

## SIMULACIÓN TÉRMICA DE FORJADOS. ANÁLISIS COMPARATIVO Y ESTUDIO DEL COSTE ENERGÉTICO

Julio Fernández-Ceniceros

Alpha Pernía-Espinoza

Eliseo Vergara-González

Andrés Sanz-García

*Grupo EDMANS. Universidad de La Rioja*

Javier Alfonso Cendón

*Universidad de León*

### Abstract

Nowadays, the building industry is going through a really difficult situation. This situation has forced both designers and manufacturers to provide cost competitive designs and products which offer an improvement in technical, energetic efficiency and environmental aspects.

In this paper, a research about thermal and energetic behavior of one-way slabs in residential buildings is presented. Firstly, FEM numerical simulations are carried out in order to get the coefficients of heat transmission (U-value) in different conditions. From the obtained results, conclusions about parameters influence such as slab thickness or block material are drawn. Finally, a study about energetic efficiency of slabs is shown. In this case, energy consumption during the construction process of building is taking into account.

**Keywords:** *One-way slab; thermal simulation; energy savings; FEM; building*

### Resumen

Actualmente, el sector de la construcción atraviesa una difícil situación que ha obligado, tanto a proyectistas como a fabricantes, a ofrecer diseños y productos competitivos en coste y que supongan una mejora a nivel técnico, de eficiencia energética y de compromiso con el medio ambiente.

En este artículo, se presenta un estudio sobre el comportamiento térmico y energético de forjados unidireccionales en edificios de viviendas. En un primer paso, se plantea la realización de simulaciones numéricas mediante el método de los elementos finitos con objeto de obtener el coeficiente global de transmisión de calor de estos componentes estructurales. A partir de los resultados obtenidos, se extraen conclusiones acerca de la influencia de parámetros como el canto del forjado o el material de las bovedillas. Finalmente, se plantea un estudio desde el punto de vista de la eficiencia energética tomando en cuenta la energía asociada a los procesos de extracción y manipulación de los materiales que componen el forjado.

**Palabras clave:** *Forjado unidireccional; simulación térmica; ahorro energético; FEM; construcción*

## 1. Introducción

Tradicionalmente, el diseño de estructuras se ha centrado en cumplir los requisitos de resistencia, funcionalidad y durabilidad, tratando de minimizar el coste en los materiales y en los procesos de fabricación y ejecución. Sin embargo, en los últimos años está cobrando cada vez mayor importancia la preocupación por realizar construcciones sostenibles pues, no sólo deben ser capaces de resistir los esfuerzos utilizando una combinación óptima de materiales que minimice el coste si no que, además, debe existir un compromiso con el medio ambiente. En este sentido, una de las principales preocupaciones pasa por reducir el gasto de energía de los edificios en el conjunto de su ciclo de vida, no en vano los datos existentes invitan a adoptar medidas correctoras: el 42% del consumo energético en Europa y el 35% de las emisiones de gases de efecto invernadero están relacionadas con la construcción de edificios (Tenorio et al., 2010).

Así, la importancia de abordar el diseño de estructuras desde un punto de vista sostenible es uno de los principales desafíos hoy día en el sector de la construcción. Proyectistas y fabricantes conducen sus esfuerzos hacia mejoras que tratan de minimizar el gasto energético asociado tanto a la etapa de uso como a las fases de construcción y posterior desmantelamiento. En este ámbito, uno de los elementos clave es el diseño de los cerramientos y particiones que conforman el edificio, fachadas y forjados, evitando en lo posible la transferencia de calor con el entorno. La normativa no se queda al margen en este aspecto y el Código Técnico de la Edificación (CTE) ha establecido en su *Documento Básico HE Ahorro de energía* algunas limitaciones en materia de consumo energético, con objeto de favorecer la construcción de edificios comprometidos con el medio ambiente. La solución presentada por el citado código normativo pasa por establecer valores límite para la transmitancia térmica de los elementos estructurales, aspecto que ha fomentado el interés por investigar nuevos sistemas constructivos e incorporar materiales que mejoren el aislamiento térmico.

En los últimos años, la literatura técnica ha recogido interesantes trabajos relacionados con la optimización de elementos estructurales encaminados a mejorar el comportamiento térmico y, en consecuencia, la eficiencia energética del edificio (Bouchair, 2008; Li et al., 2008; Sun et al., 2009; Sun et al., 2010). En esta dirección, son relevantes los estudios llevados a cabo por del Coz et al., tanto en la optimización de muros de fachada (del Coz et al., 2006; del Coz et al., 2007; del Coz et al., 2008) como en el diseño de forjados (del Coz et al., 2009, del Coz et al., 2010, del Coz et al., 2011), en los que se combina una geometría óptima de bloques y bovedillas con la utilización de hormigones ligeros de baja conductividad térmica. Por otro lado, no debe ignorarse la contribución de los propios materiales que conforman el elemento estructural en el gasto energético asociado a la extracción y producción de los mismos, lo que se ha denominado en la literatura anglosajona *embodied energy* y que algunos autores como Harris et al. (1999) o Venkatarama et al. (2003) han recogido en sus trabajos. En relación a este último tema, diversos investigadores coinciden en afirmar que la contribución del consumo energético asociado a los materiales y a la fase de construcción es sustancialmente más pequeña que la generada durante la fase de uso del edificio, que puede alcanzar hasta el 80% del total.

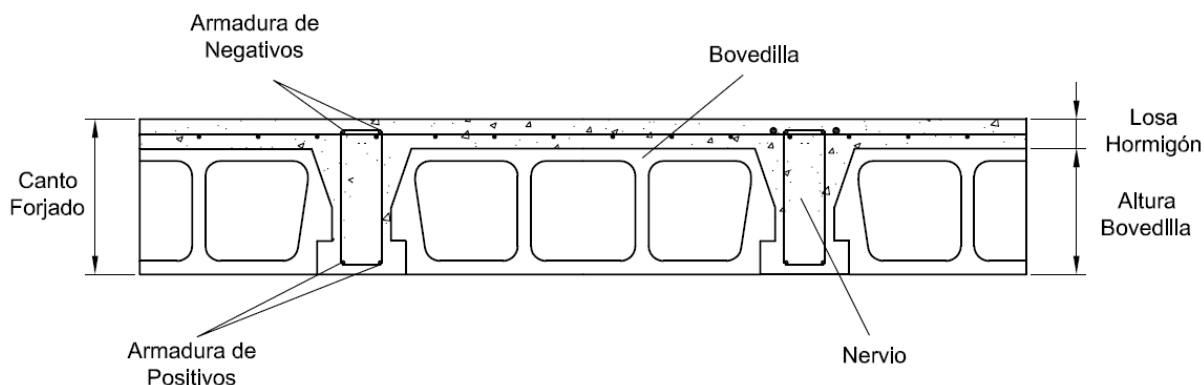
En este artículo se analiza el comportamiento térmico de forjados unidireccionales, se evalúan diferentes propuestas para alcanzar los límites establecidos en el CTE relativos al coeficiente de transmisión de calor (U) y se valora el coste energético de los materiales utilizados en cada una de las soluciones. En el segundo apartado de este trabajo se explican brevemente las características de los forjados, las peculiaridades de las tipologías propuestas y los aspectos relativos a la simulación térmica y a la caracterización energética. El apartado tercero se ha dedicado a la presentación y discusión de los resultados obtenidos y, finalmente, en el cuarto apartado se exponen las conclusiones alcanzadas.

## 2. Material y Métodos

La tipología de forjado estudiada en este trabajo es la de forjado unidireccional con nervio hormigonado *in situ*, construcción que se hizo popular en España antes de que se generalizase el empleo de viguetas prefabricadas (posguerra española) y que, posteriormente, dejó de utilizarse por la gran cantidad de mano de obra que requería su ejecución. Actualmente vuelve a emplearse aprovechando el entablado de seguridad que se coloca como base para la ejecución del forjado, siendo una de las soluciones más competitivas.

Los elementos que componen este tipo de forjados son mostrados en la figura 1:

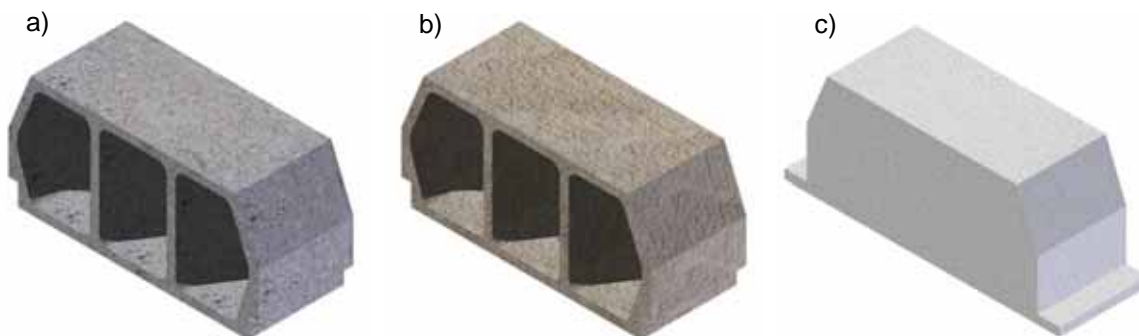
Figura 1: Sección transversal de un forjado con nervio hormigonado *in situ*



- **Armaduras de acero corrugado:** junto con el hormigón vertido *in situ* conforman los nervios del forjado y realizan la función resistente. Se colocan en las zonas superior e inferior de la sección con objeto de resistir los momentos flectores negativos y positivos, respectivamente.
- **Bovedillas:** aligerante colocado entre los nervios de las armaduras y, en este caso, sin función resistente. La elección del material de las bovedillas tiene una gran influencia en el comportamiento térmico del forjado, pues estos elementos representan una proporción importante de la sección. En la figura 2 puede observarse la geometría de los tres modelos utilizados en este trabajo: hormigón convencional (HC), hormigón ligero (HL) y poliestireno expandido (EPS).
- **Hormigón vertido *in situ*:** sobre el conjunto de bovedillas y armaduras se vierte el hormigón que rellena los nervios y conforma la losa superior. La elevada conductividad de este material hace que se forme un puente térmico a través de los nervios, influyendo negativamente en el comportamiento térmico de todo el conjunto.

La propuesta metodológica planteada en este artículo se basa en estudiar diferentes tipologías de forjado que cumplan los requisitos establecidos por la normativa en relación al comportamiento térmico. El análisis se particulariza para un caso de estudio en la región geográfica de La Rioja, correspondiente a una zona tipo D según las especificaciones del CTE y cuyos valores límite pueden encontrarse en la tabla relativa a la transmitancia térmica máxima de cerramientos y particiones en contacto con espacios no habitables (Tabla 1).

**Figura 2: Bovedillas. a) hormigón convencional, b) hormigón ligero, c) poliestireno expandido**



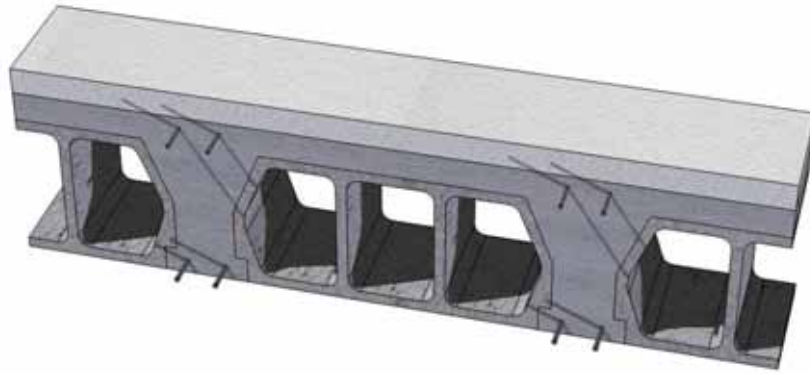
**Tabla 1. Transmitancia térmica máxima de suelos en contacto con espacios no habitables**

	ZONA A	ZONA B	ZONA C	ZONA D	ZONA E
$U_{lim, suelos}$ (W/m <sup>2</sup> K)	0,69	0,68	0,65	<b>0,64</b>	0,62

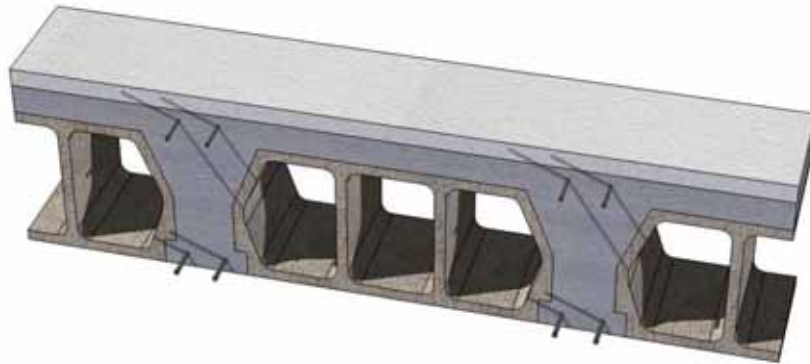
Las tres tipologías analizadas se detallan a continuación:

1. **Sección convencional con bovedilla clásica de hormigón (Figura 3).** El aislamiento térmico necesario para cumplir con las exigencias del CTE viene proporcionado por la adición de una plancha de poliestireno expandido (EPS) sobre la capa de compresión del forjado. El espesor de dicha capa es determinado por la limitación máxima del coeficiente U.
2. **Sección convencional con bovedilla de hormigón ligero (Figura 4).** En este caso, la incorporación de bovedillas de hormigón ligero con una conductividad sustancialmente más baja que las clásicas de hormigón, proporciona una mejora en el coeficiente de transmisión térmica y permite disminuir el espesor de la capa de aislamiento de EPS.
3. **Sección con rotura de puente térmico y bovedilla de EPS (Figura 5).** El aislamiento necesario para cumplir con la normativa se resuelve mediante la incorporación de bovedillas de EPS con alas. De este modo se produce la rotura del puente térmico existente en la zona del nervio del forjado, principal causante de la transmisión de calor al exterior.

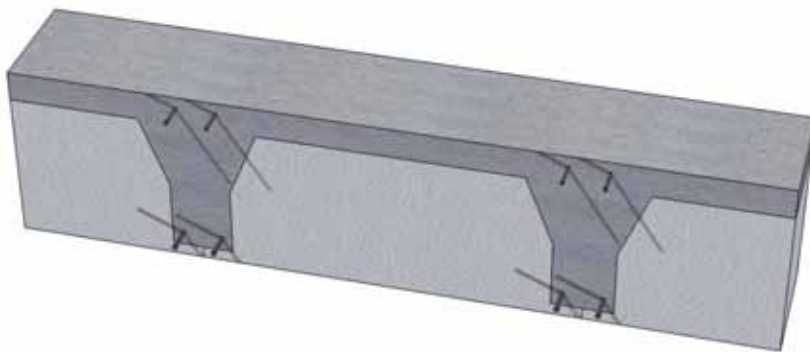
**Figura 3: Sección convencional con bovedilla clásica de hormigón**



**Figura 4: Sección convencional con bovedilla de hormigón ligero**



**Figura 5: Sección con rotura de puente térmico y bovedilla de EPS**



Una vez alcanzado el coeficiente de transmisión de calor establecido por el CTE, se puede afirmar que el comportamiento térmico de las diferentes propuestas de forjado va a ser muy similar, así como las pérdidas de energía que se van a producir durante la fase de uso del edificio. Por lo tanto, el siguiente objetivo que se plantea en este estudio es analizar el coste energético asociado a los materiales que componen el forjado, puesto que éste será el dato que marcará la diferencia entre las propuestas analizadas.

En los siguientes apartados se describen brevemente los aspectos relacionados con la simulación térmica así como la metodología utilizada para caracterizar el valor energético de los forjados estudiados.

## 2.1 Simulación térmica

La simulación térmica de los forjados se lleva a cabo mediante técnicas de elementos finitos por medio del software *THERM 6 Research Version*. Esta versión es adecuada para el cálculo de cerramientos y puentes térmicos en edificación, es de libre distribución y ha sido desarrollada en el Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL).

Las técnicas de elementos finitos permiten extraer mapas de distribución de temperaturas y observar la dirección del flujo de calor a través de la sección, identificando los puentes térmicos existentes en la misma. Del mismo modo, son capaces de proporcionar el coeficiente global de transmisión térmica (U), parámetro fundamental para poder establecer comparativas entre las diferentes tipologías de forjado estudiadas.

En el proceso de cálculo llevado a cabo se tiene en cuenta la transmisión de calor por conducción y convección. La sección es introducida mediante un modelo 2-D y son asignadas las propiedades térmicas correspondientes a cada material, de acuerdo con los valores mostrados en la tabla 2.

**Tabla 2. Propiedades físicas de los materiales**

Material	Densidad (kg/m <sup>2</sup> )	Conductividad, $\lambda$ (W/m·K)
Acero	7850	50
Hormigón	2300-2500	1,65
Hormigón armado	2300-2500	2,30
Hormigón ligero	1500	0,52
Poliestireno expandido	30	0,038

En relación a las condiciones de contorno, se adoptan los valores establecidos en el CTE para las resistencias superficiales exterior ( $R_{se}$ ) e interior ( $R_{si}$ ), teniendo en cuenta cerramiento horizontal y flujo de calor descendente:

$$R_{se} = 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$R_{si} = 0,17 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Por último, la caracterización del aire para los huecos de las bovedillas se lleva a cabo mediante un modelo acorde con el CEN (European Committee for Standardization), incluido en el software de elementos finitos utilizado. En el apartado de resultados se muestran los mapas de transmisión de calor a través de la sección, así como los valores obtenidos para el coeficiente U.

## 2.2 Coste energético de los componentes

La correcta evaluación del coste energético de los materiales que conforman el forjado depende de la geometría de la sección y la cuantía de las armaduras. Para determinar estos parámetros se realiza un programa de cálculo estructural en lenguaje R (R Development Core Team, 2009) que permite cuantificar el número de bovedillas, los kilogramos de acero y los litros de hormigón requeridos por metro cuadrado de forjado. Los resultados mostrados

en este trabajo hacen referencia a un forjado de 4 metros de luz, 200 kg/m<sup>2</sup> de carga permanente y 300 kg/m<sup>2</sup> de carga variable.

Los datos relativos al coste energético derivado de la extracción y manipulación de los materiales que componen el forjado han sido obtenidos del banco BEDEC del ITeC (Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña, 2010) y de catálogos proporcionados por fabricantes del sector (Tabla 3):

**Tabla 3. Coste energético de los materiales**

Material	Coste Energético (kWh/kg)
Acero	9,72
Hormigón en masa	0,25
Hormigón prefabricado	0,65
Hormigón ligero	0,69
Poliestireno expandido	32

### 3. Resultados y discusión

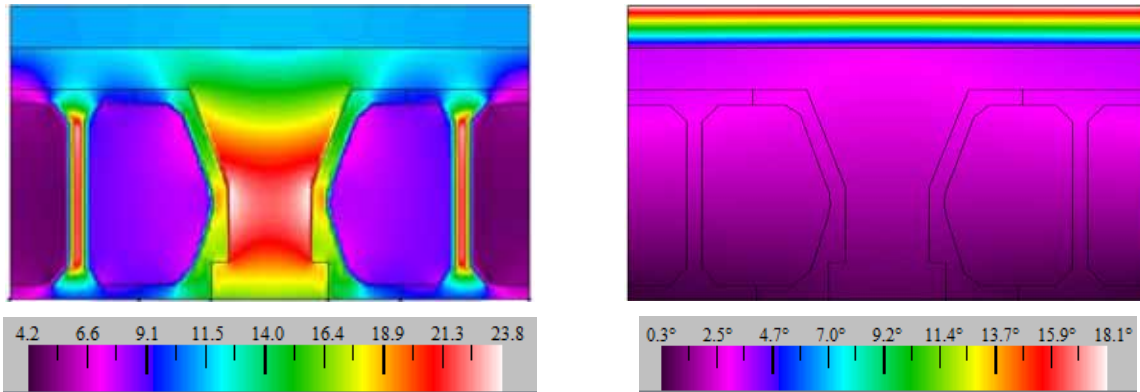
Con objeto de estudiar la influencia de la tipología de forjado, el material de las bovedillas y la altura de las mismas, se analiza el comportamiento térmico de las tres secciones presentadas en el apartado anterior y, para cada una de ellas, se varía la altura de la bovedilla a 200, 250 y 300 mm, obteniendo un total de nueve soluciones.

En las secciones convencionales con bovedilla de hormigón u hormigón ligero, es necesario añadir una plancha de material aislante (en este caso EPS) para limitar la transmitancia térmica a un valor inferior al indicado en el CTE. No ocurre lo mismo en la sección con bovedillas de EPS y rotura de puente térmico, pues este material proporciona un aislamiento muy superior a las otras dos alternativas estudiadas, suficiente para cumplir con la normativa.

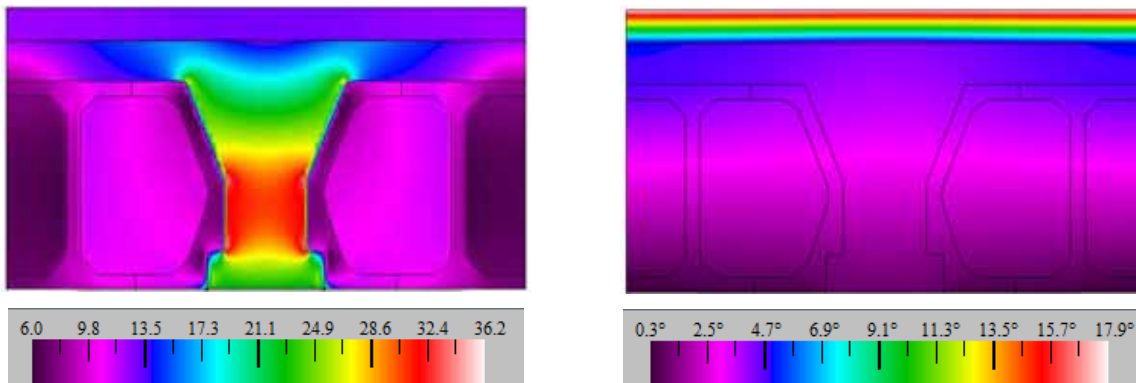
En la figura 6 se presenta la distribución del flujo de calor y el mapa de temperaturas para las tres tipologías analizadas, una altura de bovedilla de 250 mm y un salto térmico de 20 °C. Posteriormente, la tabla 4 recoge el valor de U para el total de casos estudiados y separa estos resultados en *forjado desnudo* y *forjado completo* (con la adición de la plancha de aislamiento de EPS).

La utilización de bovedillas de hormigón ligero supone una mejora respecto al hormigón convencional. En el forjado desnudo se consigue reducir el coeficiente U en un 13% y se eliminan los puentes térmicos sobre las paredes internas de las bovedillas (véase figuras 6a, 6b). El comportamiento de la sección del forjado con bovedilla de EPS es radicalmente distinto pues la transmitancia térmica de este material es muy baja en comparación con la del hormigón, consiguiéndose una extraordinaria capacidad de aislamiento sin necesidad de colocar capas adicionales. El puente térmico situado en la zona del nervio del forjado se resuelve mediante la incorporación de alas a las bovedillas, proporcionando la continuidad necesaria para limitar el coeficiente U a los valores establecidos por el CTE.

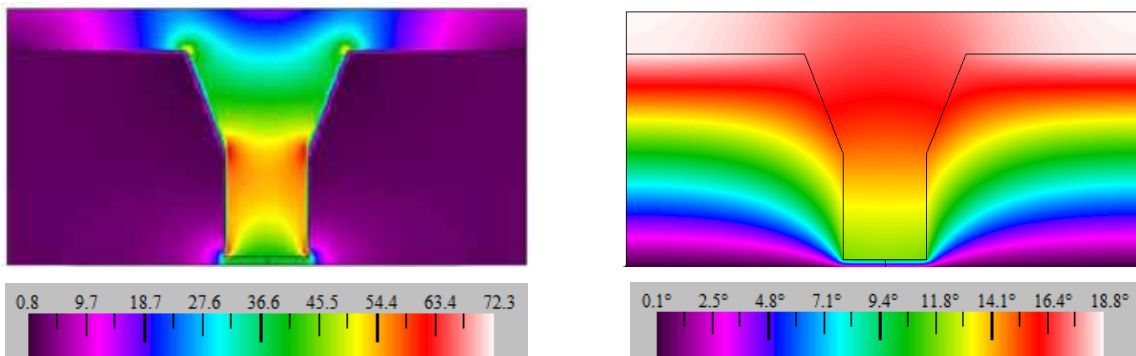
**Figura 6: Distribución de flujo de calor en  $W/m^2$  (izda.) y mapa de temperaturas en  $^{\circ}C$  (dcha.) para las tres propuestas de forjado y altura de bovedilla 250 mm**



*a) Sección convencional con bovedilla clásica de hormigón*



*b) Sección convencional con bovedilla de hormigón ligero*



*c) Sección con rotura de puente térmico y bovedilla de EPS*



**Tabla 4. Coeficiente de transmisión de calor (U)**

Sección Tipo	Forjado desnudo U (W/m <sup>2</sup> K)	Forjado completo U (W/m <sup>2</sup> K)
200 – EPS	-	0,5855
200 – HC	2,3698	0,5752 (+ 50 mm)*
200 – HL	2,0665	0,6323 (+ 40 mm)*
250 – EPS	-	0,5550
250 – HC	2,1537	0,5592 (+ 50 mm)*
250 – HL	1,8840	0,6228 (+ 40 mm)*
300 – EPS	-	0,5221
300 – HC	1,9576	0,6361 (+ 40 mm)*
300 – HL	1,6894	0,5991 (+ 40 mm)*

Nota: La codificación de la Sección Tipo hace referencia a la altura de la bovedilla en mm seguida por el material de la misma (EPS: poliestireno expandido, HC: hormigón convencional, HL: hormigón ligero).

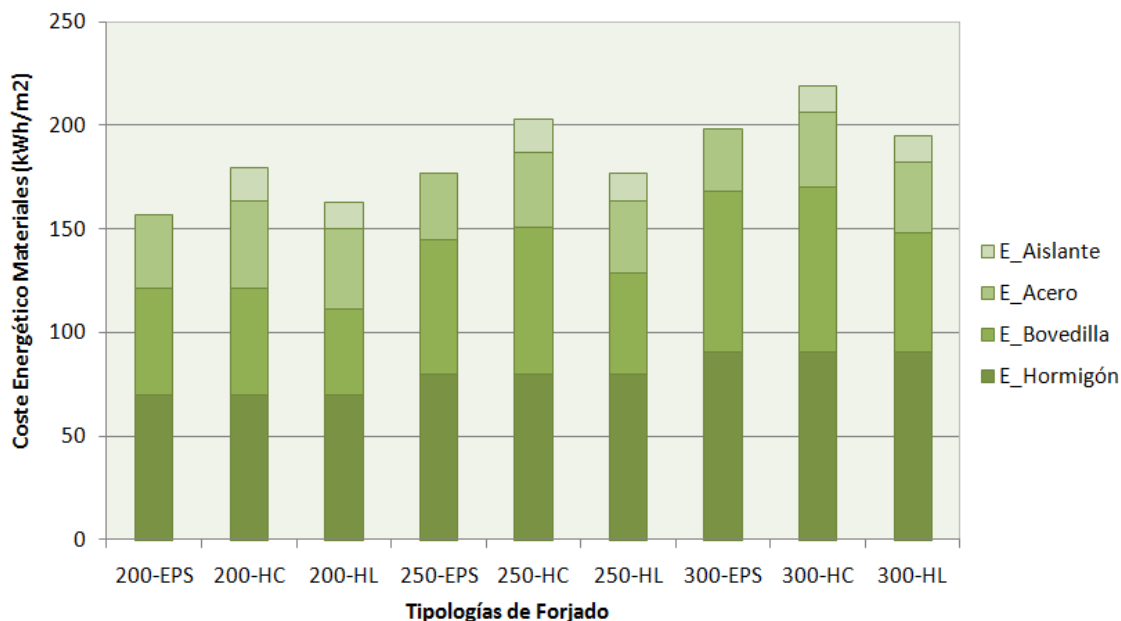
\* Espesor de la plancha de EPS para aislamiento térmico (mm)

Por último, se analiza el coste energético de los materiales que conforman cada una de las soluciones estudiadas (Figura 7). En relación al material de las bovedillas, el hormigón convencional supone un incremento en el coste energético respecto al EPS y, en mayor medida, al hormigón ligero. A este hecho hay que añadir la necesidad de colocar planchas de aislamiento de mayor espesor puesto que presenta el peor comportamiento térmico de las tres secciones valoradas. Las soluciones con bovedilla de EPS u hormigón ligero presentan un coste energético muy parecido, de tal forma que la elección de un sistema u otro dependerá de diversos factores como puedan ser el económico o el constructivo.

Desde el punto de vista del comportamiento térmico, un incremento en el canto del forjado no supone una mejora sustancial en el coeficiente U, tal y como puede verse en los resultados mostrados en la tabla 4. Además, la necesidad de incorporar mayor cantidad de hormigón vertido en obra incrementa el coste energético del forjado, aunque esta actuación permita disminuir la cuantía de las armaduras y con ello la energía asociada al acero. Por término medio, el aumento en el coste energético por metro cuadrado de forjado supone un 12% al utilizar bovedilla de canto 250 mm y un 23% al colocar bovedilla de 300 mm, respecto al cálculo realizado para bovedilla de 200 mm.

Así, la diferencia en la energía incorporada en los materiales que componen las diferentes soluciones puede ser importante, tal y como queda demostrado en la gráfica de la figura 7. A modo de ejemplo, el forjado con bovedilla de hormigón convencional y altura 300 mm incrementa el coste energético en 62 kWh/m<sup>2</sup> respecto a la variante de EPS y 200 mm de altura, mientras que el coeficiente de transmisión de calor para ambas soluciones es muy similar. Estos resultados vienen a remarcar la importancia del coste energético de los materiales en aquellos casos en los que se evalúan soluciones con un comportamiento térmico similar, pues el balance energético global no dependerá tanto de la fase de uso como de la fase de construcción.

**Figura 7: Coste energético de los materiales que componen el forjado**



#### 4. Conclusiones

Se ha presentado en este artículo un análisis comparativo de diferentes configuraciones de forjado unidireccional. El principal objetivo del estudio ha sido analizar el comportamiento térmico de estos elementos estructurales, con objeto de cumplir las exigencias establecidas en el CTE relativas al coeficiente de transmisión de calor (U) para cerramientos de edificios. La simulación térmica se ha llevado a cabo mediante técnicas de elementos finitos, pues permiten obtener campos de temperaturas, distribución del flujo de calor, identificación de puentes térmicos y valores para el coeficiente U con suficiente precisión. Se han obtenido excelentes resultados para la propuesta de bovedilla de EPS con alas, pues la baja conductividad de este material unido a la eliminación del puente térmico en la zona del nervio proporciona un coeficiente U por debajo de la limitación establecida en la normativa actual. En el caso de bovedilla de hormigón convencional u hormigón ligero, el aislamiento térmico se consigue mediante la adición de una plancha de EPS sobre el forjado, cuyo espesor varía entre 40 y 50 mm dependiendo de la altura de la bovedilla y el material utilizado.

En un segundo paso, se ha evaluado la energía incorporada en los materiales que componen la estructura. Desde el punto de vista energético, los mejores resultados se alcanzan con las soluciones de bovedilla de EPS o con la sección que incorpora la bovedilla de hormigón ligero. Por otro lado, se ha comprobado que incrementar el canto del forjado supone un aumento en el coste energético de los materiales mientras que la mejora del coeficiente U es inapreciable.

Finalmente, es importante destacar que el objetivo de este trabajo se ha centrado en el ámbito de la eficiencia energética y la sostenibilidad en las edificaciones, sin tomar en cuenta otros factores importantes como pueden ser la facilidad constructiva o el coste económico, siendo este último el principal determinante en la elección de la mayoría de los diseños.

## 5. Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia e Innovación de España por la financiación del proyecto DPI2007-61090 y a la Unión Europea por el proyecto RFS-PR-06035.

Finalmente, los autores también agradecen al Gobierno de La Rioja por la financiación otorgada a través del tercer Plan Riojano de I+D+i.

## 6. Referencias

- Bouchair, A. (2008). Steady state theoretical model of fired clay hollow bricks for enhanced external wall thermal insulation. *Build. Environ.*, 43, 1603-1618.
- del Coz Díaz, J.J., García Nieto, P.J., Martín Rodríguez, A., Lozano Martínez-Luengas, A., Betegón Biempica, C. (2006). Non-linear thermal analysis of light concrete hollow brick walls by the finite element method and experimental validation. *Appl. Thermal Eng.*, 26, 777-786.
- del Coz Díaz, J.J., García Nieto, P.J., Betegón Biempica, C., Prendes Gero, M.B. (2007). Analysis and optimization of the heat-insulating light concrete hollow brick walls design by the finite element method. *Appl. Thermal Eng.*, 27, 1445-1456.
- del Coz Díaz, J.J., García Nieto, P.J., Suárez Sierra, J.L., Betegón Biempica, C. (2008). Nonlinear thermal optimization of external light concrete multi-holed brick walls by the finite element method. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 51, 1530-1541.
- del Coz Díaz, J.J., García Nieto, P.J., Suárez Sierra, J.L., Peñuelas Sánchez, I. (2008). Nonlinear thermal optimization and design improvement of a new internal light concrete multi-holed brick walls by FEM. *Appl. Thermal Eng.*, 28, 1090-1100.
- del Coz Díaz, J.J., García Nieto, P.J., Domínguez Hernández, J., Suarez Sanchez, A. (2009). Thermal design optimization of lightweight concrete blocks for internal one-way spanning slabs floors by FEM. *Energy Build.*, 41, 1276-1287.
- del Coz Díaz, J.J., García Nieto, P.J., Domínguez Hernández, J., Alvarez Rabanal, F.P. (2010). A FEM comparative analysis of the thermal efficiency among floor made up of clay, concrete and lightweight concrete hollow blocks. *Appl. Thermal Eng.*, 30, 2822-2826.
- del Coz Díaz, J.J., García Nieto, P.J., Díaz Pérez, L.M., Riesgo Fernández, P. (2011). Nonlinear thermal analysis of multi-holed lightweight concrete blocks used in external and non-habitable floors by FEM. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 54, 533-548.
- Harris, D.J. (1999). A quantitative approach to the assessment of the environmental impact of building materials. *Building and Environment*, 34, 751-758.
- Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña. (2010). BEDEC: banco estructurado de datos de elementos constructivos. URL <https://www.itec.cat/>.
- Li, L.P., Wu, Z.G., He Y.L., Lauriat, G., Tao, W.Q. (2008). Optimization of the configuration of 290 x 140 x 90 hollow clay bricks with 3-D numerical simulation by finite volume method. *Energy Build*, 40, 1790-1799.
- Li, L.P., Wu, Z.G., Li, Z.Y., He, Y.L., Tao, W.Q. (2008). Numerical thermal optimization of the configuration of multi-holed clay bricks used for constructing building walls by the finite volume method. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 51, 3669-3682.
- R Development Core Team. (2009). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.

- Sun, J., Fang, L. (2009). Numerical simulation of concrete hollow bricks by the finite volume method. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 52, 5598–5607.
- Sun, J., Fang, L., Han, J. (2010). Optimization of concrete hollow brick using hybrid genetic algorithm combining with artificial neural networks. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 53, 5509-5518.
- Tenorio, J.A., Vega, L., Turmo, J., Burón, M., Alarcón, A., Martín-Consuegra, F., Burón, A., D'Andrea, R. (2010). Los requisitos del Código Técnico de la Edificación. Eficiencia energética e incremento de la sostenibilidad. Aplicación a los edificios de hormigón. *Revista Técnica CEMENTO HORMIGÓN*, 937, 60-81.
- Venkatarama, B.V., Jagadish, K.S. (2003). Embodied energy of common and alternative building materials and technologies. *Energy and Buildings*, 35, 129-137.

**Correspondencia** (Para más información contacte con):

D. Julio Fernández Cenicerós  
Grupo EDMANS. URL: <http://www.mineriadatos.com>  
Área de Proyectos de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Mecánica  
Edificio Departamental. ETSII de Logroño. C/ Luís de Ulloa, 20, 26004 Logroño (España).  
Teléfono: +34 690 205 105  
Fax: + 34 941 299 794  
E-mail: [julio.fernandezc@unirioja.es](mailto:julio.fernandezc@unirioja.es)