



ESTRATEGIAS PARA LA REDUCCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL EN LA EDIFICACIÓN EN FASE DE CONSTRUCCIÓN MEDIANTE LA EDIFICACIÓN CON TIERRA. El caso de una vivienda unifamiliar de tapial construida en el pre-Pirineo español

Àngels Castellarnau Visús

Arquitecta y co-directora de PERIFERIA. arquitectura y sostenibilidad scp.
Avda. Duque de Bivona 6, 22800 Ayerbe, Huesca. España.
Teléfono +34 974380829, +34 630726062
acv@periferia.com.es

Palabras claves: construcción con tierra, energía incorporada en la construcción (building embodied energy), emisiones CO₂, análisis ciclo de vida.

Resumen

La *energía incorporada* en la edificación corresponde a la energía primaria consumida en la extracción, manipulación, transporte y puesta en obra de los materiales de construcción. Ésta se mide en MegaJoules (MJ) por kg o por superficie de construcción, o en su equivalente kilo Watt hora (kWh) (1 kWh = 3,6 MJ) (Argüello Méndez; Cuchí Burgos, 2008).

Los distintos gases emitidos a la atmósfera, se miden en kilogramos de emisiones de CO₂ equivalentes producidas, su cuantificación informa del potencial de calentamiento global. (Argüello Méndez; Cuchí Burgos, 2008)

La edificación *casi cero emisiones* pretende reducir la el impacto ambiental de la edificación en todas sus fases, construcción, uso y demolición. La mochila energética que llevan los materiales de construcción es considerable. La manera más eficiente de reducirla es utilizar materiales locales poco manipulados, éstos son los materiales que llamamos de *kilómetro cero*. La tierra como material de construcción puede ayudarnos a conseguir menor impacto ambiental de nuestras edificaciones, como lo hizo en el pasado.

El presente artículo desarrolla el estudio comparativo que evalúa el “impacto ambiental” de una edificación diseñada de forma convencional y que cumple las prescripciones del Código Técnico de la Edificación (CTE), versus la misma edificación diseñada y construida en tierra con la técnica del tapial y con criterios constructivos que persiguen de forma consciente la reducción del impacto ambiental de la misma, y que también cumple el CTE.

1. PRESENTACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

Los flujos de los recursos que tienen lugar en los procesos edificatorios, permiten relacionar la edificación con su incidencia medioambiental.

A lo largo de la historia se han ido sustituyendo los materiales locales por otros que se obtienen por procedimientos de extracción más potentes, que provienen de zonas más alejadas y que conllevan un proceso de producción más sofisticado. Estos materiales suponen un mayor coste energético y un mayor impacto ambiental. La cuantificación de estos impactos permite la evaluación de las futuras mejoras.

1.2 Estado del arte

En España en 2006 aparece el Código Técnico de la Edificación (de obligado cumplimiento) éste persigue la limitación de la demanda energética de los edificios. En su desarrollo se ha implementado la etiqueta energética que permite, a partir de la aplicación de los programas LIDER y CALENER, la cuantificación de las emisiones de CO₂ en la fase de uso de la edificación a evaluar en fase de proyecto.

En el año 2013 está prevista la entrada en vigor de la modificación del CTE en su documento básico HE relativo a la justificación de la eficiencia energética de la edificación, lo que supondrá la certificación energética con la emisión de la etiqueta energética correspondiente de la edificación una vez ya construida, en relación al uso de la edificación.

Hasta la fecha no existe normativa que incida en el cierre de ciclo de materiales y la cuantificación de los impactos derivados de la construcción de la edificación.

La obtención de datos de los ciclos de vida de los materiales es de gran complejidad, pero existen bases de datos a nivel europeo y español que permiten hacer un pre-dimensionado y, como en este caso, un estudio comparativo. Este estudio permite detectar los puntos débiles en cuanto a gasto energético y emisiones de CO₂ de los sistemas constructivos que utilizamos y evaluar posibles mejoras.

A pesar de que los datos absolutos difieren de la realidad puesto que los datos precisos del ciclo de vida de los materiales varían según la localización de la obra y la procedencia exacta de los materiales colocados en obra, a partir de los datos que tenemos podemos realizar:

- Una evaluación del global de consumo energético y emisiones de CO₂ a lo largo del ciclo de vida de los materiales utilizados en la construcción de un edificio concreto, con el fin de evaluar la eficiencia energética de la fase de construcción.
- Un estudio comparativo de impacto ambiental de los sistemas constructivos.
- Cuantificar la incidencia en el impacto de la selección de los materiales del edificio con criterios de reducción del consumo energético y emisiones a lo largo el ciclo de vida de los mismos.
- Impulsar sistemas constructivos de baja carga energética como es el caso de la construcción con tierra basándose en su bajo impacto ambiental.

En este caso dado que no se cuenta con una base de datos que recoja los datos del sector productivo en Aragón, se ha utilizado la base de datos metaBASE⁽¹⁾ del Instituto de Tecnología de la Construcción de Catalunya (ITeC), en concreto el Banco BEDEC. Esta base de datos nos proporciona información de los indicadores de gasto energético y emisiones de CO₂ de los materiales y de los procesos de ejecución utilizados de cada elemento o sistema constructivo.

1.3 Objetivos

El objetivo general de la investigación es demostrar y cuantificar la reducción de la energía incorporada en fase de construcción de una vivienda gracias a la utilización del Tapial como muro de carga.

Los objetivos específicos son:

- La cuantificación del gasto energético y las emisiones de CO₂ de del sistema constructivo de la tapia en comparación con un sistema de muros de carga de bloque cerámico aligerado tipo termoarcilla.
- La identificación de los capítulos de la obra en los que la selección consciente de materiales supone una reducción significativa de las emisiones de CO₂ derivadas de la construcción de una edificación concreta.

2. METODOLOGÍA

Se redacta un Proyecto Básico y de Ejecución de una vivienda unifamiliar entre medianeras en el que se detallan los elementos constructivos. La vivienda estudiada está ubicada en la localidad de Ayerbe en la provincia de Huesca en el Prepirineo Aragonés, al noreste de la península ibérica. La zona climática en la que se ubica la edificación según la clasificación

Köppen en una Cfa que corresponde a un clima templado sin estación seca con un verano caluroso.

En base a las mediciones redactadas para el proyecto, de la vivienda se plantean sendas hipótesis.

En la primera hipótesis (o el proyecto original) los muros de carga de las plantas baja y primera se resuelven mediante un muro de triple hoja, la hoja interior es de bloque cerámico aligerado tipo termoarcilla, la intermedia un aislamiento térmico de poliestireno extrudido y la hoja exterior de ladrillo hueco doble cerámico.

En la segunda hipótesis se sustituye el muro de carga por un muro de tapia hecha a base de una mezcla de tierra y paja local y calicostrada (revoco o costra que se construye a la vez que la tapia) con mortero de cal.

Se obtienen los valores globales de gasto energético y emisiones de CO₂. A continuación se acotan los capítulos de las mediciones que no varían en función del sistema constructivo, serán una constante.

De la base de datos BEDEC se obtienen los datos de los sistemas constructivos; los que no aparecen en esa base se crean mediante los datos unitarios obteniendo por asimilación tanto los datos de los materiales como de su puesta en obra.

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Descripción de los sistemas constructivos

La vivienda unifamiliar evaluada consta de una planta semienterrada, una planta baja y una planta bajo-cubierta.

Hipótesis 1:

Esta hipótesis corresponde a una edificación convencional, edificada con los materiales y los sistemas constructivos habituales en la actualidad y en la zona.

Se trata de una edificación de muros de carga de bloque de cemento armado y relleno de hormigón, que arranca desde una cimentación corrida de hormigón armado bajo muros, uno de ellos contiene una calle por la que circulan vehículos. Sobre estos muros se construye un forjado unidireccional de semi-viguetas de hormigón armado y bovedilla de cemento. Sobre los muros arrancan los muros de carga de bloque cerámico aligerado de 24 cm en la hoja interior, un aislamiento de poliestireno de 5 cm y una hoja exterior de ladrillo hueco doble cerámico. El revestimiento exterior será un revoco de mortero de cemento y el interior un enyesado.

Las estructuras de techo de planta baja y de cubierta se resuelven mediante forjados unidireccionales de semi-viguetas de hormigón y bovedilla de cemento. El aislamiento de cubierta será 5 cm de poliestireno extrudido y la cobertura será de teja cerámica mixta.

La carpintería exterior es de aluminio con vidriería de doble vidrio con cámara.

Hipótesis 2:

Se construyen los muros de sótano y su cimentación a base de hormigón en masa. En la cabeza de éstos muros se construye un zuncho de HA en el que descansa un forjado de vigueta de HA, rasillón cerámico y capa de compresión de 5 cm. Sobre estos muros arranca un muro de tapia de tierra y paja locales construido con costra interior y exterior de mortero de cal.

Los forjados de techo de planta baja y la cubierta son de madera aserrada y descargan en unos zunchos de madera embebidos en la tapia. En la cubierta se colocará un aislamiento de lana de oveja y una impermeabilización transpirable. La cobertura es de teja cerámica mixta.

La carpintería exterior se coloca de madera de pino con vidriería con cámara tipo “climalit”.

3.2. Identificación de las partidas constantes y variables

Se han considerado partidas constantes las partidas de la medición que no varían al cambiar el sistema constructivo de los muros, forjados, etc.

Las partidas variables son aquellas sobre las que se puede incidir significativamente con el fin de reducir los impactos energéticos.

En este caso la solución del muro de carga de tapia repercute en otros sistemas como la estructura horizontal o los muros de carga/contención del sótano derivándose de este cambio una serie de modificaciones.

Al proyectar con “sensibilidad” frente a los impactos ambientales se adoptan una serie de medidas que corrigen el valor total de los impactos; es decir, al sustituir los muros de carga por muros de tierra se elimina (por una cuestión de concepto del sistema constructivo) los forjados de vigueta de hormigón armado que cargan sobre los muros de tierra, y se opta por unos forjados más ligeros y significativamente menos rígidos de viguetas de madera de pino aserrada y tabla de madera de pino.

Este cambio en el sistema constructivo de los forjados supone una minoración de las solicitaciones en la cabeza de los muros y una reducción de los empujes horizontales. El muro de tapia, se dimensiona de manera que con su espesor absorba estos empujes. Los muros de sótano, se construyen de la misma anchura pero de Hormigón en masa, así como la cimentación corrida bajo los muros. Al eliminar el hierro en los muros se busca reducir significativamente el impacto ambiental.

4. IMPACTOS AMBIENTALES ASOCIADOS A LA CONSTRUCCIÓN

La vivienda cuenta con una superficie construida de 96,7 m² en el sótano y de 179,5 m² en la vivienda. Es decir en total se trata de una edificación de 276,2 m² de superficie construida.

A continuación se desglosan los datos de los impactos asociados a la construcción de la vivienda de forma comparativa entre ambas hipótesis:

Tabla 1. Desglose del peso de los materiales usados en cada subsistema de la construcción para sendas hipótesis

		hipótesis 1 (kg)	hipótesis 2 (kg)
1	Cimentación y saneamiento enterrado	129.886,55	128.764,20
2	Estructura	371.188,92	313.656,51
3	Albañilería	27.576,99	17.420,33
4	Cubierta	11.590,28	11.590,28
5	Aislamiento e impermeabilizaciones	1.659,68	2.838,88
6	Revestimientos y pavimentos	72.396,21	29.351,48
7	Carpintería y cerrajería	2.665,63	2.626,96
9	Pintura	122,52	122,52
10	Instalaciones	4.053,35	4.053,35
		623.944,03	513.228,42

Tabla 2. Desglose de la energía incorporada a la fabricación y puesta en obra de los materiales usados en cada subsistema de la construcción para cada hipótesis

		hipótesis 1 (MJ)	hipótesis 2 (MJ)
0	Movimiento de tierras	6.875,80	6.875,80
1	Cimentación y saneamiento enterrado	75.757,91	59.983,20
2	Estructura	565.162,20	250.160,50
3	Albañilería	43.675,88	22.157,52
4	Cubierta	32.444,93	32.444,93
5	Aislamiento e impermeabilizaciones	1.659,68	2.838,88
6	Revestimientos y pavimentos	60.900,28	22.813,63
7	Carpintería, vidriería y cerrajería	166.323,95	68.941,38
9	Pinturas	11.718,02	11.718,02
10	Instalación de calefacción	32.353,18	32.353,18
11	Saneamientos y evacuación	3.129,63	3.129,63
12	Fontanería	6.994,27	6.994,27
13	Electricidad	11.785,21	11.785,21
14	Ventilación	5.785,82	5.785,82
15	Telecomunicaciones	266,92	266,92
		1.024.833,66	538.248,88

Tabla 3. Desglose de los kg emisiones de CO₂ equivalentes derivadas de la fabricación y puesta en obra de los materiales usados en cada subsistema para cada hipótesis

		hipótesis 1 (kg de CO₂)	hipótesis 2 (kg de CO₂)
0	Movimiento de tierras	1.795,47	1.795,47
1	Cimentación y saneamiento enterrado	42.116,87	9.383,18
2	Estructura	56.288,80	26.909,87
3	Albañilería	4.482,17	2.306,33
4	Cubierta	3.490,18	3.490,18
5	Aislamiento e impermeabilizaciones	23.329,65	7.310,95
6	Revestimientos y pavimentos	6.230,31	1.841,54
7	Carpintería, vidriería y cerrajería	22.487,31	4.785,00
9	Pinturas	1.728,88	1.728,88
10	Instalación de calefacción	2.507,30	2.507,30
11	Saneamientos y evacuación	650,76	650,76
12	Fontanería	684,16	684,16
13	Electricidad	1.482,75	1.482,75
14	Ventilación	440,79	440,79
15	Telecomunicaciones	35,61	35,61
		167.751,02	65.352,77

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En general cabe destacar que a pesar de suponer la hipótesis 2 una reducción de un 18% del peso global de la edificación, la reducción de la energía incorporada o coste energético y de las emisiones de CO₂ es del orden de un >50%. Esto demuestra que el peso de los materiales no es proporcional al coste energético o a las emisiones de CO₂ necesarios para su fabricación y puesta en obra.

5.1. Peso de los materiales de la construcción

De los datos obtenidos se deduce que la construcción de la hipótesis 1 supone 2.260 kg/m² de construcción y la construcción de la hipótesis 2 supone 1.500 kg/m². La media de kilogramos de materiales de construcción por m² de edificación en España está en 2.792,8 kg/m².⁽²⁾

Hay que tener en cuenta que la construcción convencional producida en España en la última década se basa en el desplazamiento de la masa de los muros, existente en la arquitectura tradicional española, a los forjados.

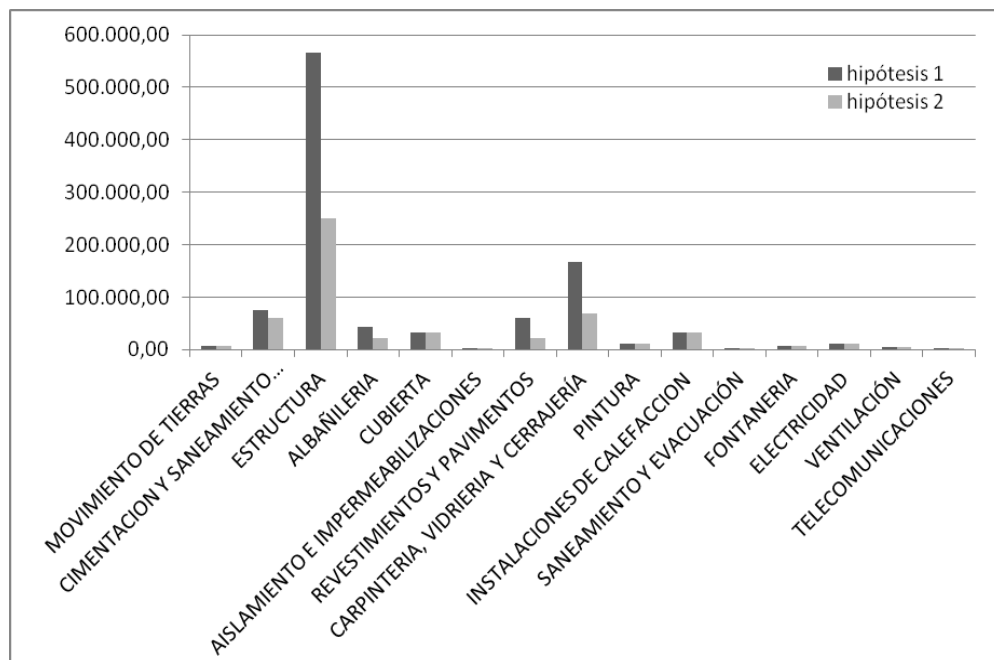
Este dato revela que los argumentos que defienden esta tendencia se contradicen con la realidad puesto que se ha pretendido aligerar los muros con el fin de reducir el peso pero la edificación en este clima obliga a la construcción masiva de los muros para protegerse del clima y esta es la forma en que se resuelve en la construcción española convencional actual.

Por otro lado, en la construcción de la hipótesis 2 el peso derivado de los muros de HM del sótano, podría en parte haberse resuelto en tapial con el fin de reducir su peso pero en proyecto no se estimó oportuno⁽³⁾.

Así mismo, por cuestiones de accesibilidad en la puesta en obra, los muros de medianería y de traba de la hipótesis 2 se han tenido que resolver mediante muro de bloque cerámico aligerado, lo que supone un peso inferior que si se hubiese resuelto todo mediante tapia.

Aún así se considera que los condicionantes particulares de esta edificación se pueden equiparar a los que pueden surgir en cualquier edificación actual a construir en medio urbano, con los usos actuales de la edificación y cumpliendo la normativa de la edificación vigente.

5.2. Energía incorporada (o coste energético) de los materiales y procesos constructivos



Gráfica1: Comparativa de energía incorporada en los materiales como consecuencia de su fabricación y puesta en obra en sendas hipótesis medida en MJ

Los subsistemas que más inciden en el cómputo global del coste energético son la estructura (vertical y horizontal) y la carpintería.

En cuanto a la estructura, la selección de materiales masivos con un bajo grado de manufactura permite, como veremos una reducción significativa de la energía incorporada, así pues la tierra (*kilómetro cero*) y la madera aserrada (150 km) cuentan con una energía incorporada significativamente inferior a cualquier material industrializado y comercializado.

Sus componentes se extraen directamente de la naturaleza mediante procesos energéticamente poco costosos, el transporte está localizado (de 0 a 150 km) y en este caso el proceso de manufactura se realiza en un único emplazamiento (en el caso de la madera 1 aserradero) y se transporta directamente a la obra.

Por otro lado, merece la pena desglosar los datos del muro de fachada con el fin de evaluar de forma más pormenorizada los valores obtenidos.

Tabla 4. Comparativa de la energía incorporada y de los kg emisiones de CO₂ equivalentes derivadas de la fabricación y puesta en obra de los sistemas de fachada para cada hipótesis

	MJ	kg de CO₂
Muro de fachada en hipótesis 1		
Pared de cerramiento de bloque de cerámica aligerada 24	109.741,69	8.880,22
Tabicón de ladrillo hueco doble con 7 cm de espesor	31.517,64	3.186,93
Aislamiento con placas de poliestirenoextrudido E=5 cm	16.133,85	2.382,13
Enforcado con mortero de cal - exterior	4.261,00	677,20
Enyesado a buena vista sobre parameto vertical interior	372,06	289,97
Total	164.926,24	15.416,45
Muro de fachada en hipótesis 2		
Muro tapial caliscastrado 2 caras de tierra natural	60.202,89	5.135,03
Total	60.202,89	5.135,03

De la comparación de los valores obtenidos para sendos sistemas constructivos de fachada podemos afirmar que el muro de tapial permite un ahorro del 64% de energía incorporada a los materiales de construcción y su puesta en obra.

La introducción en los últimos decenios de materiales plásticos (poliestireno, pvc, poliuretano, polipropileno, etc.) y algunos metales (aluminio) en los sistemas constructivos supone un aumento significativo de la energía incorporada a nuestros edificios, éstos materiales contienen una energía incorporada de entre 40-180 MJ/kg (Guía, 1998). Éstos materiales se van extendiendo y desarrollando cada vez papeles más específicos en la edificación lo que explica su crecimiento.

El desarrollo de este tipo de materiales, no naturales e imposibles de integrarse en los ciclos de la biosfera, nos hace más dependientes del control de la industria sobre los sistemas constructivos⁽⁴⁾, lo que supone una mayor tecnificación, por tanto manufactura y por tanto impacto ambiental, sin entrar en la obtención del material ni por supuesto en el reciclaje del mismo.

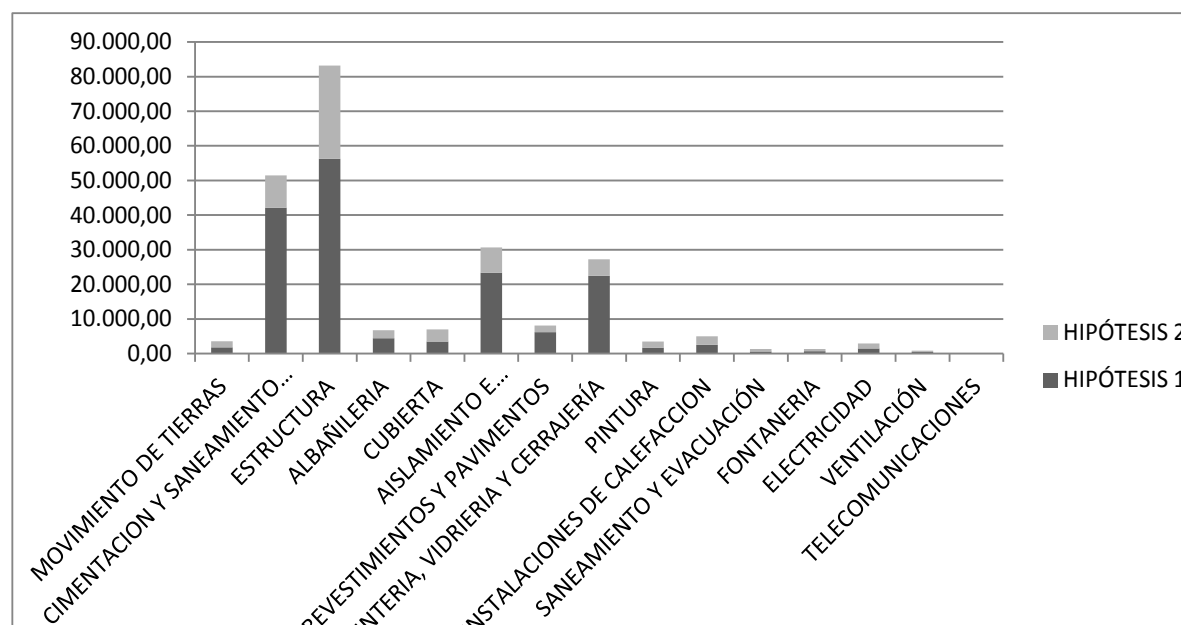
Se escapa de este estudio, por falta de datos, la cuantificación de la energía necesaria para el cierre del ciclo de los materiales, que correspondería en el caso de estas fachadas en la demolición, reutilización o en su defecto reciclaje de los materiales que intervienen en los muros.

Se puede intuir que el material del muro de tapial (mortero de cal con arena local, y tierra local estabilizada con paja) sólo conllevará la energía necesaria para su demolición y transporte de vuelta a la naturaleza. Mientras que en la demolición de los muros de termoarcilla, con los yesos y cementos adheridos y la separación del poliestireno, el cierre del ciclo material supondrá seguro un mayor coste energético.

En cuanto a la estructura horizontal, los sistemas con peores valores asociados son los forjados, las vigas y los zunchos de HA. La utilización de forjados y zunchos de madera aserrada supone una reducción del 83% de la energía incorporada a los materiales y sistemas constructivos de estructura horizontal.

Una vez más en caso de evaluar el cierre de ciclos materiales, la madera es de fácil reutilización en luces de hasta 4 m en el ámbito residencial y en su caso es de fácil reciclado.

5.3. Emisiones de CO₂



Gráfica 2: Comparativa de kg de emisiones de CO₂ equivalentes producidas a causa de la fabricación y puesta en obra de los materiales de construcción en sendas hipótesis.

En el caso de las emisiones de CO₂, vemos que los aislamientos plásticos (en este caso poliestireno) y todavía más significativamente las láminas impermeables de las cubiertas (en este caso EPDM (caucho de etileno propileno dieno) de la hipótesis 1, suponen por sí mismas un vertido de unos 15 000 kg de CO₂ equivalente a la atmósfera.

Esto se ha corregido en la hipótesis 2 mediante la colocación de aislamientos naturales de paja de cebada, lana de oveja y corcho y mediante la colocación en cubierta de una lámina transpirable de polipropileno muy ligera.

De la misma manera que en el caso de la energía incorporada, el acero y el cemento, vierten el doble de kg de CO₂ equivalente que la estructura de tierra y madera.; y como se observa en la tabla 4, el subsistema del muro de fachada vierte, en el caso de la utilización de piezas cerámicas prefabricadas y un aislante de poliestireno, tres veces los kg de CO₂ que vierte la ejecución del muro de tapia calicostrado.

Por último destacar que la carpintería de aluminio, al igual que en relación al coste energético, incide muy significativamente en las emisiones de kg de CO₂ equivalente, evitando en este caso de estudio, el vertido de un 80 % de gases a la atmósfera con la colocación de carpintería de madera. Y suponiendo, por sí mismas un 17 % del total de kg de CO₂ equivalente vertidos derivados de la fabricación y puesta en obra de los materiales de construcción en la vivienda (hipótesis 1).

6. CONCLUSIONES

El hecho de utilizar bases no adaptadas localmente hace que no se pueda precisar en cuanto a la energía incorporada de los materiales locales y poco o nada manufacturados (grava, cal, madera, tierra, paja, aislamiento de lana de oveja, revocos de arcilla). Por no tener estos datos se han despreciado estos matices en el cómputo global que seguro mejorarían significativamente los resultados.

La edificación con tierra permite la reintroducción de los materiales locales en los sistemas constructivos, a la vez que permite reducir a 1/3 las emisiones de CO₂ vertidas a la atmósfera y a 1/4 la energía incorporada, como consecuencia de la construcción de una fachada.

La aplicación de sistemas de construcción con tierra permite una serie de adecuaciones del resto de sistemas de la edificación que supone menor rigidez estructural y una menor industrialización de los materiales, dando cabida a materiales existentes en la construcción tradicional, ya sea de carácter orgánico como inorgánico. Éstos materiales, al no requerir de procesos de industrialización, al final de su vida útil son fácilmente reintroducibles en la biosfera por lo que prácticamente se consigue el cierre del ciclo material de los mismos y se reduce significativamente el impacto ambiental derivado de la construcción.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Álvarez, L., Coord. (2004). Análisis de los impactos ambientales asociados a los materiales de construcción empleados en la edificación en la isla de Lanzarote y propuesta desde una perspectiva ambiental, *Life Lanzarote 2001-2004*, Cabildo de Lanzarote, Programa MAB UNESCO, p. 122.

Argüello Méndez, Teresa del Rosario, Cuchí Burgos, Albert. *Análisis del impacto ambiental asociado a los materiales de construcción empleados en las viviendas de bajo coste del programa 10 x10 Con Techo-Chiapas del CYTED*. Informes de la Construcción, Vol. 60, 509, 25-34, enero-marzo 2008.

Cuchí Burgos, Albert. *Arquitectura i sostenibilitat*: TTS, Ediciones UPC, Barcelona, 2005.

Guía de la Edificación Sostenible (1998), Institut Cerdà. MOPU.

Notas

¹ Metabase, Banco BEDEC, ITeC (Instituto Tecnológico de Cataluña). www.itec.es

² Dato obtenido de un estudio por el CIES (Centre d'Iniciatives per a l'Edificació Sostenible en el que se evaluaron 200 edificios del total de proyectos visados en el COAC (Colegio Oficial de Arquitectos de Catalunya) en tres años. Citado por Albert Cuchí Burgos en *Arquitectura y Sostenibilitat*, pag. 52. Ed.UPC.

³ En concreto la fachada norte no enterrada. Los forjados del sótano, de uso aparcamiento, en cumplimiento de la normativa de incendios vigente CTE- DB-SI, deben de tener una resistencia al fuego no alcanzable de forma económicamente razonable con una solución de madera, por ello se resuelve con un forjado de hormigón y cerámico.

⁴ Concepto desarrollado por Albert Cuchí Burgos en *Arquitectura y Sostenibilitat*, pag. 58. Ed.UPC.

Currículo

Àngels Castellarnau Visús, Arquitecta, doctorando *Energía y Medio Ambiente en la Arquitectura* de la Escuela Técnica de Arquitectura de Barcelona. Realiza investigación en los ámbitos de las arquitecturas del agua, la gestión de recursos en el territorio y la construcción con tierra. Codirectora del estudio de arquitectura PERIFERIA. arquitectura y sostenibilidad scp.