según lo propuesto por Eriksson et al. (1996) para tener en cuenta las contribuciones de todas las etapas del ciclo de vida de los medios de transporte. Lo mismo se hace para el transporte marítimo, en este caso con un incremento del 1%. Para evaluar la contribución del transporte marítimo en los recorridos entre la fábrica y la planta de ferralla, se supone que los viajes de 100 km se realizan exclusivamente por carretera, en los de 600 km se pueden realizar un 20% en barco, y en los de 1200 km un 30%. Los resultados se muestran en las tablas 5 y 6.

Tabla 5. Rango estimado de consumos de energía primaria y emisiones de CO₂ en el transporte de aceros corrugados entre la planta siderúrgica y la planta de ferralla

Valor	Energía primaria (MJ/kg)	Emisiones (kgCO ₂ /kg)
Mínimo (100 km)	0,147	0,0103
Medio (600 km)	0,754	0,0531
Máximo (1200 km)	1,380	0,0977

Tabla 6. Rango estimado de consumos de energía primaria y emisiones de CO₂ en el transporte de aceros corrugados entre la planta de ferralla y la ubicación de la obra

Valor	Energía primaria (MJ/kg)	Emisiones (kgCO ₂ /kg)
Mínimo (50 km)	0,073	0,0052
Medio (100 km)	0,147	0,0103
Máximo (200 km)	0,294	0,0206

5. Conclusiones

La tabla 3 presenta un rango de valores de energía primaria y emisión de dióxido de carbono por tonelada de acero producido en plantas EAF, que pueden ser utilizados para modelar el comportamiento ambiental de los elementos estructurales que incorporan el acero como materia prima. Al no haber sido posible determinarlos a partir de parámetros reales de la industria española, se ha procedido a realizar una estimación indirecta, promediando los valores disponibles en países de nuestro entorno, asignados a instalaciones similares a las existentes en España. Esta limitación, ya expuesta anteriormente, hace necesario indicar que estos resultados se quedarían obsoletos en el momento en que trabajos posteriores permitiesen caracterizar la producción española de acero en base a datos reales de producción. Esto podría suceder si el sector del acero, como ha hecho el sector cementero a través de Oficemen, evolucionase para aportar a la

sociedad este tipo de datos. Idénticas consideraciones son aplicables a los resultados referidos a la preparación de ferralla (tabla 4) y a los procesos de transporte (tablas 5 y 6).

La importancia del suministro eléctrico, como principal fuente de energía, dentro del proceso de producción de acero reciclado, hace que los parámetros de emisión y consumo de energía primaria puedan variar notablemente entre un país y otro, aun cuando en ambos casos la tecnología de producción sea similar.

A modo de ejemplo, en Flower y Sanjayan (2007) se realiza un estudio de emisiones asociadas al sector del hormigón en Australia, concretamente en el estado de Melbourne. Se indica que el factor de emisión del sistema eléctrico considerado, para 2004-2005, es de valor 1,392 tCO₂/MWh. Este factor es más de 4 veces superior al calculado para España en 2010 (Mel et al., 2013). Esto se debe a la gran diferencia entre los "mix energéticos" español y australiano. En los años en que se realizó el estudio, más del 90% de la energía eléctrica australiana procedía de centrales térmicas de carbón, mientras que en España esta fuente supuso menos del 17% en 2010. Dentro de las referencias empleadas en el presente trabajo (International EPD System, 2013) se observa cómo la diferencia entre los niveles de emisiones de las plantas EAF italianas y las situadas en el norte de Europa reflejan los diferentes sistemas energéticos: predominio de las energías fósiles en Italia, frente a un porcentaje elevado de contribución de la energía hidroeléctrica en Suecia, Noruega, Finlandia y Dinamarca.

La ya mencionada ausencia de datos no ha permitido realizar un análisis en mayor profundidad de la producción de redondos corrugados en España. En este sentido, cobra importancia la existencia de iniciativas como las declaraciones EPD, aunque por ahora son un número muy reducido de plantas las que disponen de ellas, o las declaraciones ambientales EMAS. Esta clase de certificaciones aumentan la transparencia de las instalaciones en términos ambientales, pudiendo ser un aspecto a valorar positivamente en procedimientos de evaluación de la sostenibilidad de los sistemas estructurales, como el incluido en el Anejo 13 de la EHE-08 (Ministerio de Fomento, 2008).

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

- Alcorn, A., (2003). Embodied energy and CO₂ coefficients for NZ building materials. Centre for Building Performance Research, Victoria University of Wellington.
- Burchart-Korol, D., (2013). Life cycle assessment of steel production in Poland: A case study. *Journal of Cleaner Production*, vol. 54, págs. 235-243.
- Cuesta, A. (2006). La reconversión de la siderurgia integral española, un modelo exportable. *Técnica Industrial*, nº 263, págs. 40-46.
- Dimoudi, A., Tompa, C., (2008). Energy and environmental indicators related to construction of office buildings. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 53, págs. 86-95.
- 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.
- 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/sert/embodied, accedido el 05.06.2013.

- Hu, C., Chen, L., Zhang, C., Qi, Y., Yin, R., (2006). Emission mitigation of CO₂ in steel industry: Current status and future scenarios. *Journal of Iron and Steel Research International*, vol.13, págs. 38-42.
- International EPD System, (2013). www.environdec.com, accedido el 05.06.2013.
- International Organization for Standardization (ISO), (2006). ISO 14040:2006 "Environmental labels and declarations - Type III environmental declarations - Principles and procedures".
- 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.
- Ministerio de Fomento. Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio, por la que se aprueba la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08). *Boletín Oficial del Estado*, 22 de agosto de 2008, núm. 203.
- Navarro, M. (2004). La larga marcha de la siderurgia española hacia la competitividad. *Economía Industrial*, nº 355-356, págs. 167-184. ISSN: 0422-2784.
- Pérez, P., Monzón, A., (2008). Consumo de energía por el transporte en España y tendencias de emisión. *Observatorio Medioambiental*, nº 11, págs.127-147.
- Remus, R., Aguado, M.A., Radier, S., Delgado, L., (2013). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for iron and steel production. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, JRC 69967, ISBN 978-92-79-26475-7.
- Sakamoto, Y., Toonoka, Y., Yanagisawa, Y., (1999). Estimation of energy consumption for each process in the japanese steel industry: A process analysis. *Energy Conversion and Management*, vol.40, nº 18, págs, 1129-1140.
- Unión de Empresas Siderúrgicas (UNESID), (2013). www.unesid.org, accedido el 05.06.2013.
- World Steel Association (2013). Steel Statistical Yearbook 2012. www.worldsteel.org, accedido el 02.06.2013.
- Yellishetty, M., Mudd, G., Rasjith, P., Tharesmarajah, A., (2011). Environmental life-cycle comparisons of steel production and recycling: Sustainability issues, problems and prospects. *Environmental Science and Policy*, nº 14, págs. 650-663.