

Cuantificación de las variables que determinan la huella de carbono y energía embebida de los distintos productos de cerámica estructural (cuna a puerta con opciones)

R. DÍAZ RUBIO¹; M. DEL RÍO MERINO²

¹AITEMIN-Centro Tecnológico (Toledo-España)

²E.T.S. de Edificación. UPM (Madrid-España)

La producción y el transporte a obra de los productos cerámicos de carácter estructural supone un importante consumo energético, que conlleva la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera.

El objetivo de la investigación es demostrar la existencia de importantes diferencias en el valor del impacto ambiental asociado a los productos de cerámica estructural fabricados en España. Para ello, se establece un método de identificación y cuantificación de las variables que determinan la Huella de Carbono y Energía Embebida de los productos cerámicos, en función de la tipología de producto. La información necesaria se obtiene principalmente con recogida de datos de fábricas. Se determinan 6 variables con influencia global en el impacto ambiental, 44 variables principales y 39 secundarias, estableciendo las fórmulas de cálculo a partir de dichas variables.

Los resultados determinan que, para unas mismas condiciones de fabricación, las diferencias entre productos cerámicos llegan hasta un 27 % para Huella de Carbono y un 35 % para Energía Embebida. La relevancia que alcanza el impacto asociado al transporte del producto a obra puede llegar hasta un 40 % del total.

Se considera que la investigación realizada y sus resultados pueden contribuir a la reducción del impacto ambiental de la edificación.

Palabras clave: Huella de Carbono, Medioambiente, Materias primas, Cerámica roja, Aplicaciones estructurales.

Quantification of variables that determine the carbon footprint and energy embodied of structural clay products (cradle to gate with options)

The production and transport of structural ceramic products involves an important energy consumption, which leads to the emission of greenhouse gases into the atmosphere.

The aim of the research is to demonstrate the existence of significant differences in the value of the environmental impact of structural ceramic products manufactured in Spain.

To achieve this objective, is developed a method of identifying and quantifying of variables that determine the Carbon Footprint and Embodied Energy of ceramic products, depending on the type of product. The necessary information is obtained mainly with a data collection in factories.

It is established six variables with a global influence in the environmental impact, 44 primary and 39 secondary variables, establishing calculation formula from these variables.

The results determined that, for same manufacturing conditions, the differences between ceramic products reach 27 % for carbon footprint and 35 % for Embodied Energy. The relevance that reaches the impact of transport can reach 40 % of the total.

It is considered that the research and its results can contribute to reduce the environmental impact of the buildings.

Keywords: Carbon footprint, Environment, Raw Materials, Red ceramics, Structural applications

Cómo citar este artículo: Díaz Rubio, R.; Del Río Merino, M. (2014): Cuantificación de las variables que determinan la huella de carbono y energía embebida de los distintos productos de cerámica estructural (cuna a puerta con opciones), *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr.*, 53 (4): 194-206. <http://dx.doi.org/10.3989/cyv.232014>

1. INTRODUCCIÓN

La lucha contra el cambio climático se ha convertido en un elemento clave a considerar en el desarrollo de los productos para la construcción. En este contexto, la cuantificación de los gases de efecto invernadero (GEI), asociados al ciclo de vida de los productos es un aspecto fundamental en el desarrollo de los mismos.

Por otra parte, e íntimamente ligado a lo anterior, el consumo energético, creciente desde hace dos décadas en

todos los países occidentales, está teniendo como consecuencia el agotamiento de los recursos naturales, con el consiguiente impacto que esto supone para el medio ambiente. En este contexto, la evolución de la sociedad —y las empresas— hacia una economía de bajo carbono se convierte en requisito indispensable para alcanzar un crecimiento sostenible que, al mismo tiempo, genere riqueza y empleo.

El sector de la edificación, históricamente uno de los motores de la economía española, consume alrededor del 60 % de los recursos que se extraen del planeta (considerando el ciclo de vida completo del edificio), generando más del 40 % de emisiones de gases de efecto invernadero (1). En el caso concreto de los productos cerámicos para aplicaciones estructurales, las emisiones de CO₂ adquieren especial interés, al ser uno de los sectores industriales incluidos en el Plan Nacional de Asignación de Derechos de Emisiones (2) y un sector de uso intensivo en energía, donde los costes energéticos suponen entre el 35 y el 50 % de los costes de producción.

Pero para poder acometer medidas de ahorro energético y reducción de emisiones, es necesario conocer previamente las magnitudes de estos parámetros, que serán la base para la evaluación y validación de las distintas medidas de ahorro y/o mejoras que permitan el avance hacia las mejores soluciones a los problemas ambientales planteados. Una de las herramientas de mayor relevancia para actuar sobre estos impactos es la "Huella de Carbono" e, íntimamente ligada a la misma, la cuantificación de "Energía Embebida" de los productos.

1.1. Huella de Carbono y Energía Embebida

La *Huella de Carbono* (HdC) se define, según el informe ISO/TS 14067:2013 como el "Sumatorio de emisiones de gases de efecto invernadero (y retirada) en un sistema de producto, expresado como CO₂ equivalente y basado en una evaluación del ciclo de vida" (3).

Se puede decir que la HdC es una versión simplificada de un Análisis de Ciclo de Vida en el que, en lugar de considerar varias categorías de impacto ambiental al mismo tiempo, se considera únicamente una de ellas, la relativa a Calentamiento Global. La creciente importancia de la HdC queda reflejada en la publicación del Real Decreto por el que se crea el registro de Huella de Carbono, compensación y proyectos de absorción de dióxido de carbono (4).

Por su parte, la Energía Embebida (Ee) de un material de construcción puede ser definida como el total de energía primaria consumida durante la extracción, fabricación y transporte. La condición de "cuna a puerta" incluye también la energía (primaria) hasta que el producto ha llegado al punto de uso (obra) (5).

Se considera como si la energía se incorporara en el propio producto (6). Es un concepto íntimamente relacionado con la Huella de Carbono, sobre todo cuando se habla de recursos energéticos no renovables.

En el caso específico de los materiales de construcción, con la evolución de los edificios hacia el concepto de edificios de "consumo de energía casi nulo", la Ee de los materiales que lo componen adquiere un peso cada vez más importante (7 y 8).

Para la presente investigación se parte de la inexistencia, en la actualidad, en España, de una base de datos, contrastada con datos reales, que establezca las cargas medioambientales (referidas a emisiones de CO₂ y consumo energético) en función del tipo de producto cerámico y la distancia a obra desde la planta de producción, lo que impide al sector (fabricantes) facilitar información específica de cada producto, que permita, además, diferenciar medioambientalmente un producto respecto de otros productos funcionalmente sustitutivos.

2. OBJETO DE LA INVESTIGACIÓN

El estudio llevado a cabo pretende demostrar la existencia de importantes diferencias, en lo que a impacto ambiental

asociado a la fabricación y transporte a obra se refiere, entre los distintos productos cerámicos para aplicaciones estructurales que se fabrican en España, diferencias que se cuantifican mediante el cálculo de HdC y Ee.

En base a este objetivo, se pretende establecer un método de cálculo que determine la Ee y la HdC de los productos cerámicos de carácter estructural, en función de la tipología de producto, abarcando las etapas del ciclo de vida del producto comprendidas desde la extracción de las materias primas hasta el transporte a obra del producto terminado. Se trata, por tanto, de un estudio de *cuna a puerta con opciones* (9).

3. METODOLOGÍA

El cálculo de la HdC se realiza siguiendo la metodología descrita en PAS 2050 (10) y el informe ISO/TS 14067:2013. Una vez definido el mapa de procesos (etapa 1), se seleccionan los parámetros de estudio considerados como más relevantes para dar información medioambiental de un producto.

Se realiza la selección de productos y se determina el alcance, la unidad funcional y los límites del sistema (etapa 2); realizando un análisis de inventario principalmente con datos obtenidos en plantas de producción (etapa 3).

Finalmente, se cuantifica HdC y Ee (etapa 4), mediante la definición de fórmulas de cálculo de asociadas a cada etapa y cada producto en estudio.

3.1. Definición del mapa de procesos

La norma UNE-EN 15804 establece, de manera genérica, las etapas o módulos que comprenden el ciclo de vida completo de un producto de construcción, tal y como aparecen en la Figura 1.

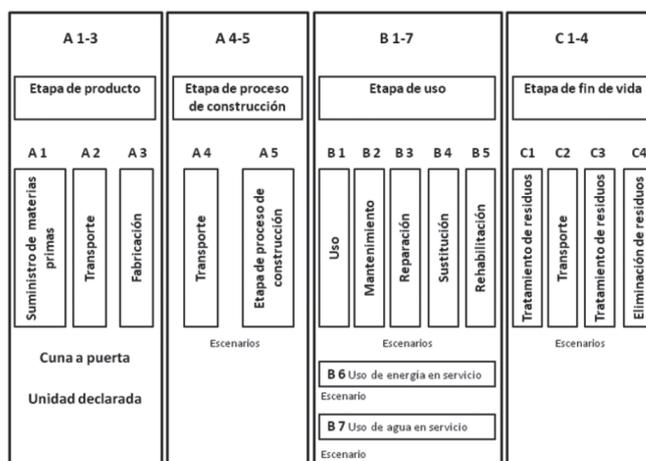


Figura 1. Procesos del ciclo de vida de un producto de construcción genérico.

La investigación queda acotada a todos los módulos de la etapa de producto (A1-extracción de materias primas, A2-transporte de materias primas y A3-fabricación de producto) y el módulo A-4, transporte de producto acabado, de la etapa de proceso de construcción.

En base a estas premisas, los procesos que se incluyen dentro de los límites del sistema son los siguientes:

TABLA 1. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS PRODUCTOS EN ESTUDIO

Producto	Características				
	Dimensiones (mm)	Densidad Kg/m ³	Masa (g)	Ud m ²	Ud palet
Ladrillo caravista hidrofugado	240x115x50	1.045	1.510	66,6	416
Ladrillo caravista klinker	240x115x49	1.238	1.600	66,6	532
Ladrillo hueco triple	240x110x110	780	1.600	33,3	372
Bloque cerámico arcilla cocida	300x144x190	938	7.700	16,6	90
Teja cerámica mixta	470x286		3.800	10,4	192

- Extracción de materias primas
- Transporte de materias primas a planta y almacenamiento
- Preparación y molienda
- Amasado, moldeo, extrusión y cortado (y/o prensado)
- Secado
- Cocción
- Desapilado, flejado y/o paletizado y almacenamiento en patio
- Transporte a obra de producto acabado

En la Figura 2 se muestra el mapa de procesos, de carácter genérico, para los productos cerámicos en estudio, que representa el ciclo de vida de la unidad declarada.

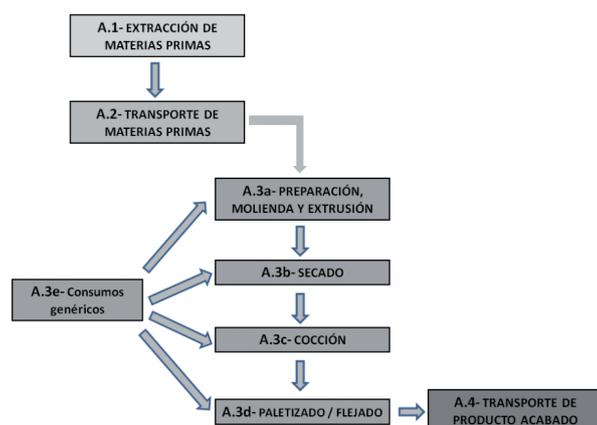


Figura 2. Mapa de procesos y límites del sistema

En la definición de la unidad de referencia, en la presente investigación, en el que no se estudian todas las etapas del ciclo de vida, los datos deben ir referidos a la unidad declarada, considerada como la cantidad de un producto que se utiliza como unidad de referencia para expresar la información ambiental contenida en los módulos de información considerados.

En base a estas indicaciones, la unidad declarada está en función de cada uno de los productos seleccionados y está referida a, "tonelada de producto cerámico puesto a pie de obra". En función de la masa de cada uno de los productos, se puede establecer también como una unidad alternativa *la unidad de producto*, únicamente a título informativo.

En base a la estructura del sector de la cerámica estructural en España, la distribución geográfica del mismo, la producción y sus características, se seleccionan como productos más representativos para el estudio el ladrillo caravista (tanto el tradicional como el klinker), el ladrillo para revestir (se

considera el hueco triple), el bloque cerámico de arcilla aligerada y la teja cerámica mixta. De cada uno de estos productos, se definen unas características genéricas (Tabla 1). Se excluye, en el caso de los ladrillos caravista y la teja cerámica, los acabados esmaltados, al representar los productos no esmaltados un porcentaje de producción mucho mayor que el de productos esmaltados.

Como regla de corte, se excluyen aquellas entradas y salidas de materia y energía del proceso que representen menos del 1 % del total de energía y materia utilizadas en el mismo, siempre y cuando, no provoquen impactos ambientales relevantes.

3.2. Toma de datos. Análisis de inventario

El análisis de inventario se realiza por dos vías distintas:

- Recogida de información "in situ" en fábricas.
- Recopilación bibliográfica, como complemento de la información recogida "in situ".

Se utilizan también datos genéricos para procesos comunes, como: producción de energía eléctrica y combustibles, uso y consumo de energía en etapas auxiliares, etc.

La selección de fábricas se realiza de forma que el total de industrias seleccionadas sea representativa del sector a nivel nacional, para los productos en estudio, siguiendo criterios tales como: que posean una tecnología de producción acorde con la media nacional, es decir, ni obsoleta ni en vanguardia; que las industrias estén repartidas por todo el territorio nacional, y que su capacidad de producción sea de tamaño medio (80.000 – 110.000 t/año). Participan directamente en esta etapa 18 industrias, cuya capacidad de producción representa, aproximadamente, el 7,5 % del total nacional (para una capacidad de producción nacional de 31 millones de toneladas).

Se solicitan datos de referencia anteriores a 2008 y posteriores a 2004, evitando así datos de producción reciente. La razón no es otra que el hecho de que, debido a la crisis en el sector desde esta fecha, la utilización de la capacidad productiva de las plantas es baja, lo que incrementa los costes energéticos y medioambientales fijos de producción (p.e. encendido y puesta en régimen del horno). La utilización media de la capacidad productiva de las industrias encuestadas, para el período de datos facilitados, es del 90 %.

Extracción de materias primas (A1)

Teniendo en cuenta los criterios de corte explicados, de esta etapa se considera únicamente el impacto asociado

TABLA 2. CONSUMOS ELÉCTRICOS DE LA ETAPA PREPARACIÓN-MOLIENDA-EXTRUSIÓN

Subetapa	Producto / Consumo (kWh/t)				
	Caravista Hidrofugado	Caravista Klinker	Hueco Triple	Bloque Cerámico	Teja Mixta
Preparación	0,838	1,011	1,182	0,782	0,491
Molienda/mezcla	4,133	5,088	3,838	4,709	3,986
Amasado/extrusión	7,953	6,942	6,661	7,284	8,942
Consumo (kWh/t)	12,923	13,041	11,681	12,775	13,419

al consumo del combustible empleado por la maquinaria (gasóleo) de extracción, quedando fuera del estudio el resto de elementos, al interpretar, a priori, que el impacto producido por ellos será mínimo con relación a la carga total del producto estudiado. Así mismo, al ser un estudio basado en datos reales, los datos recogidos de esta etapa se corresponden con los consumos de las tareas de “extracción y carga” (con retroexcavadora y pala cargadora), excluyendo otros procesos secundarios, así como la extracción de materias primas no convencionales.

El rendimiento de la máquina se obtiene de la siguiente fórmula [1]:

$$R = \frac{C \times Fl \times Fc \times E \times 60}{Ct}$$

Donde:

- R: Rendimiento maquinaria (m³/h)
- C: capacidad carga cucharón (m³)
- Fl: Factor de llenado
- Fc: Factor de carga
- E: Eficiencia
- Ct: ciclo de trabajo (min)

Con estos criterios, y teniendo en cuenta la potencia de trabajo y rendimiento medio de una excavadora hidráulica con cucharón de 0,68 m³ y pala cargadora con cuchara de 2,6 m³, se obtiene un consumo medio de gasóleo para la maquinaria de extracción de las industrias visitadas de 0,14 l/t de arcilla extraída, siendo éste un valor que puede variar considerablemente de una explotación a otra, por lo que debe entenderse éste como un valor conservador.

Transporte de materias primas a planta (A2)

Al igual que ocurre en el caso de la extracción de materias primas, de esta etapa se considera únicamente el impacto asociado al consumo del combustible de los camiones de transporte. Su determinación, de cierta complejidad, depende de distintas variables, como el motor y transmisión, carrocería, condiciones de tránsito, la carga que lleve, su aerodinámica, las condiciones de uso y manejo, y de otros factores difícilmente cuantificables.

Aún así, con los resultados obtenidos en las visitas se establece un consumo medio de gasóleo de 0,1495 l/t de arcilla transportada para una distancia de cantera de 4,61 km (9,22 km en recorrido de ida y vuelta) y un consumo genérico de 0,01625 l/t x km.

Fabricación de productos (A3)

A efectos de inventario se consideran 4 subgrupos o procesos dentro del módulo de fabricación de productos:

- Preparación, molienda y extrusión
- Secado
- Cocción
- Consumos no específicos o lineales

Preparación, amasado y extrusión (A3a)

Se incluyen todos los consumos de los equipos y maquinaria utilizados desde que se depositan las arcillas a pie de planta, hasta la salida del producto “en verde” de la extrusora y, en su caso, de la prensa.

A partir de los datos recopilados se extraen los consumos eléctricos medios para cada tipo de producto, para cada una de las subetapas consideradas, que se muestran en la Tabla 2.

Para el consumo de la caldera de generación de vapor (utilizadas para generar vapor de agua, que se añade en el proceso de moldeo rebajar la plasticidad de la mezcla de arcillas), se considera, en base a la información facilitada, un consumo unitario medio de 54 Nm³ de gas natural por tonelada de vapor producida, al ser éste el combustible mayoritariamente utilizado en las calderas de las industrias visitadas (usada en 14 de las 18 industrias). En menor medida, y para calderas de menor tamaño, se utiliza también biomasa.

Secado (A3b)

Se incluyen los consumos eléctricos y energéticos, de la carga y descarga de vagones (si procede) y operación de secado de producto. De los resultados de la toma de datos en las industrias correspondiente a esta etapa, y de las distintas fuentes adicionales consultadas, hay que destacar que:

La amplia tipología de secaderos existentes, dificulta poder obtener un dato individualizado tipo de consumo por unidad declarada.

Los secaderos más avanzados tienen un menor consumo energético, pero un mayor consumo eléctrico, al estar más automatizados.

El consumo energético depende no solo de la tipología de secadero y tipo de producto, sino también de un número importante de variables, como la humedad de entrada y salida del producto, condiciones climatológicas, pérdidas del secadero y rendimiento, continuidad de funcionamiento del secadero, etc. La existencia de industrias con una monitorización de consumos facilita la obtención de datos

TABLA 3. CONSUMOS MEDIOS EN SECADO Y COCCIÓN

Producto	Secado		Cocción	
	C. térmico kWh/t (producto seco)	C. eléctrico kWh/t (producto seco)	C. térmico kWh/t (producto cocido)	C. eléctrico kWh/t (producto cocido)
Ladrillo caravista hidrofugado	170-195	12	348-444	11
Ladrillo caravista klinker	170-200	12	393-507	11
Ladrillo hueco triple	140-160	12	271-366	11
Bloque cerámico arcilla cocida	155-175	12	315-428	11
Teja cerámica mixta	165-180	12	417-553	11

Los consumos medios considerados a partir de la información facilitada se muestran en Tabla 3.

Cocción (A3c)

Es la etapa con mayor influencia en los resultados finales de Ee y HdC del producto. Al igual que en el caso del secado, existe un amplio número de variables que pueden hacer variar el consumo energético para un mismo tipo de producto. Una de las más importantes es el contenido en carbonatos de la materia prima, no en vano por cada 100 g de carbonatos contenidos en la materia prima se generan 44 g de CO₂ durante el proceso de cocción (11). Además, a efectos de consumo de energía, la reacción de descarbonatación en el proceso de cocción es endotérmica, de tal forma que una arcilla con un alto contenido en carbonatos requiere un mayor consumo energético en la etapa de cocción que una con pocos carbonatos.

Los consumos medios obtenidos en la toma de datos, y considerando la estadística de hornos en las industrias cerámicas de España, (12) son los que se muestran en la Tabla 3.

Paletizado y apilado (A3d)

Se incluyen en este grupo todos los consumos de los equipos y maquinaria utilizados desde la salida del producto cocido del horno hasta que el mismo queda apilado en el patio de almacenamiento. Se obtiene un consumo eléctrico unitario para este módulo de 1,9235 kWh/t de producto terminado.

Consumos genéricos (A3e)

Dentro de los consumos de tipo genérico, y una vez discriminada la importancia en cuanto a impacto potencial de cada uno de ellos, únicamente se considera la iluminación de planta y patios, puesto que el resto de consumos representa un porcentaje mínimo (<0,1 %) respecto del total de consumos considerados. A partir de los datos de los sistemas de iluminación utilizados en cada una de las plantas visitadas, se obtiene un consumo medio de energía eléctrica de 1,64 kWh/t de producto acabado.

Transporte de producto acabado (A4)

Al igual que en los escenarios A1 y A2, la determinación del consumo medio asociado al transporte tiene cierta complejidad, ya que el consumo del camión de transporte

estará en función de distintas variables y factores algunos de ellos difícilmente cuantificables.

Con la información facilitada por los fabricantes que tienen flota de transporte de producto acabado, y con los estándares de consumos de vehículos por carretera del IDAE (13) se obtiene, para un camión de transporte de 18 t de carga máxima, un consumo medio de 23 l/100 Km y de 26 l/100 Km para el camión con plataforma de 30 t de carga máxima. Se entiende que los camiones hacen el viaje de vuelta en vacío. En base a ello, los valores obtenidos, para cada tipo de producto, son los que se muestran Tabla 4.

TABLA 4. CONSUMO MEDIOS EN TRANSPORTE A OBRA

Producto	Vehículo	
	Caja 18 m ³ l/t km	Plataforma 30 t l/t km
Ladrillo caravista hidrofugado	0,0196	0,0130
Ladrillo caravista klinker	0,0189	0,0126
Ladrillo hueco triple	0,0193	0,0128
Bloque cerámico arcilla cocida	0,0166	0,0110
Teja cerámica mixta	0,0158	0,0105

3.3. Evaluación de impactos

En esta fase, se convierten las entradas obtenidas en la fase de inventario, en cargas ambientales (CO₂_{equiv}) realizando los correspondientes balances de masas de cada fase del proceso, y aplicando los correspondientes factores de emisión (14). En la Tabla 5 se muestran los factores de emisión para los combustibles considerados.

TABLA 5. CARACTERÍSTICAS DE COMBUSTIBLES CONSIDERADOS

Combustible	PCI	Factor de emisión ⁽¹⁾	
	GJ/t	KgCO ₂ equiv/GJPCI ⁽²⁾	KgCO ₂ equiv/kWh
Coque	32,5	98,30	0,354
Fuelóleo	40,18	76,00	0,273
Gas natural	48,66	56,00	0,201
Gas-oil	42,4	73,00	0,263
Propano	46,2	60,00	0,216
Biomasa (neutro en CO ₂)	17,9 MJ/t	4,44	0,016

(1) Incluyendo factor de oxidación

(2) 1 GJ = 278 kWh

TABLA 6. MIX ELÉCTRICO (15)

Tipo energía	Emisiones (kg/mWh)			Emisiones KgCO ₂ equiv/kWh					% del total
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Total Kg	Total t	
C. Combinado	367	0,04	0,008	367	1	2,384	370,384	0,37038	11,80 %
Fuel	720	0,007	0,047	720	0,175	14,006	734,181	0,73418	0,10 %
Carbón	969	0,006	0,0098	969	0,15	2,9204	972,0704	0,97207	16,20 %
Nuclear	23			23	0	0	23	0,023	19,40 %
Hidráulica	20			20	0	0	20	0,02	10,10 %
Eólica	20			20	0	0	20	0,02	23,30 %
Solar-Biomasa	110			110	0	0	110	0,11	19,10 %
									0,234 kgCO₂equiv/kWh

Paralelamente, y para el cálculo de la Ee, se suman todas las cargas energéticas de los diferentes procesos incluidos dentro de los límites del sistema (convirtiendo a energía primaria).

Para el cálculo de las emisiones derivadas de la producción, transporte y consumo de la energía eléctrica, se consideran los datos correspondientes al mix eléctrico español (15), que se muestran en la Tabla 6.

La HdC total para cada producto en estudio viene definida por la siguiente fórmula [2]:

$$HdC(\text{total})=HdC(A1)+HdC(A2)+HdC(A3a)+HdC(A3b)+HdC(A3c)+ HdC(A3d)+ HdC(A3e)+ HdC(A4)$$

Donde:

HdC(total) es la Huella de Carbono total del producto (kgCO₂equiv/t producto acabado)

Siendo los sumandos la HdC de cada una de las etapas

- HdC(A1): Extracción materias primas
- HdC(A2): Transporte materias primas a planta
- HdC(A3a): Fabricación. Preparación, amasado y extrusión.
- HdC(A3b): Fabricación. Secado.
- HdC(A3c): Fabricación. Cocción.
- HdC(A3d): Fabricación. Paletizado y apilado.
- HdC(A3e): Fabricación. Consumos genéricos.
- HdC(A4): Transporte de producto acabado.

Del mismo modo, la Ee vendrá definida por la siguiente fórmula [3]:

$$Ee(\text{total}) = Ee(A1)+Ee(A2)+Ee(A3a)+Ee(A3b)+Ee(A3c)+Ee(A3d)+Ee(A3e)+Ee(A4)$$

Donde:

Ee(total): Energía Embebida total de producto (kWh/t producto acabado)

Siendo los sumandos la Ee de cada una de las etapas consideradas

- Ee(A1): Extracción materias primas

- Ee(A2): Transporte materias primas a planta
- Ee(A3a): Fabricación. Preparación, Amasado y Extrusión.
- Ee(A3b): Fabricación. Secado.
- Ee(A3c): Fabricación. Cocción.
- Ee(A3d): Fabricación. Paletizado y apilado.
- Ee(A3e): Fabricación. Consumos genéricos.
- Ee(A4): Transporte de producto acabado.

Extracción (A1)

El consumo unitario para la etapa de extracción viene dado por la siguiente fórmula[4]:

$$\text{Consumo unitario (l/t)} = \frac{\text{Consumo maquinaria (l/h)}}{\text{Rendimiento (t/h)}}$$

A partir del consumo obtenido en la fase de inventario de 0,14 l/t de arcilla extraída:

$$HdC A1= \text{consumo unitario (l/t)} * \text{factor emisión (kg CO}_{2\text{equiv}}/l) = 0,3906 \text{ kg CO}_{2\text{equiv}}/t$$

Referido a tonelada de arcilla (materia prima) extraída.
Para el caso de la Ee, se aplica la siguiente fórmula [5]:

$$EeA1=\text{consumo unitario (l/t)} * \text{factor emisión (kWh/l)} = 1,4392 \text{ kWh/t (1,611 kWh/t referido a energía primaria)}$$

Transporte a planta (A2)

El consumo unitario viene dado por la siguiente fórmula:

$$\text{Consumo unitario (l/t)} = \frac{Cn}{Ct} * D * 2$$

Donde:

- Cn = Consumo vehículo transporte (l/km)
- Ct = Carga vehículo transporte (t)
- D = Distancia de cantera a la planta
- 2 = Factor fijo (al considerar el recorrido de ida y de vuelta)

A partir del dato de inventario de consumo de 0,1495 l/t para una distancia de cantera de 4,61 km (9,22 km en recorrido de ida y vuelta) y un consumo genérico, de 0,01625 l/t*km, se obtiene:

HdC A2= consumo unitario (l/t) * factor emisión (kg CO₂equiv/l) = **0,4171 kg CO₂equiv /t**

Referido a tonelada de arcilla (materia prima) transportada

Para el caso de Ee, se aplica [6]:

EeA1=consumo unitario (l/t)*factor emisión (kWh/l) = **1,5368 kWh/t** (1,721 kWh/t referido a energía primaria)

Fabricación de productos (A3)

PREPARACIÓN, AMASADO Y EXTRUSIÓN (A3a)

La HdC asociada a este grupo tiene, por un lado, un valor asociado al consumo eléctrico de la maquinaria y, por otro, un valor de consumo de combustible de la caldera de vapor, caso de existir ésta. A partir de estas consideraciones se despeja la siguiente fórmula [7]:

$$\text{Consumo eléctrico unitario (kWh/t)} = \frac{C_p}{R_p} + \frac{C_m}{R_m} + \frac{C_e}{R_e}$$

Donde:

C_p = Consumo maquinaria preparación
R_p = Rendimiento maquinaria preparación (t/h o m³/h)
C_m = Consumo maquinaria molienda
R_m = Rendimiento maquinaria molienda (t/h o m³/h)
C_e = Consumo maquinaria extrusión
R_e = Rendimiento maquinaria extrusión (t/h o m³/h)

Por otra parte, el consumo térmico de la caldera de vapor, queda definido por la siguiente fórmula [8]:

$$\text{Consumo térmico unitario (kWh/t)} = \frac{C_{cv}}{R_e}$$

Donde:

C_{cv} = Consumo unitario de la caldera (kg/h ó l/h)
R_e = Rendimiento maquinaria extrusión (t/h o m³/h)

A partir de estas fórmulas se despeja:

$$\text{HdC A3a} = \left[\frac{C_p}{R_p} + \frac{C_m}{R_m} + \frac{C_e}{R_e} \right]$$

* factor emisión electricidad +

$$\left[\frac{C_{cv}}{R_e} * \text{factor emisión combustible} \right]$$

Para los datos del inventario, se obtienen los siguientes valores de HdC:

- Ladrillo caravista: 10,27 kgCO₂equiv/t
- Ladrillo klinker: 10,30 kgCO₂ equiv/t
- Hueco triple: 9,93 kgCO₂equiv/t
- Bloque aligerado: 10,23 kgCO₂equiv/t
- Teja mixta: 10,39 kgCO₂equiv/t

En cuanto a Ee, la misma se calcula según la siguiente fórmula [9]:

$$\text{Ee A3a} = \left[\frac{C_p}{R_p} + \frac{C_m}{R_m} + \frac{C_e}{R_e} \right] + \left[\frac{C_c}{R_e} * \text{poder calorífico combustible} \right]$$

Donde:

C_p = Consumo maquinaria preparación
R_p = Rendimiento maquinaria preparación (t/h o m³/h)
C_m = Consumo maquinaria molienda
R_m = Rendimiento maquinaria molienda (t/h o m³/h)
C_e = Consumo maquinaria extrusión
R_e = Rendimiento maquinaria extrusión (t/h o m³/h)
C_c = Consumo unitario de la caldera (kg/h ó l/h)
R_e = Rendimiento maquinaria extrusión (t/h o m³/h)

Así, se obtienen los siguientes valores medios para la Ee (considerando gas natural como combustible de la caldera de vapor):

- Ladrillo caravista: 48,69 kWh/t (67,35 kWh/t de energía primaria)
- Ladrillo Klinker: 48,81 kWh/t (67,62 kWh/t de energía primaria)
- Hueco triple: 47,39 kWh/t (64,56 kWh/t de energía primaria)
- Bloque aligerado: 49,53 kWh/t (67,02 kWh/t de energía primaria)
- Teja mixta: 49,16 kWh/t (68,47 kWh/t de energía primaria)

Los resultados están referidos a tonelada de producto "en verde".

SECADO (A3b)

En el caso del secado, la HdC tiene un valor asociado al consumo térmico y otro asociado al consumo eléctrico[10]:

$$\text{HdC A3b} = (C_{t1} * f_{c1}) + (C_{t2} + f_{c2}) + \dots (C_{tn} * f_{cn}) + (C_e * f_e)$$

Donde:

C_t = Consumo unitario térmico del combustible (en función del mix de combustible utilizado)
f_c = factor/es de emisión del combustible/s utilizados
C_e = Consumo unitario eléctrico
f_e = Factor de emisión eléctrico

Se considera siguiente mix energético: Gas natural- 61 %; Fuel.- 20 %, Orujillo.- 6 %, Coque.- 12 %, Biomasa: 1 %; obteniendo los siguientes valores de HdC:

- Ladrillo Caravista = 43,54 kg CO₂equiv/t
- Ladrillo Klinker = 43,54 kg CO₂equiv/t
- Hueco triple = 36,75 kg CO₂equiv/t
- Bloque aligerado = 40,14 kg CO₂equiv/t
- Teja mixta = 41,28 kg CO₂equiv/t

En cuanto a Ee, la misma se calcula según la siguiente fórmula [11]:

$$Ee A3b = Cc + Ce$$

Donde:

Cc = Consumo térmico unitario (kWh/t)

Ce = Consumo eléctrico unitario (kWh/t)

Los valores obtenidos como resultado de la aplicación de la fórmula son los siguientes:

- Ladrillo Caravista: 192 kWh/t (245,69 kWh/t de energía primaria)
- Ladrillo Klinker: 192 kWh/t (245,69 kWh/t de energía primaria)
- Hueco triple: 162 kWh/t (207,78 kWh/t de energía primaria)
- Bloque aligerado: 177 kWh/t (225,85 kWh/t de energía primaria)
- Teja mixta: 182 kWh/t (233,38 kWh/t de energía primaria)

Los resultados obtenidos están referidos a tonelada de producto seco.

COCCIÓN (A3c)

Se define la siguiente fórmula para el cálculo de HdC en la etapa de cocción [12]:

$$HdC A3c = (Ct1 * fc1) + (Ct2 + fc2) + \dots (Ctn * fcn) + (Cc * 440) + (Ce * fe)$$

Donde:

Ct = Consumo unitario térmico (en función del mix de combustible)

fc = factor/es de emisión del combustible/s

Cc = Contenido en carbonatos de la masa arcillosa (t/t)

Ce = Consumo unitario eléctrico

fe = Factor de emisión eléctrico

Con los datos obtenidos en la fase de inventario, se obtienen los siguientes valores de HdC:

- Ladrillo Caravista: 142,49 kg CO₂equiv/t
- Ladrillo Klinker: 153,35 kg CO₂equiv/t
- Hueco triple: 119,86 kg CO₂equiv/t
- Bloque aligerado: 134,80 kg CO₂equiv/t
- Teja mixta: 162,18 kg CO₂equiv/t

La Ee se calcula con la siguiente fórmula [13]:

$$Ee A3c = Cc + Ce$$

Donde:

Cc = Consumo térmico unitario (kWh/t)

Ce = Consumo eléctrico unitario (kWh/t)

Obteniendo los siguientes valores medios:

- Ladrillo Caravista: 396 kWh/t (492,49 kWh/t de energía primaria)

- Ladrillo Klinker: 444 kWh/t (550,81 kWh/t de energía primaria)
- Hueco triple: 296 kWh/t (371,00 kWh/t de energía primaria)
- Bloque aligerado: 362 kWh/t (451,19 kWh/t de energía primaria)
- Teja mixta: 483 kWh/t (598,19 kWh/t de energía primaria)

Los resultados obtenidos están referidos a tonelada de producto cocido.

PALETIZADO Y APILADO (A3d)

La HdC se asocia al consumo eléctrico de la maquinaria, obtenido aplicando la siguiente fórmula [14]:

$$HdC A3d = \left[\frac{Cp}{Rp} \right] * \text{factor emisión electricidad}$$

Donde:

Cc = Consumo unitario de la maquinaria (kWh)

Re = Rendimiento maquinaria (t/h)

Tomando los datos de inventario se despeja:

$$HdCA3d = 1,9235 * 0,234 = 0,45 \text{ CO}_2\text{equiv/t}$$

En cuanto al valor de Ee (Ee3Ad) se considera el indicado de 1,9235 kWh/t (4,3278 kWh/t de energía primaria), valor referido a tonelada de producto acabado.

CONSUMOS GENÉRICOS (A3e)

A partir del valor de consumo eléctrico medio de 1,64 kWh/t de producto acabado, obtenido en inventario, se obtiene un valor de HdC de 0,42 kgCO₂equiv/t y de Ee de 1,64 kWh/t (3,69 kWh/t de energía primaria), para producto acabado.

Transporte de producto acabado (A4)

En el caso del transporte del producto acabado hay que considerar, por un lado, el consumo del vehículo de transporte y, por otro, la carga total del mismo. La HdC de esta etapa vendrá dada por la siguiente fórmula [15]:

$$HdC A4 = d * \frac{C * f}{Ct}$$

Donde:

d = Distancia a destino (km)

C = Consumo vehículo transporte (l/km)

f = Factor emisión combustible (2,79 kg CO₂/l en el caso de diésel)

C_t = Carga vehículo transporte (t)

Aplicando dicha fórmula, se obtienen los siguientes valores, referidos a tonelada de producto acabado:

- Ladrillo Caravista: 54,64 gCO₂equiv/t km (caja 18 m³) / 36,35 gCO₂equiv/t km (plataforma 30 t)

TABLA 7. VALORES MEDIOS DE HdC Y Ee EN FUNCIÓN DEL PRODUCTO

Producto	HdC (kg CO ₂ equiv/t)							TOTAL (kg CO ₂ equiv/t)
	HdCA1 ₁	HdCA2 ₁	HdCA31					
			HdCA3a ₁	HdCA3b ₁	HdCA3c ₁	HdCA3d ₁	HdCA3e ₁	
Ladrillo caravista hidrofugado	0,52	0,56	15,34	52,66	146,50	0,45	0,42	216,44
Ladrillo caravista klinker	0,52	0,56	15,38	52,66	157,67	0,45	0,42	227,66
Ladrillo hueco triple	0,52	0,56	14,83	44,45	123,24	0,45	0,42	184,46
Bloque cerámico	0,52	0,56	15,28	48,56	138,59	0,45	0,42	204,37
Teja cerámica mixta	0,52	0,56	15,52	49,93	166,74	0,45	0,42	234,13

Producto	Ee (kWh/t)							TOTAL (kWh/t)
	EeA1 ₁	EeA21	EeA31					
			EeA3a1	EeA3b1	EeA3c1	EeA3d1	EeA3e1	
Ladrillo caravista hidrofugado	2,15	2,29	100,58	297,17	506,35	4,33	3,69	916,55
Ladrillo caravista klinker	2,15	2,29	100,97	297,17	566,31	4,33	3,69	976,91
Ladrillo hueco triple	2,15	2,29	96,40	251,32	381,44	4,33	3,69	741,61
Bloque cerámico	2,15	2,29	100,08	273,18	463,88	4,33	3,69	849,60
Teja cerámica mixta	2,15	2,29	102,24	282,29	615,02	4,33	3,69	1.012,00

- Ladrillo Klinker: 52,76 gCO₂equiv/t km (caja 18 m³) / 35,10 gCO₂equiv/t km (plataforma 30 t)
- Hueco triple: 53,85 gCO₂equiv/t km (caja 18 m³) / 35,83 gCO₂equiv/t km (plataforma 30 t)
- Bloque aligerado: 46,25 gCO₂equiv/t km (caja 18 m³) / 30,77 gCO₂equiv/t km (plataforma 30 t)
- Teja mixta: 43,93 gCO₂equiv/t km (caja 18 m³) / 29,23 gCO₂equiv/t km (plataforma 30 t)

Para el caso de Ee, se aplica la siguiente fórmula [16]:

$$Ee A4 = Cu * Pc * d$$

Donde:

Cu: Consumo unitario transporte

Pc: Poder calorífico combustible (kwh/l)

d: distancia a obra (km)

De aplicar la anterior fórmula para cada uno de los productos en estudio, y por km recorrido, se obtienen los siguientes valores (considerada en base a energía primaria):

- Ladrillo Caravista: 0,2257 kWh/t km (caja 18 m³) / 0,1501 kWh/t km (plataforma 30 t)
- Ladrillo Klinker: 0,2180 kWh/t km (caja 18 m³) / 0,1449 kWh/t km (plataforma 30 t)
- Hueco triple: 0,2225 kWh/t km (caja 18 m³) / 0,1479 kWh/t km (plataforma 30 t)
- Bloque aligerado: 0,1911 kWh/t km (caja 18 m³) / 0,1270 kWh/t km (plataforma 30 t)
- Teja mixta: 0,1815 kWh/t km (caja 18 m³) / 0,1207 kWh/t km (plataforma 30 t)

4. RESULTADOS GLOBALES

Para obtener el valor global, tanto de HdC como de Ee, es necesario que cada uno de los valores, esté referido a la unidad declarada: "tonelada de producto cerámico puesto a pie de obra".

Sin embargo, los valores obtenidos para cada una de las etapas, están referidos a una unidad distinta. Así, los valores del módulo A1 están referidos a tonelada de materia prima extraída, los del módulo A2 a tonelada de materia prima transportada, etc. Se debe, por tanto, hallar la equivalencia entre la unidad declarada y las unidades a las que están referidos los valores obtenidos en cada una de las fases estudiadas. Así se deberá aplicar un coeficiente corrector a cada uno de los valores obtenidos, de tal forma que:

- Materia prima extraída y transportada (A1 y A2)
- Materia prima transportada + % Agua añadida en amasado = Producto en verde (A3a)
- Producto en verde - % Agua pérdida en proceso de secado = Producto seco (A3b)
- Producto seco - % Pérdida de peso en cocción = Producto cocido (A3c)
- Producto cocido - % Roturas = Producto acabado y puesto a pie de obra (A3d, A3e y A4).

Así, para un producto tipo, con un 13 % de agua añadido en el amasado, un 19 % de pérdida de humedad en secado, un 15 % de pérdida de peso, 12 % de carbonatos y un 3 % de roturas; los valores de HdC y Ee corregidos y referidos a la unidad declarada serán los que aparecen en la Tabla 7.

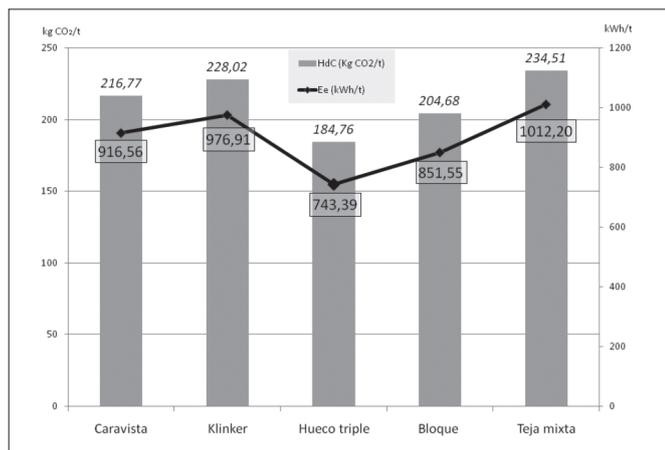


Figura 3. Valores de HdC y Ee (base energía primaria) de los productos estudiados.

5. CONCLUSIONES

Se confirma la primera hipótesis de la investigación, la existencia de importantes diferencias en los valores de HdC y Ee entre los distintos productos de cerámica para aplicaciones estructurales fabricados en España. Así, para unas mismas condiciones medias de fabricación, las diferencias entre las magnitudes de HdC para fabricación (escenarios A1, A2 y A3) llegan hasta el 27 %, siendo de hasta un 35 % para el caso de la Ee (Figura 3).

Se confirma también la segunda hipótesis. Los valores obtenidos de HdC y Ee para la etapa de transporte (A4) oscilan entre el 0,35 %, para una distancia mínima a obra de 10 km, hasta un 40 % para una distancia de 1.400 km (estimado como distancia máxima a recorrer dentro de la península).

En la Figura 4 se puede comprobar como el impacto asociado al transporte es, para una distancia de 150 km, equivalente al obtenido para la etapa de preparación de tierras; para una distancia de 450 km se obtiene un valor similar al obtenido para la etapa de secado de producto y para una distancia de 1.350 km se obtiene un valor igual al obtenido para la etapa de cocción de producto.

Se han establecido, para cada una de las etapas consideradas, las variables que tienen una importante influencia en el valor

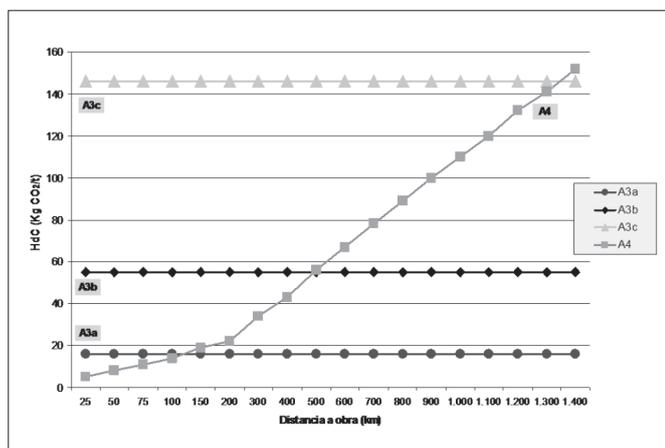


Figura 4. Influencia de etapa de transporte (A4) en valor global de HdC (ladrillo caravista).

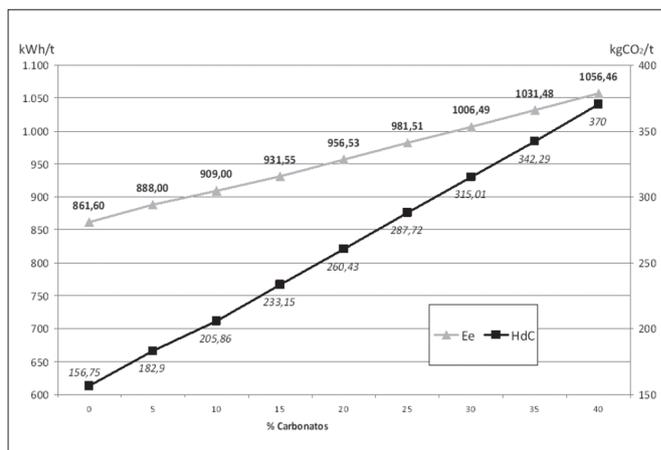


Figura 5. Influencia del contenido en carbonatos de la materia prima en el valor de HdC y Ee.

final de los dos parámetros en estudio; así como otra serie de variables que tienen una influencia menor. En total, se han determinado 6 variables con influencia global en todos los procesos que se incluyen dentro de los límites del sistema, 44 variables consideradas como principales y 39 consideradas como variables secundarias (Tabla 8). No se consideran en los cálculos realizados en este estudio los sistemas de cogeneración (aún siendo una variable con influencia global), debido a que la coyuntura actual de precios altos de los combustibles, los requisitos legales y menor remuneración del excedente eléctrico, que implican menor rentabilidad para la cogeneración, ha reducido de forma muy importante su uso.

La etapa de cocción es, para todos los productos estudiados, la etapa más crítica por la influencia que tiene en el valor total que alcanzan los dos parámetros objeto de la presente investigación (Tabla 9).

Se ha podido cuantificar también, a partir de los datos obtenidos y las fuentes bibliográficas consultadas, la representatividad que tienen las principales variables, dentro de los valores de HdC y Ee obtenidos para cada tipo de producto (Tabla 10). Para ello se ha considerado la influencia que tiene cada una de estas variables y factores en la magnitud que puede alcanzar el consumo energético, eléctrico y/o de combustible en los procesos a los que pertenece dentro de los módulos estudiados y para los valores obtenidos.

Observando los % de cada una de las principales variables consideradas, se determina la relevancia de cada uno de los procesos que tienen lugar en el proceso de fabricación de los productos cerámicos (Tabla 11).

La relevancia que alcanza el contenido en carbonatos de la materia prima en relación al valor total de HdC y Ee está en relación directa con la cantidad de los mismos dentro de la materia prima. Así, para un mismo producto, en función del contenido en carbonatos de la materia prima, el valor de HdC puede variar hasta 200 %, y la Ee un 25 % (Figura 5).

El 91 % del total de la Ee es debido al consumo de energía térmica y el 9 % restante al consumo de energía eléctrica (referido a energía primaria).

Así mismo, se comprueba que el tipo de combustible utilizado puede repercutir hasta un 200 % en el valor total de la HdC.

TABLA 8. VARIABLES CON INFLUENCIA EN EL VALOR TOTAL DE HdC

A- VARIABLES CON INFLUENCIA GLOBAL EN TODOS LOS PROCESOS		Tipo de producto final y características	
		Tipo de materia prima y características	
		Tipo de combustible y mix energético	
		Mix eléctrico	
		Existencia de cogeneración en fabricación	
		Uso de subproductos en fabricación	
VARIABLES PRINCIPALES Y SECUNDARIAS			
MÓDULO	ENTRADAS QUE DETERMINAN LA MAGNITUD DE HdC Y Ee	VARIABLES PRINCIPALES	VARIABLES SECUNDARIAS
A1-Extracción de materias primas	Consumo de combustible	Tipo y rendimiento de maquinaria	Accesibilidad del terreno
			Climatología
			Habilidad del operador
			Conservación de maquinaria
A2- Transporte de materias primas a planta	Consumo de combustible	Distancia de cantera a planta	% de carga de vehículos s/ capacidad total
		Tipo y rendimiento de vehículos	Condiciones de tránsito
		Carga total de vehículos	
A3a - Preparación, amasado y extrusión	Consumo eléctrico Consumo térmico	Potencia de maquinaria	Conservación de maquinaria
		Rendimiento de maquinaria	Número de equipos
		Existencia de caldera de vapor	Continuidad de funcionamiento de equipos
		Rendimiento de caldera de vapor	Contenido en humedad de materia prima
		Combustible de caldera	
A3b- Secado	Consumo eléctrico Consumo térmico	Tipo de secadero	% de carga de secadero sobre capacidad total
		Humedad de entrada y salida	Rendimiento equipamiento movimentación
		Ciclo de secado	Continuidad de funcionamiento de equipos
		Producción	Pérdidas por paredes y techo de secadero
		Aporte de calor recuperado de cocción	Características de los accesorios
		Potencia instalada	Colocación de piezas en estanterías
		Energía disipada	Automatización del proceso
		Conservación y mantenimiento secadero	
		Conservación de equipos auxiliares	
		Velocidad de circulación de aire	
Rendimiento térmico de fuente de calor			
A3c- Cocción	Consumo eléctrico Consumo térmico	Tipo de horno	Colocación de piezas en las vagonetas
		Ciclo y velocidad de cocción	% de carga de horno sobre capacidad total
		Temperatura máxima de cocción	Automatización del proceso
		Tiempo a temperatura máxima	Pérdidas por paredes y bóveda del horno
		Potencia instalada	Pérdidas por elementos de transporte
		Producción	Rendimiento equipamiento de movimentación
		Contenido en carbonatos	Continuidad de funcionamiento de equipos
		Calor sensible del material	Características de los accesorios
		Humedad residual	Control de la atmósfera de horno
		Recuperación de calor	Gradiente interno de temperatura
		Calor sensible de humos	
		Curva de cocción	
A3d- Paletizado/ Flejado	Consumo eléctrico Consumo térmico	Potencia de maquinaria	Conservación de maquinaria
		Rendimiento de maquinaria	Número de equipos
		Tipología de sistema de paletizado/ flejado	Continuidad de funcionamiento de equipos
		Tratamientos finales de producto	
A3e - Consumos genéricos	Consumo eléctrico Consumo térmico	Superficie de planta	Turnos de trabajo
		Superficie de patio	Climatología
		Tipo de fuente de iluminación	Conservación de equipos de iluminación
A4 - Transporte a obra	Consumo de combustible	Distancia de planta a obra	% de carga sobre total de capacidad
		Tipo y rendimiento de vehículos	Condiciones de tránsito
		Capacidad de carga total de vehículos	Uso y manejo del operario

TABLA 9. INFLUENCIA DE CADA UNA DE LAS ETAPAS CONSIDERADAS EN EL VALOR TOTAL DE HdC Y Ee

Escenario	% sobre el total de HdC	% sobre el total de Ee
A1 – Extracción materias primas	0,22 – 0,28	0,21 – 0,29
A2 – Transporte de materias primas a planta	0,24 – 0,30	0,23 – 0,31
A3a – Preparación, amasado y extrusión	6,58 – 8,01	10,10 – 12,94
A3b – Secado	14,35 – 24,36	19,91 – 34,05
A3c – Cocción	39,81 – 71,24	31,32 – 60,76
A3d – Paletizado, flejado, apilado	0,19 – 0,24	0,43 – 0,58
A3e – Consumos genéricos	0,18 – 0,20	0,36 – 0,43
A4 – Transporte de producto	0,33 – 41,51	0,32 – 40,84

TABLA 10. INFLUENCIA DE LAS PRINCIPALES VARIABLES EN EL VALOR TOTAL DE HdC

Módulo	Variable	Producto				
		Ladrillo Caravista	Ladrillo Klinker	Ladrillo Huevo triple	Bloque Cerámico	Teja Mixta
A1	Maquinaria extracción tierras	0,24 %	0,23 %	0,28 %	0,25 %	0,22 %
A2	Vehículos de transporte	0,26 %	0,24 %	0,30 %	0,27 %	0,24 %
A3a	Maquinaria de preparación de tierras	0,15 %	0,17 %	0,24 %	0,15 %	0,08 %
A3a	Maquinaria de molienda	0,73 %	0,85 %	0,79 %	0,88 %	0,65 %
A3a	Maquinaria de amasado	1,41 %	1,17 %	1,37 %	1,36 %	1,46 %
A3a	Caldera generación vapor	4,80 %	4,56 %	5,63 %	5,08 %	4,44 %
A3b	Movimentación y control secadero	1,57 %	1,49 %	1,84 %	1,66 %	1,45 %
A3b	Evaporación secado	10,25 %	9,74 %	10,02 %	9,95 %	8,95 %
A3b	Pérdidas paredes y techo secadero	1,59 %	1,52 %	1,56 %	1,55 %	1,39 %
A3b	Energía disipada secado	8,65 %	8,23 %	8,46 %	8,40 %	7,55 %
A3b	Calentamiento piezas/ accesorios secado	2,28 %	2,16 %	2,23 %	2,21 %	1,99 %
A3c	Calor de reacción horno	10,91 %	11,60 %	9,65 %	10,59 %	12,25 %
A3c	Recirculación aire horno	19,65 %	20,89 %	17,38 %	19,07 %	22,05 %
A3c	Calor sensible humos horno	4,37 %	4,64 %	3,86 %	4,24 %	4,90 %
A3c	Pérdidas paredes y techo horno	3,49 %	3,71 %	3,09 %	3,39 %	3,92 %
A3c	Calor sensible material cocción	2,62 %	2,78 %	2,32 %	2,54 %	2,94 %
A3c	Vagonetas horno	2,18 %	2,32 %	1,93 %	2,12 %	2,45 %
A3c	Inquemados horno	0,44 %	0,46 %	0,39 %	0,42 %	0,49 %
A3c	Descarbonatación	22,80 %	21,68 %	26,75 %	24,14 %	21,08 %
A3c	Movimentación y control horno	1,22 %	1,16 %	1,43 %	1,29 %	1,13 %
A3d	Maquinaria paletizado producto cocido	0,21 %	0,20 %	0,24 %	0,22 %	0,19 %
A3e	Consumos genéricos de planta	0,19 %	0,18 %	0,23 %	0,21 %	0,18 %

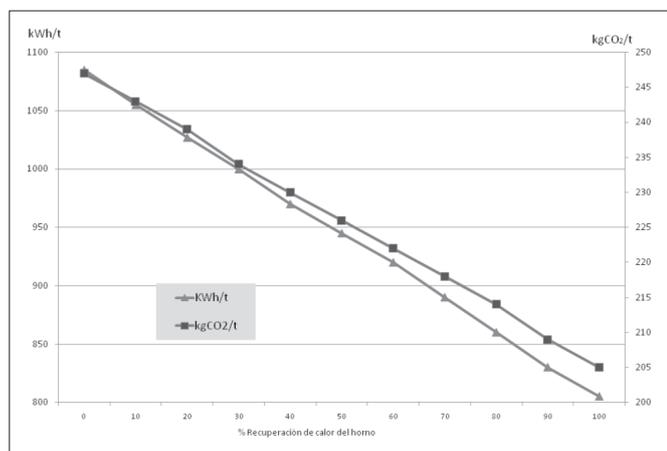


Figura 6. Influencia de recuperación calor del horno en HdC y Ee (teja mixta).

El tipo de secadero utilizado, para igualdad de condiciones en el resto de procesos, tiene una influencia de hasta el 10 % en el valor total de la HdC y un 12 % en el valor de la Ee.

Para igualdad de condiciones en el resto de procesos, la tipología de horno utilizado en la cocción puede tener una influencia de hasta el 9 % en el valor total de la HdC y un 20 % en el valor de la Ee.

La recuperación de gases y calor procedente del horno hacia otros procesos (como el secado o el prehorno), mejora considerablemente los valores de HdC y Ee para los distintos productos estudiados, tal y como se puede comprobar en la Figura 6.

Los resultados obtenidos superan los esperados inicialmente, confirmando las hipótesis de partida y alcanzando los objetivos esperados, contrastando el objeto del estudio como un tema de investigación muy importante, tanto para el sector de la edificación como para la comunidad científica, fijando puntos de partida para comenzar nuevas líneas de

TABLA 11. RELEVANCIA DE LOS PROCESOS DEL SISTEMA EN EL VALOR DE LA HDC (SIN TRANSPORTE A4)

		Mínimo	Máximo
A3c	Descarbonatación	21,64 %	26,710 %
A3c	Recirculación aire horno	17,40 %	21,040 %
A3c	Calor de reacción horno	10,03 %	12,270 %
A3b	Evaporación secado	8,96 %	10,260 %
A3b	Energía disipada secado	7,56 %	8,670 %
A3c	Calor sensible humos horno	4,65 %	5,620 %
A3a	Caldera generación vapor	3,87 %	4,560 %
A3c	Pérdidas paredes y techo horno	3,09 %	3,930 %
A3c	Calor sensible material cocción	2,32 %	2,940 %
A3c	Vagonetas horno	2,21 %	2,450 %
A3b	Calentamiento piezas/accesorios secado	1,99 %	2,190 %
A3b	Pérdidas paredes y techo secadero	1,43 %	1,840 %
A3b	Movimentación y control secadero	1,49 %	1,560 %
A3a	Maquinaria de amasado	1,14 %	1,430 %
A3c	Movimentación y control horno	1,16 %	1,350 %
A3a	Maquinaria de molienda	0,64 %	0,870 %
A3c	Inquemados del horno	0,38 %	0,490 %
A2	Vehículos de transporte	0,23 %	0,300 %
A1	Maquinaria extracción tierras	0,22 %	0,280 %
A3d	Maquinaria paletizado producto cocido	0,19 %	0,250 %
A3e	Consumos genéricos de planta	0,18 %	0,240 %
A3a	Maquinaria de preparación de tierras	0,08 %	0,230 %

investigación que tengan como objetivo final el desarrollo sostenible del sector de la cerámica estructural.

Se considera como conclusión final y general, que los resultados obtenidos pueden resultar una aportación importante para conocer y reducir el impacto ambiental de los edificios, desde la perspectiva de que el impacto ambiental de un edificio comienza desde el momento en que se extraen las materias primas para la fabricación de los materiales con los que se construirá dicho edificio (perspectiva del ciclo de vida).

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a AITEMIN-Centro Tecnológico el apoyo prestado en el desarrollo de esta investigación, así como a las industrias cerámicas que han participado en el proceso de análisis de inventario, por su inestimable colaboración.

BIBLIOGRAFÍA

- Huovila, P.; Ala-Juusela, M.; Melchert, L.; Pouffary, S.; (2007): Buildings and Climate Change: Status, Challenges and Opportunities, UNEP (United Nations Environment Programme), *UNEP Sustainable Buildings and Climate Initiative*, Paris.
- Real Decreto 1722/2012, de 28 de diciembre, por el que se desarrollan aspectos relativos a la asignación de derechos de emisión en el marco de la Ley 1/2005 (BOE 313, 29-12-2013).
- ISO/TS 14067, 2013; (2013): *Greenhouse gases -- Carbon footprint of products -- Requirements and guidelines for quantification and communication*.
- Real Decreto 163/2014, de 14 de marzo, por el que se crea el registro de huella de carbono, compensación y proyectos de absorción de dióxido de carbono (BOE 77, 29-03-2014).
- Hammond, G. P.; Jones, C. I.; (2008): Embodied energy and carbon in construction materials. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy*, 161 (2): pp. 87-98.
- Mitchell, P.; Hyde, R.; (1996): Embodied energy: a parameter for the environmental assessment of building materials, *Proceedings of the Embodied Energy: the current state of play*, Deakin University, Woolstores Campus, Geelong, Australia, 28 – 29 November.
- Sartori, I.; Napolitano, A.; Voss, K.; (2012): Net zero energy buildings: A consistent definition framework, *Energy & Buildings*, 48, Mayo, pp. 220-232. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.032>.
- Hernández, P.; Kenny, P.; (2008): Defining Zero Energy Buildings – A Life Cycle Perspective, *PLEAV2008-25th Conference on Passive and Low Energy Architecture*, University College Dublin, 22-24 October.
- UNE-EN15804, 2012; (2012): Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones Ambientales de Producto.
- PAS 2050, 2011; (2011): *Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services*. BSI 2011. ISBN 978 0 580 71382 8.
- Baena, A; Puello, A; (2006): Competitividad y cambio climático: nuevos retos para la industria española, *EOI 2006*, pp. 173.
- Assessoria Tècnica Ceràmica; (2006): Informe Cerámica Roja 2006, *Técnica Cerámica*, 375, Diciembre.
- Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2011, Anexo 8.
- IDAE 2010; (2010): *Guía para gestión de combustible de flotas de transporte por carretera*, ISBN-10: 84-86850-97-5, pp 43.
- Observatorio de Energía y Sostenibilidad de España*.

Recibido: 13/02/2014

Recibida versión corregida: 11/04/2014

Aceptado: 29/04/2014