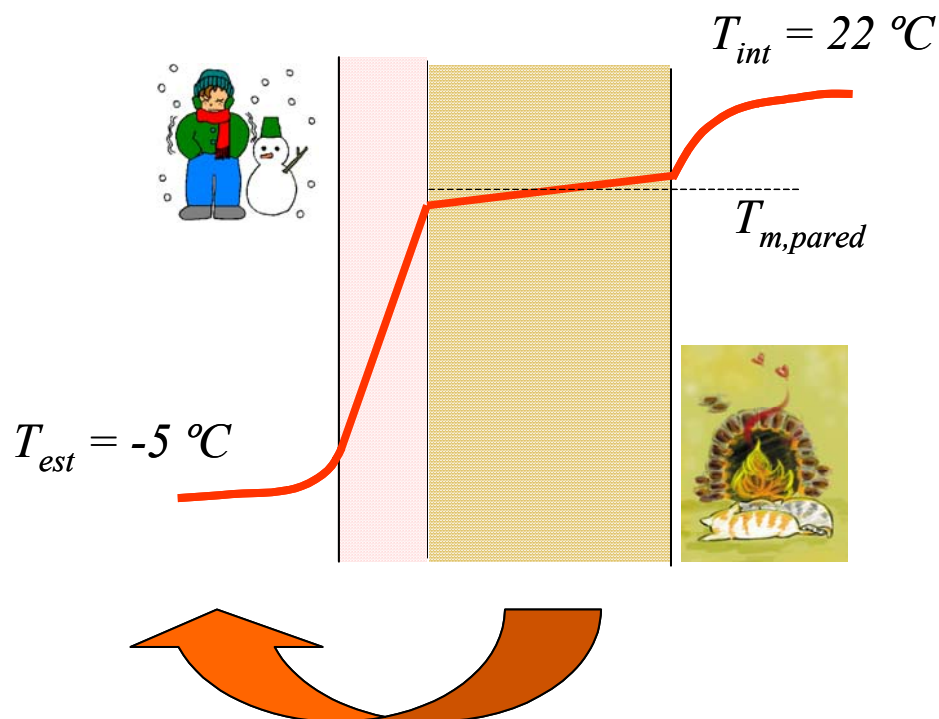


## ***Rotura de Puente Térmico Vertical y Perimetral en Muros Invertidos en Contacto Directo con el Terreno***



*IIT-04-034I*  
Xavier García Casals  
Julio 2004

## **INDICE**

1. Introducción, 3
2. El concepto de muro invertido, 4
3. Importancia de la rotura de puente térmico vertical, 6
4. Requerimientos de rotura de puente térmico de forjado de planta baja, 15
5. Solución integrada de rotura de puentes térmicos, 23
6. Conclusiones, 47
7. Referencias, 52

## **1. Introducción**

El proyecto dentro del que se desarrolla este trabajo consiste en el diseño, análisis e implementación de tres viviendas bioclimáticas y bioconstruidas en Torremocha del Jarama (Madrid). El proyecto se inició el año 2002 con el estudio geobiológico del terreno en el que se van a construir las viviendas (Ref.[1]) y el análisis del clima en el emplazamiento considerado (Ref.[2]). Posteriormente se realizó un análisis energético (Ref.[3]) sobre las distintas tipologías de vivienda bioclimática que se estaban considerando, haciendo hincapié en la energía consumida para la operación del edificio tanto para calefactor como para refrigerar, desde la óptica de la nueva legislación de próxima aplicación en nuestro país (Ref.[8]) e incorporando consideraciones de simulaciones dinámicas de los edificios (Ref.[9]). En (Ref.[4]) se desarrolló un análisis y optimización de las protecciones solares que se van a implementar en las viviendas con el fin de reducir el consumo energético para la operación de la vivienda y aumentar el nivel de confort. En (Ref.[5]) se abarcaron aspectos de optimización estructural de las tecnologías bioconstructivas empleadas y de la energía contenida en los materiales empleados para los forjados de las viviendas. En (Ref. [6]) se realiza una evaluación de la energía almacenada dentro de los materiales de la vivienda (Embodied Energy) comparando la solución bioconstruida con una solución convencional.

En (Ref.[7]) se desarrolla un análisis técnico comparativo de las distintas opciones disponibles para el cerramiento de las viviendas, desde el punto de vista de la capacidad de aislamiento térmico de los mismos bajo la óptica del próximo Código Técnico de la Edificación (Ref.[8]), y desde el punto de vista de su capacidad de almacenamiento de energía térmica para gestionar correctamente los aportes energéticos de origen renovable a la vivienda (solar pasiva, solar activa y biomasa). En este estudio se analizaron los distintos materiales actualmente disponibles en el mercado para constituir los cerramientos de una vivienda bioclimática (Ladrillo cerámico tosco, ladrillo cerámico macizo, bloque de Termoarcilla, bloque de Cannabric, bloque de Climablock, bloque de Arliblock, bloque de hormigón celular, bloque de tierra comprimida, adobe,...), haciendo hincapié en las soluciones de cerramiento monocapa, así como la solución propuesta a base de muro invertido y la solución convencional de muro bicapa. En este estudio se concluye que la solución de dos capas con configuración de muro invertido (aislamiento en el exterior) es mucho más apropiada desde el punto de vista de la capacidad de almacenamiento térmico inercial en los materiales del cerramiento que las opciones monocapa, y además, en emplazamientos de elevada severidad climática permite satisfacer mejor los requerimientos de aislamiento del cerramiento.

En la Ref.[10] se abarcó un estudio exhaustivo sobre las posibilidades reales de implementar el muro invertido con bloque de tierra comprimida (BTC), realizando un análisis detallado de embodied energy de esta opción frente a las otras opciones disponibles, así como un análisis de costes tanto para la implementación del BTC en el proyecto considerado bajo las distintas opciones disponibles (alquiler maquinaria, compra maquinaria, maquinaria automática,

maquinaria manual) y de forma comparativa con las otras soluciones constructivas disponibles (las analizadas en la Ref.[7]), como bajo la perspectiva de la rentabilidad de una empresa que adquiriera la maquinaria automática de producción de BTC para su uso en nuestra región. La conclusión de este estudio fue que bajo los elevados costes actuales de la maquinaria de producción de BTC, el escaso beneficio ambiental que proporciona esta solución frente a la solución convencional del ladrillo cerámico perforado relleno con tierra o mortero no queda justificado frente a su gran sobre-coste económico, conduciendo a costes de eliminación de CO<sub>2</sub> muy elevados frente a otras inversiones posibles para incrementar el grado de sostenibilidad de las viviendas. Por tanto, en este informe recomendaba el uso de ladrillos cerámicos perforados rellenos de tierra o mortero para configurar el muro invertido de las viviendas.

En este estudio analizamos mediante simulación numérica los requerimientos de rotura de puente térmico vertical en un muro invertido, proponiendo y evaluando las actuaciones de una solución integrada para rotura de puente térmico vertical del muro y puente térmico del forjado de planta baja en contacto con el terreno.

## **2. El concepto de muro invertido**

Frente a la solución constructiva convencional del muro bicapa en el que la mayoría del material constructivo de elevada inercia térmica queda fuera de la capa de aislamiento y por tanto no puede actuar como almacenamiento para gestionar la energía térmica en la vivienda, el muro invertido deja en la cara interior de la vivienda todo el material inercial, estando acabado en el exterior por una capa aislante. La disponibilidad actual de materiales aislantes pensados para estar dispuestos en el exterior del cerramiento (como Thermowall de Gutex) permite la implementación de esta solución constructiva.

En un muro invertido, la inercia del cerramiento suaviza las variaciones de temperatura en el interior de la vivienda, de tal forma que bajo un uso continuo del espacio climatizado se pueden reducir significativamente las cargas a satisfacer por los sistemas de climatización, tanto en temporada de calefacción como en la de refrigeración.

Es más, en el proyecto considerado, el sistema de distribución de calor y frío son muros radiantes. En estas condiciones, el muro invertido actúa como almacenamiento térmico del sistema de distribución de calor/frío, permitiendo que el sistema de generación de frío/calor trabaje prácticamente a la potencia media, no debiendo por tanto estar dimensionado para cubrir las puntas de demanda energética.

Además, en el proyecto considerado la generación de energía térmica se realiza exclusivamente mediante fuentes de energía renovable (solar térmica y biomasa), por lo que la capacidad de almacenamiento térmico del muro

invertido permite descargar considerablemente los requerimientos de almacenamiento térmico de la generación renovable.

Sin embargo, en un muro invertido, la parte interna del cerramiento con elevada capacidad de almacenamiento térmico y elevada conductividad térmica está directamente en contacto con el terreno a través de la cimentación, por lo que aparece un puente térmico vertical que puede degradar significativamente la capacidad de aislamiento de la capa aislante dispuesta en el exterior del muro. En los muros bicapa convencionales, al estar dispuesta la capa de aislamiento térmico cerca de la pared interior, no aparece este puente térmico vertical. En las siguientes figuras mostramos conceptualmente este puente térmico en condiciones de invierno y verano.

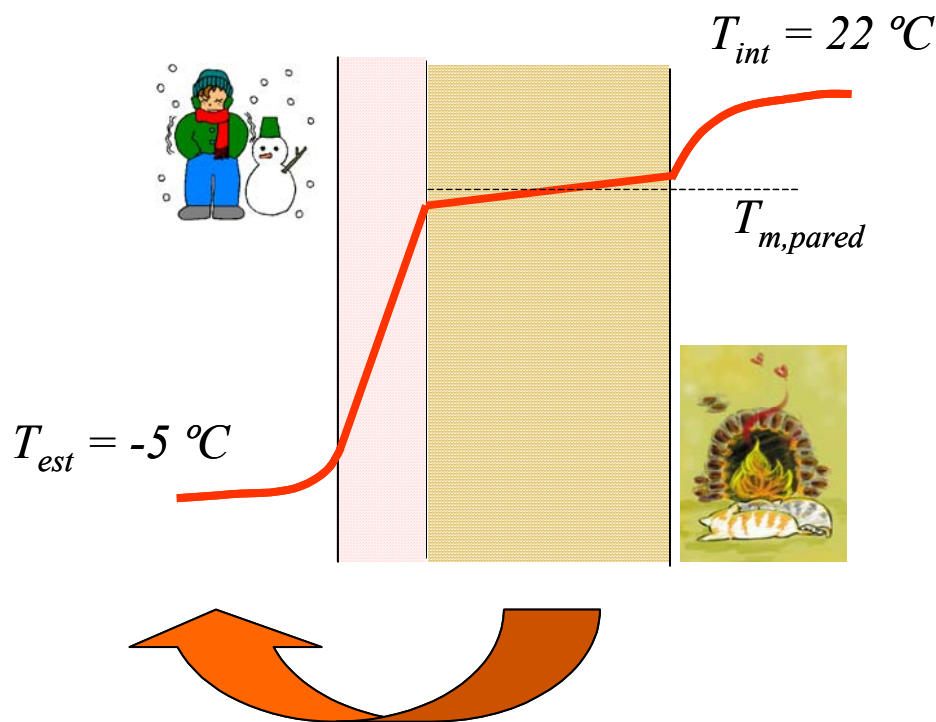


**Figura-1:** Pérdida de energía térmica por el puente térmico vertical de un muro invertido en régimen de invierno.

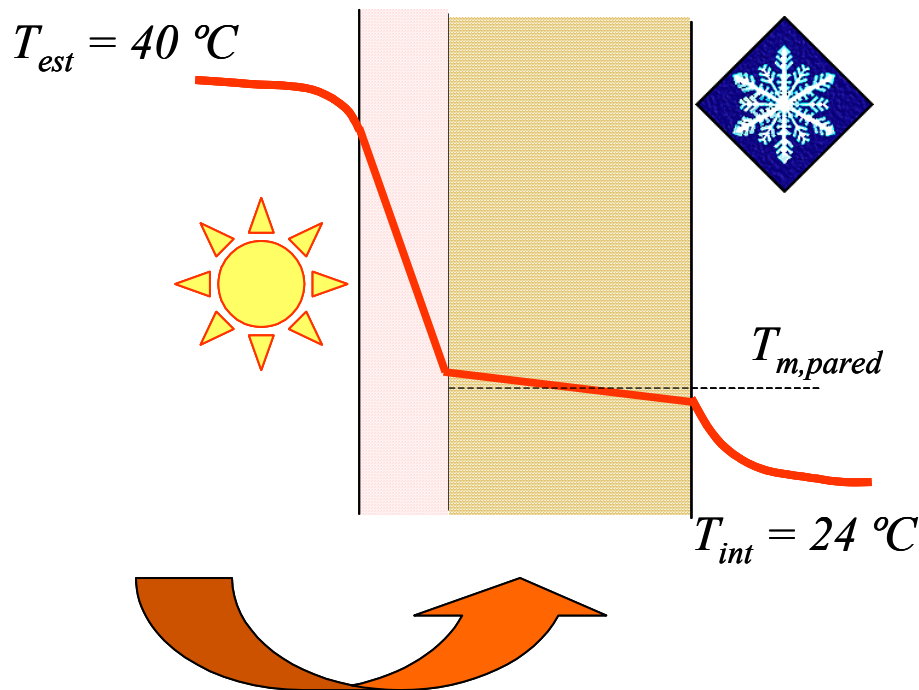


**Figura-2:** Ganancia de energía térmica por el puente térmico vertical de un muro invertido en régimen de verano.

Es preciso cuantificar la importancia de este puente térmico vertical con el fin de justificar la necesidad de introducir soluciones constructivas destinadas a la rotura de dicho puente térmico. En este estudio, mediante simulación numérica pasamos a cuantificar los efectos de dicho puente térmico así como las actuaciones de distintas soluciones constructivas propuestas.

### **3. Importancia de la rotura de puente térmico vertical**

En primer lugar vamos a evaluar la importancia de rotura del puente térmico vertical. Para ello asumiremos un muro invertido de 3 m de altura en contacto directo con el terreno (no incorporamos el efecto de la cimentación). El contacto directo con el terreno lo evaluaremos en este punto de forma preliminar mediante una conductancia bidimensional analítica, que para la geometría de muro considerada y la conductividad del terreno de  $k = 2,1 \text{ W/mK}$  resulta ser de  $U_b = 1,54 \text{ W/m}^2\text{K}$ . En el interior dispondremos 1,5 cm de mortero de cal, y en el exterior 6 cm de Thermowall (Gutex) con 1 cm de recubrimiento de mortero de cal.

Realmente el puente térmico vertical y el perimetral están acoplados a través de los nodos térmicos que comparten, de tal forma que la presencia de uno de ellos afecta al valor del coeficiente de transferencia del otro. Por tanto, el análisis detallado requiere el modelado de las regiones de desarrollo de ambos puentes térmicos y su acoplamiento térmico con el terreno. Más adelante abarcaremos el problema conjunto, pero desde el punto de vista conceptual

tiene interés separar ambos puentes térmicos para evaluar su importancia relativa. En este punto analizamos el puente térmico vertical aislándolo del perimetral mediante especificación de la conductancia desde la base del muro al ambiente exterior. En el siguiente punto analizamos el puente perimetral desacoplándolo del vertical mediante el establecimiento de hipótesis sobre la forma de las líneas de flujo.

Originalmente, como comentamos, el proyecto estaba planteado con bloque de tierra comprimida (BTC), con una mayor conductividad térmica y espesor que el muro de ladrillo tosco relleno de tierra actualmente considerado. Además, para la disposición del BTC se hace necesario disponer de un zócalo de unos 60 cm de altura que originalmente estaba planteado de mampostería caliza, es decir con conductividad superior a la del BTC. Todo ello hace que la importancia de la rotura del puente térmico vertical sea con el BTC incluso superior a la del ladrillo tosco.

En ausencia de puente térmico vertical, esto es, si la pared de apoyo del muro fuera adiabática, la distribución de temperaturas que tendríamos dentro del muro correspondería a la condición de transferencia unidimensional en que se basa el cálculo de los coeficientes de transferencia. En la siguiente figura mostramos la distribución de temperaturas resultante y el coeficiente global de transferencia alcanzado ( $U_{1D} = 0,505 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), que es el valor que adoptaremos como referencia para el análisis posterior.

$$U = 0,505 \text{ W/m}^2\text{K}$$

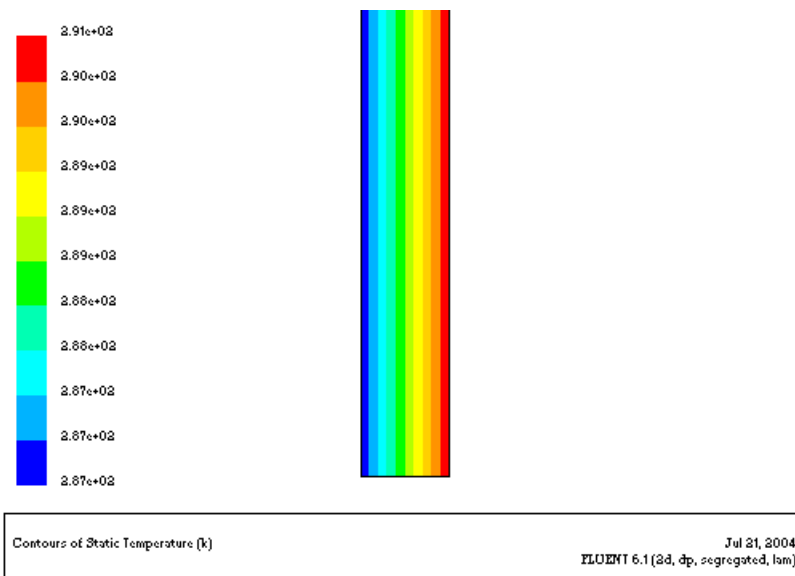
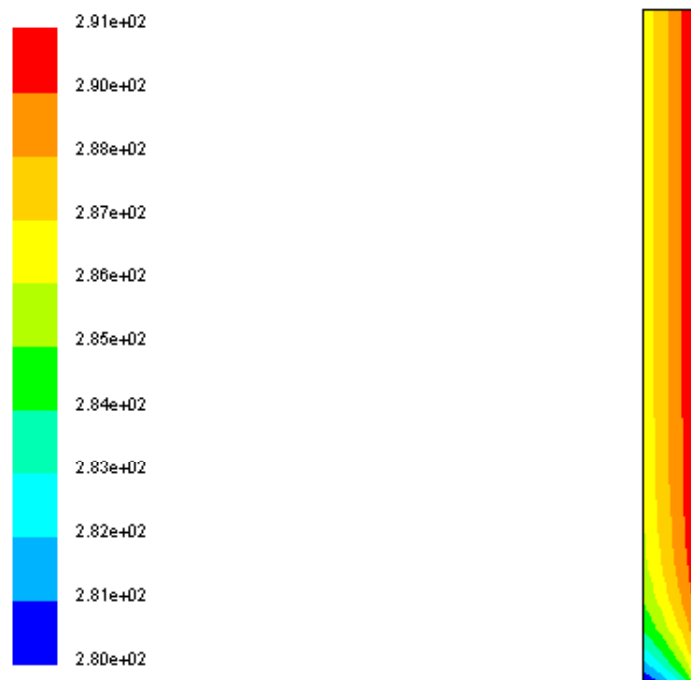


**Figura-3:** Distribución de temperaturas unidimensional en el muro exterior. Para que esta situación se produzca en la realidad sería necesario aislar térmicamente el apoyo del muro en el terreno.

Al colocar el muro en contacto con el terreno se desarrolla un puente térmico vertical aumentando la transferencia de calor por la parte inferior del muro. En las dos figuras siguientes podemos observar el efecto de este puente térmico vertical sobre la distribución de temperaturas en el muro y sobre el coeficiente de transferencia efectivo para evaluar las pérdidas térmicas desde el interior del muro al exterior. En la primera figura se ve el impacto del puente térmico sobre la magnitud real del muro (3 metros de altura), mientras en la segunda se muestra un detalle del puente térmico.

$$U = 0,5712 \text{ W/m}^2$$



Contours of Static Temperature (k)

Jul 20, 2004  
FLUENT 6.1 (2d, dp, segregated, lam)

**Figura-4:** Puente térmico en muro invertido de ladrillo con contacto directo al terreno. Magnitud real del muro.

$$U = 0,5712 \text{ W/m}^2$$

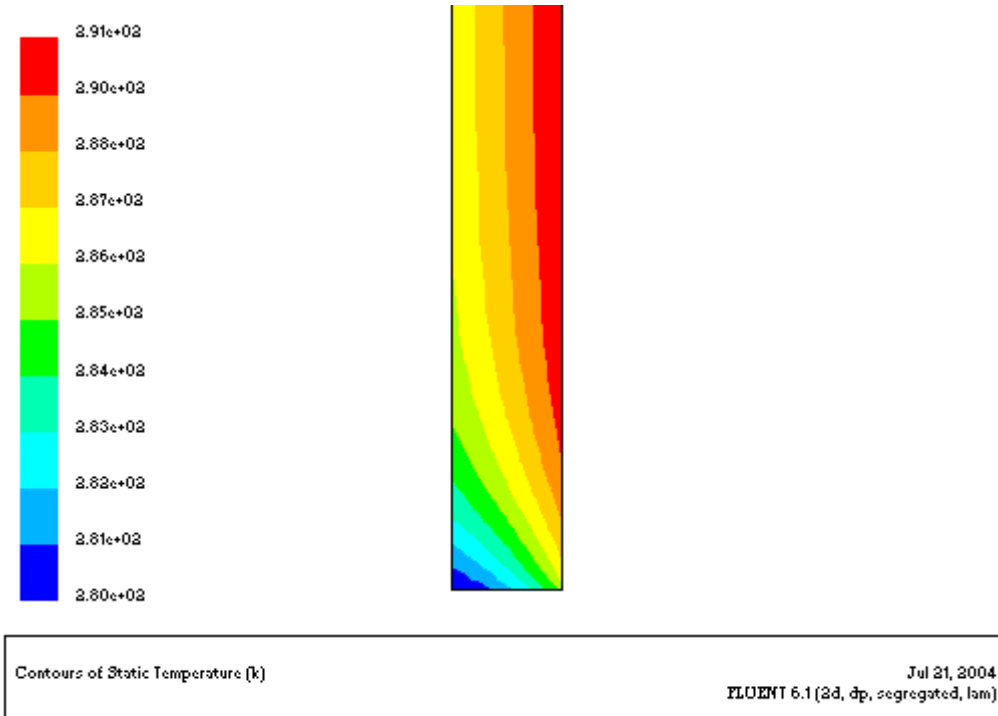


**Figura-5:** Puente térmico en muro invertido de ladrillo con contacto directo al terreno. Detalle parte inferior del muro.

Al emplear hiladas de Arliblock en la parte inferior del muro se dificulta el desarrollo del puente térmico vertical. para ver el efecto neto, y dado que el bloque de Arlibloc considerado genera un muro de mayor coeficiente de transferencia que el original, añadimos al Arlibloc un espesor exterior de aislante tal que su coeficiente global de transferencia sea el mismo que el del muro original. En estas condiciones, en las tres figuras siguientes vemos el efecto sobre el campo de temepaturas y coeficiente de transferencia de añadir sucesivas hiladas de Arlibloc. Como puede verse, la primera hilada es bastante efectiva en la reducción del coeficiente global de transferencia, pero la segunda y tercera ya no tanto, por lo que bastaría con un zócalo de una hilada.

$$U = 0,5486 \text{ W/m}^2$$

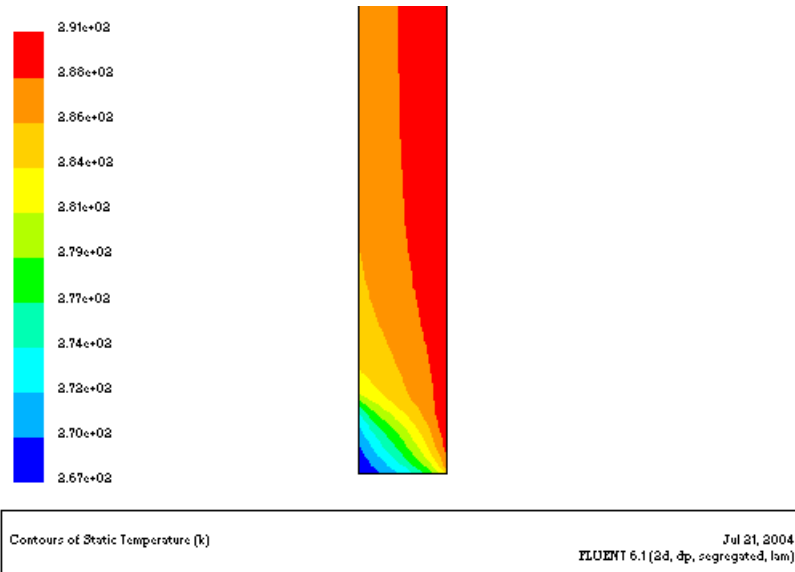


**Figura-6:** Efecto de añadir 1 hilada de Arlibloc con aislamiento exterior tal que proporcione el mismo  $U_{1D}$  que el muro original. Detalle parte inferior del muro.

$$U = 0,5462 \text{ W/m}^2$$

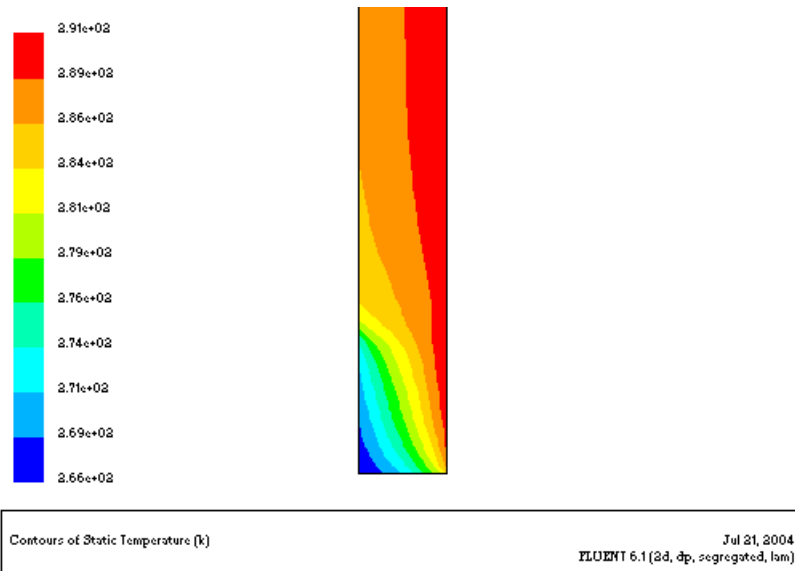


**Figura-7:** Efecto de añadir 2 hiladas de Arlibloc con aislamiento exterior tal que proporcione el mismo  $U_{1D}$  que el muro original. Detalle parte inferior del muro.

$$U = 0,5458 \text{ W/m}^2$$

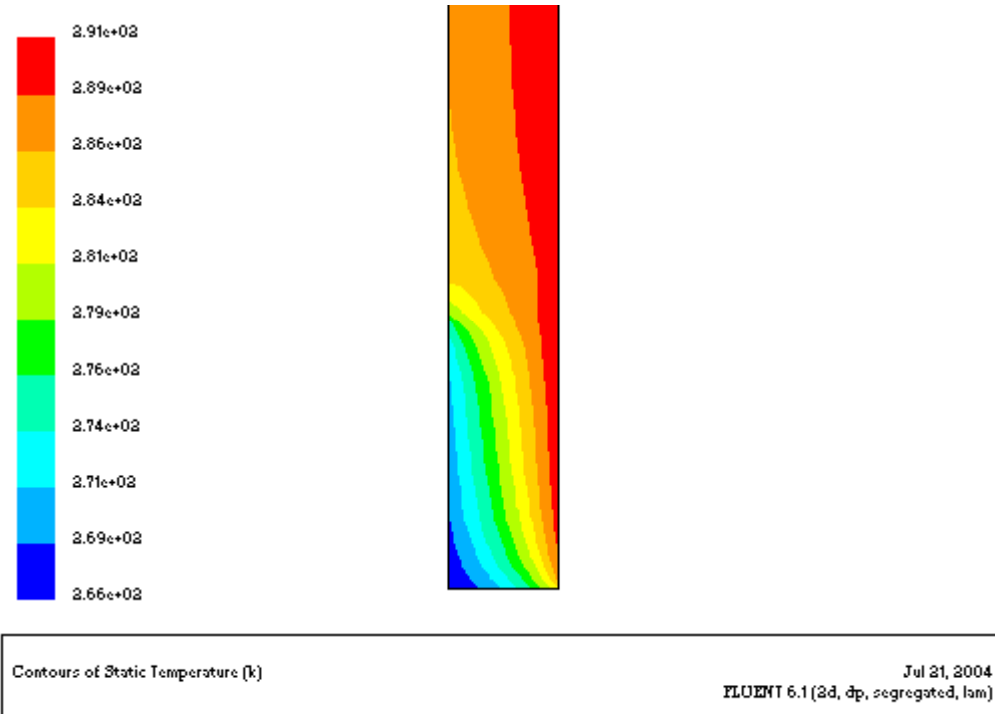


**Figura-8:** Efecto de añadir 3 hiladas de Arlibloc con aislamiento exterior tal que proporcione el mismo  $U_D$  que el muro original. Detalle parte inferior del muro.

Otras dos opciones son añadir las hiladas de Arlibloc sin aislamiento exterior adicional, o con el mismo aislamiento (6 cm Thermowall) que el resto del muro. En las siguientes 7 figuras mostramos los resultados correspondientes.

$$U = 0,5712 \text{ W/m}^2$$

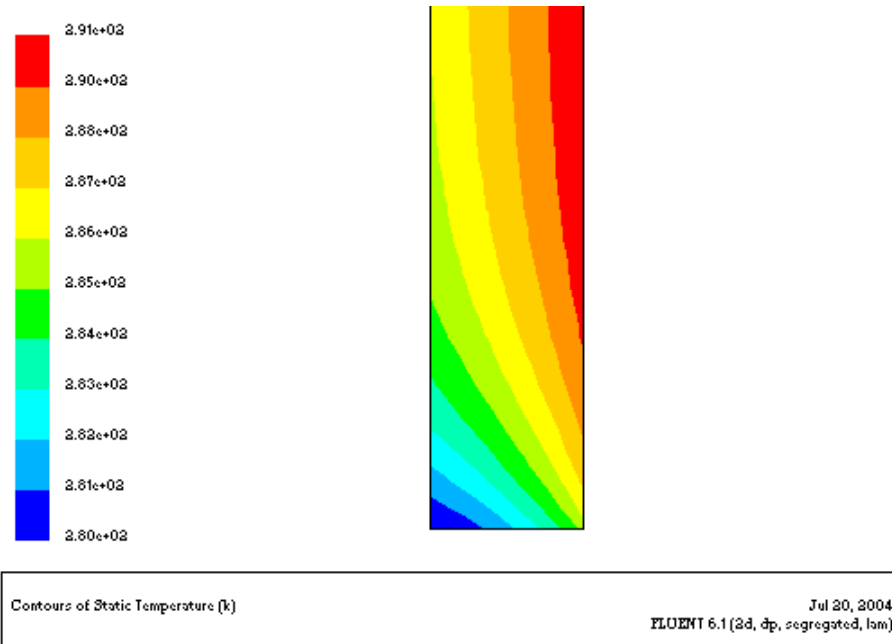


**Figura-9:** Puente térmico en muro invertido de ladrillo con contacto directo al terreno. Detalle parte inferior del muro.

$$U = 0,5661 \text{ W/m}^2$$

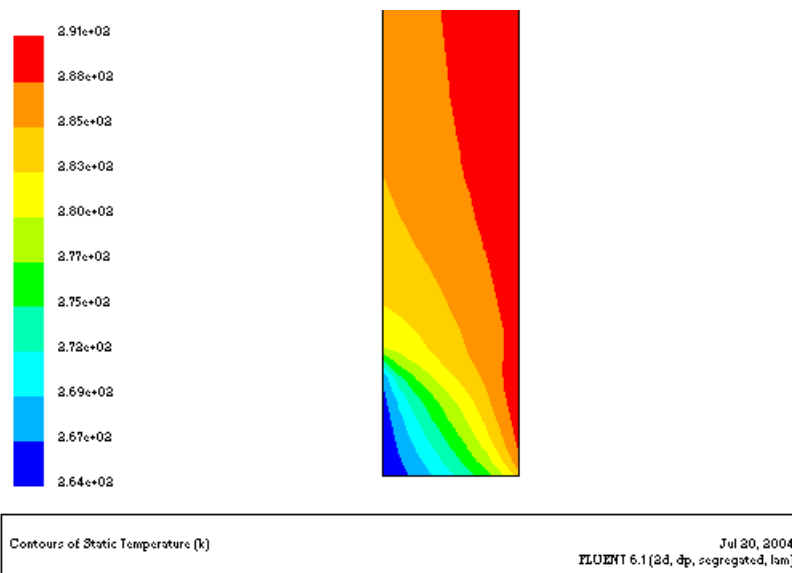


**Figura-10:** Efecto de añadir 1 hilada de Arlibloc sin aislamiento exterior. Detalle parte inferior del muro.

$$U = 0,5725 \text{ W/m}^2$$

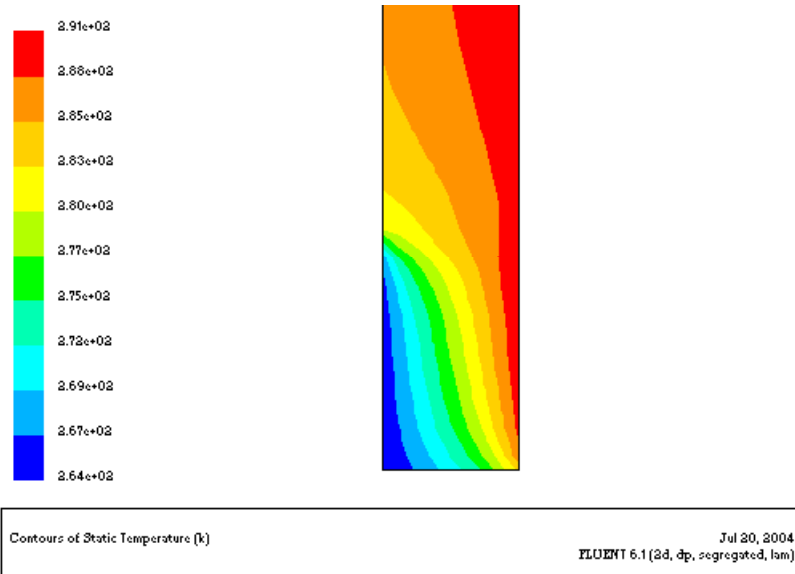


**Figura-11:** Efecto de añadir 2 hiladas de Arlibloc sin aislamiento exterior. Detalle parte inferior del muro.

$$U = 0,5780 \text{ W/m}^2$$

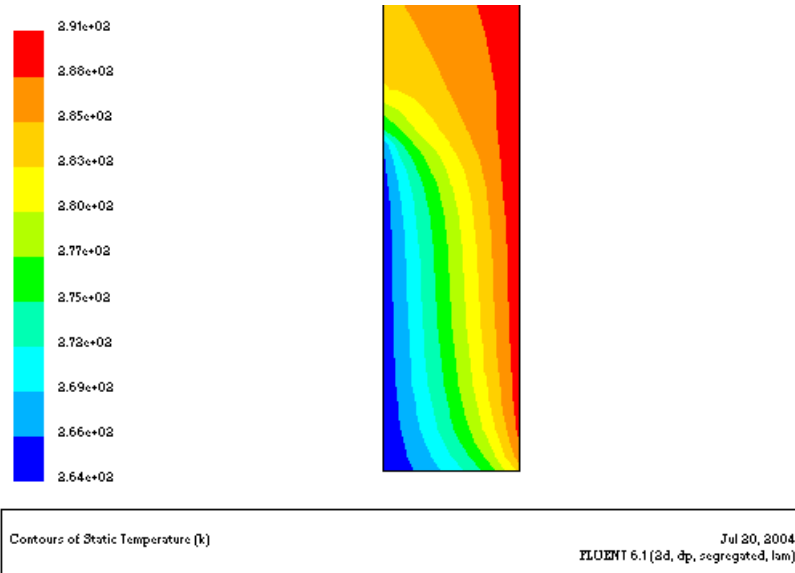


**Figura-12:** Efecto de añadir 3 hiladas de Arlibloc sin aislamiento exterior. Detalle parte inferior del muro.

Finalmente, en la siguiente figura mostramos las variaciones porcentuales del coeficiente global de transferencia respecto a la situación unidimensional del muro original. Hemos añadido los resultados correspondientes a añadir hiladas de Arlibloc manteniendo el aislamiento exterior del muro.

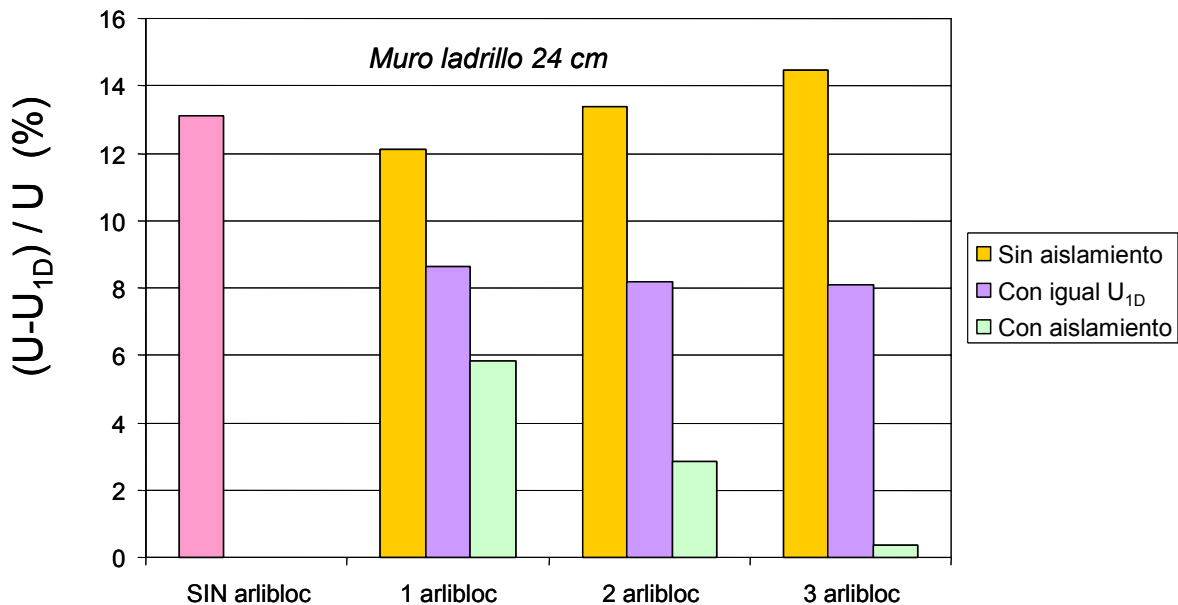


**Figura-13:** Variaciones porcentuales del coeficiente de transferencia al introducir hiladas de Arlibloc para rotura de puente térmico vertical ( $U_{1D} = 0,5050 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).

Como podemos observar, añadir hiladas de Arlibloc sin aislamiento exterior, si bien proporciona un cierto beneficio en la primera hilada por la rotura de puente térmico vertical, pero las siguientes hiladas resultan perjudiciales al estar formadas por un cerramiento de mayor coeficiente de transferencia unidimensional que el muro original, por lo que esta opción no es recomendable.

Al añadir hiladas de Arlibloc manteniendo el aislamiento exterior del muro original, además del beneficio asociado a la rotura del puente térmico y fundamentalmente asociado a la primera hilada de Arlibloc, al estar sustituyendo el muro original por otro de menor coeficiente de transferencia unidimensional, las hiladas sucesivas van reduciendo el coeficiente global de transferencia acercándose mucho al valor unidimensional con 3 hiladas.

En el caso de emplear hiladas de Arlibloc con el aislamiento exterior necesario para mantener el mismo coeficiente de transferencia unidimensional que el muro original, la primera hilada proporciona un beneficio significativo en la reducción del coeficiente de transferencia efectivo, pero las siguientes proporcionan un escaso beneficio, por lo que no está justificada su implementación.

Por último, en la siguiente figura mostramos el coeficiente lineal de puente térmico vertical. Este valor es importante por ser el que se debe emplear en

una simulación energética del edificio para complementar la transferencia de calor unidimensional a través del muro vertical. Además, el coeficiente  $U'$  es el que nos permite valorar la importancia relativa del puente térmico vertical. En concreto, el otro puente térmico asociado al perímetro del muro invertido, el puente térmico perimetral, como veremos en el siguiente punto presenta valores del coeficiente  $U'$  del orden de 3 a 4 veces superiores, por lo que podemos concluir que la importancia del puente térmico vertical del muro invertido en el balance energético del edificio es significativa.

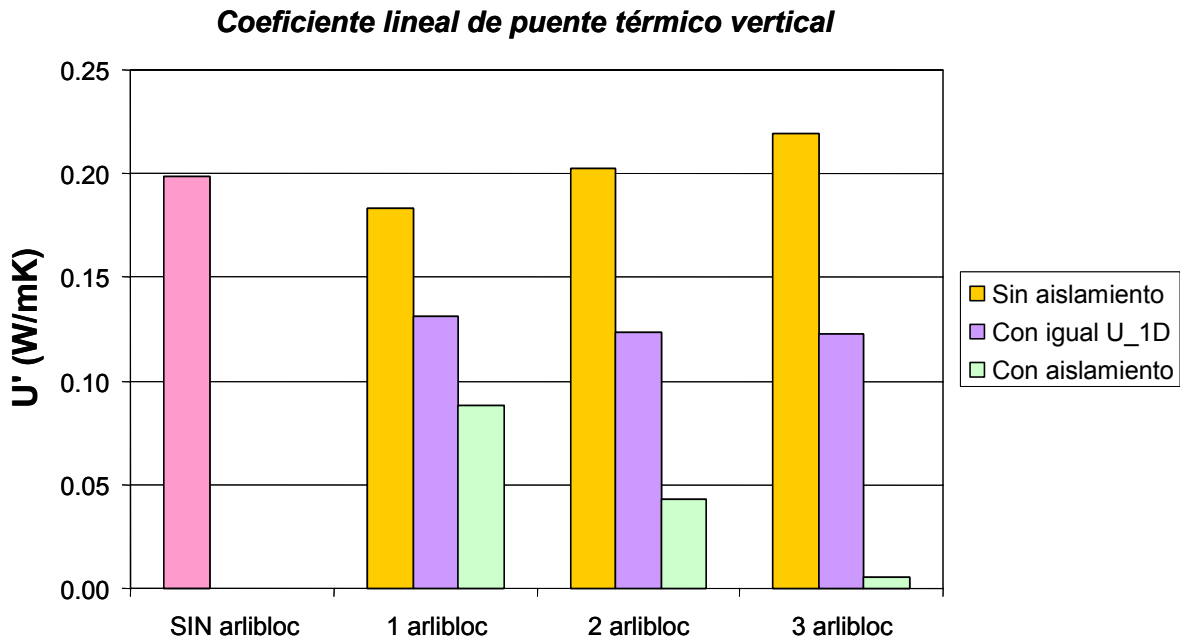


**Figura-14:** Coeficiente lineal de puente térmico vertical en el muro invertido.

#### **4. Requerimientos de rotura de puente térmico de forjado de planta baja**

Las viviendas consideradas en este proyecto, además de los muros invertidos, incorporan como un elemento bioclimático adicional con la misma función que el muro invertido, el contacto directo con el terreno con el fin de aprovechar para climatizar la vivienda la capacidad de almacenamiento inercial del terreno. Por tanto, no existe ni forjado sanitario ni capa aislante alguna para facilitar el contacto térmico con el terreno.

Al igual que en el caso del muro invertido, el contacto directo del forjado de planta baja con el terreno introduce un puente térmico perimetral que es preciso cuantificar y en su caso limitar. La solución convencional para la rotura de este puente térmico perimetral consiste en disponer perimetralmente (horizontal o verticalmente) una capa de un material aislante. En el caso de los proyectos considerados, el material aislante considerado era vidrio celular y su

disposición vertical para no afectar negativamente al contacto térmico del solado con el terreno.

Sin embargo, vista la necesidad de romper el puente térmico vertical del muro invertido, proponemos en este estudio una solución integrada que permita la rotura simultánea de ambos puentes térmicos (vertical y perimetral) simplificando el procedimiento constructivo y con un coste significativamente inferior, mediante el uso de un material monocapa (cerramiento de baja conductividad térmica) para el desarrollo de los muros de cimentación de la vivienda.

Debemos resaltar que la importancia relativa del puente térmico perimetral estará asociada al factor de forma (inverso de la compacidad) de la tipología de vivienda considerada. En este proyecto se consideran dos tipologías de vivienda extremas: Una vivienda octagonal con bajo factor de forma (elevada compacidad) para la cual el puente térmico perimetral será relativamente menos importante, y una vivienda con patio interior, con elevado factor de forma (baja compacidad) para la cual el puente térmico perimetral, y por tanto su rotura, será de mayor importancia relativa.

Pasamos a continuación a cuantificar la importancia de dicho puente térmico perimetral en la vivienda de tipología octagonal. Para ello emplearemos una aproximación analítica del proceso de conducción bidimensional, que es (en el mejor de los casos) el procedimiento empleado convencionalmente para evaluar dicho puente térmico. Los coeficientes de convección interior y exterior que hemos empleado son los considerados en el CTE (interior horizontal 5,9 W/m<sup>2</sup>K ; interior vertical 7,7 W/m<sup>2</sup>K; Exterior vertical y horizontal 25 W/m<sup>2</sup>K).

En las siguientes figuras mostramos el coeficiente de pérdidas del suelo ( $U_s$ ) y el coeficiente lineal de puente térmico perimetral ( $U'$ ) para distintas soluciones de rotura del puente térmico perimetral, en función de la conductividad térmica equivalente del forjado de planta baja. El forjado de planta baja está planteado en proyecto como un forjado de tierra, cal y arlita, todo él sobre un encachado de grava. Según el contenido de arlita la conductividad térmica del forjado será mayor o menor. Desde el punto de vista del aprovechamiento del contacto térmico con el terreno, la capa de arlita no resulta beneficiosa. Presentamos los resultados en función de la conductividad térmica equivalente de dicha capa, entre valores de 0,1 W/mK para el caso de un elevado contenido de arlita, hasta 1 W/mK sin arlita, pasando por 0,6 W/mK con un moderado contenido de arlita.

Para analizar con perspectiva estos resultados, conviene tener en cuenta el valor del coeficiente de pérdidas unidimensional por los muros invertidos propuestos a base de un pie de ladrillo tosco relleno de tierra con 6 cm de aislamiento exterior de Thermowall de Gutex, que resulta ser de  $U_L = 0,51$  W/m<sup>2</sup>K al emplear mortero de cal en el interior, algo más del doble de lo que obtenemos para el puente térmico perimetral incluso sin introducir aislamiento alguno para su rotura.

En cuanto a la cimentación, se considera en todos los casos un muro de 1,1 m de longitud apoyando sobre una zapata de hormigón de 50 cm de alto por 60 cm de ancho. Respecto al muro de cimentación, en este caso, en contra de lo que sucedía en el muro invertido, no resulta interesante emplear materiales de elevada conductividad térmica, puesto que en sí mismo ya funciona como rotura de puente térmico perimetral. Por tanto, en el caso de emplear ladrillo tosco, en el muro de cimentación no deberían rellenarse los huecos ni con tierra ni con mortero.

El peor caso de los analizados desde el punto de vista del puente térmico perimetral es el correspondiente a emplear un muro de cimentación de ladrillo cerámico macizo (o tosco relleno) con el forjado en contacto directo con el terreno. Incluso en este caso tenemos para la vivienda octagonal  $U_s = 0,31 \text{ W/m}^2\text{K}$ , inferior al del propio muro invertido. Esta es una clara indicación de las ventajas asociadas a un elevado factor de compacidad de esta tipología constructiva, ofreciendo muy poco perímetro respecto a la superficie útil.

Sin capa de arlita en el forjado ( $k = 1 \text{ W/mK}$ ), con ladrillo perforado y sin rotura de puente térmico, tenemos  $U_s = 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ , lo cual ya sería un valor suficientemente bajo como para no requerir la presencia de elementos auxiliares de rotura de puente térmico. Añadiendo una plancha de 80 cm de vidrio celular de 4 cm de espesor pasamos a  $U_s = 0,21 \text{ W/m}^2\text{K}$ , que es la cota superior de lo que conseguimos al desarrollar el muro de cimentación con materiales de baja conductividad térmica (bloques de Canabric, Arliblock u hormigón celular). Con un muro de cimentación de Arliblock de 25 cm de espesor ya tenemos  $U_s = 0,204 \text{ W/m}^2\text{K}$ , y al pasar a 30 cm conseguiríamos  $U_s = 0,199 \text{ W/m}^2\text{K}$ , mejora que no justifica el incremento de precio (además, el Arliblock de 25 cm se fabrica en la Comunidad de Madrid y el de 30 cm viene de Barcelona).

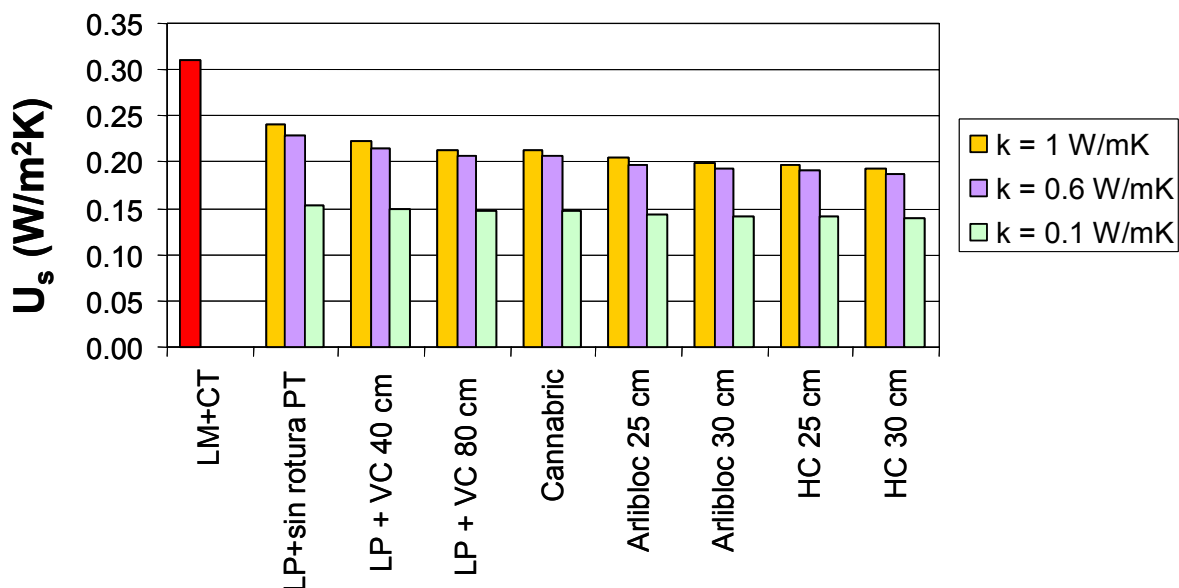


**Figura-15:** Coeficiente de pérdidas térmicas del suelo de la vivienda octagonal con distintas soluciones para rotura de puente térmico perimetral. (LM = Ladrillo macizo; CT = contacto directo con terreno ; LP = Ladrillo perforado sin rellenar huecos ; PT = Puente térmico ; VC = vidrio celular; HC = Hormigón celular).

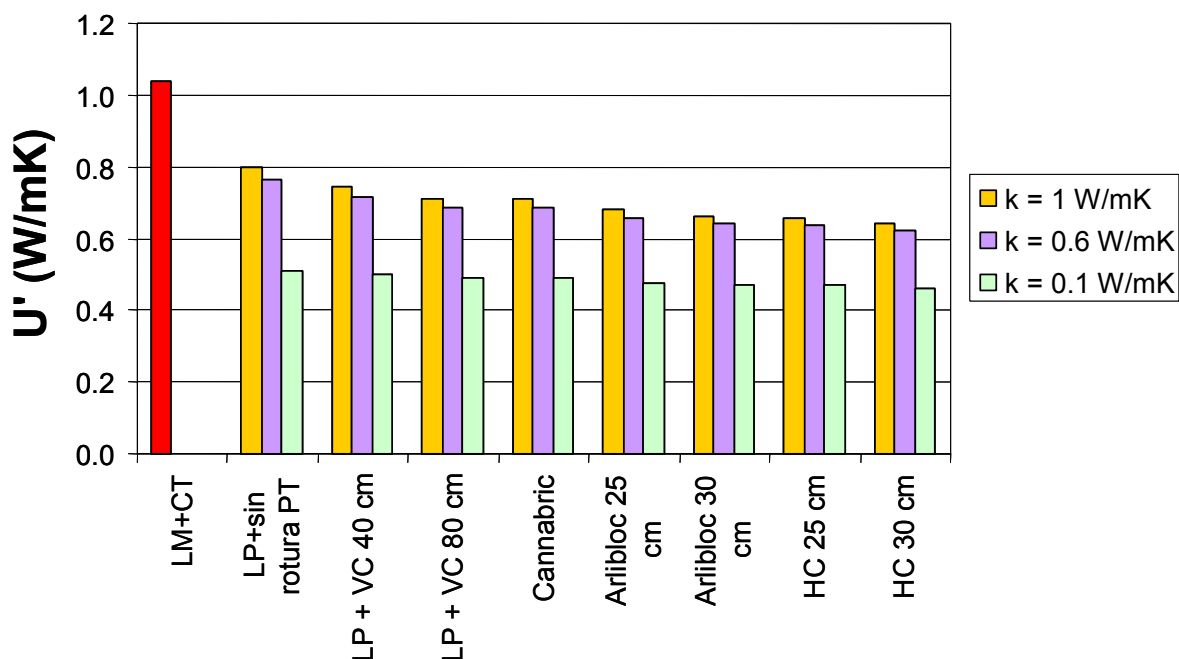


**Figura-16:** Coeficiente de pérdidas lineal por el puente térmico perimetral del suelo en la vivienda octagonal. (LM = Ladrillo macizo; CT = contacto directo con terreno ; LP = Ladrillo perforado sin rellenar huecos ; PT = Puente térmico ; VC = vidrio celular; HC = Hormigón celular).

El uso de bloques de baja conductividad térmica para el desarrollo del muro de cimentación proporciona una forma efectiva de rotura del puente térmico perimetral simplificando el procedimiento constructivo al obviar la necesidad de

capas aislantes específicas (vidrio celular). En el caso de la vivienda de tipología octagonal, la rotura de este puente térmico perimetral no es crítica, pero en la vivienda con patio es más importante (ver más abajo). Sin embargo, el uso de estos bloques de baja conductividad tiene ventajas adicionales que hace recomendable su uso para ambas viviendas: En efecto, el gran formato de estos bloques (Arlibloc: 50x20x6 cm ; Hormigón celular: 62,5x25x6 cm) permite reducir significativamente los requerimientos de mano de obra para su colocación, conduciendo a unos costes inferiores del  $m^2$  de pared terminada, que en el caso del muro de cimentación son especialmente beneficiosos al tener que desarrollarse bajo el terreno. Por otro lado, el uso de un muro de cimentación de baja conductividad proporciona simultáneamente solución a la rotura del puente térmico vertical del muro invertido, obviando por tanto en principio la necesidad de emplear una solución constructiva específica para este fin. Por tanto, vemos cómo con el uso de estos materiales en el muro de cimentación se puede conseguir el quíntuple objetivo de rotura de puente térmico perimetral, rotura de puente térmico vertical, simplificar el procedimiento constructivo, facilitar la construcción del muro de cimentación bajo el nivel del suelo y reducir costes.

El bloque de Canabric es otra opción posible, pero sus menores dimensiones (30x14,5x10,5 cm) y mayor coste no permiten alcanzar algunos de los anteriores objetivos.

Entre las opciones del bloque de hormigón celular y el Arliblock, recomendamos ésta última por la mayor garantía bioconstructiva de los materiales empleados (arrita y cemento).

En las siguientes figuras mostramos los costes del  $m^2$  de muro de cimentación elaborado con los distintos materiales. En la primera figura mostramos el coste de los materiales, mientras en la segunda mostramos el coste de la pared construida<sup>1</sup>. Los costes son según petición de ofertas a los suministradores de materiales, e incorporando el coste de la mano de obra con las mismas hipótesis de Ref.[10]. Sin embargo, los costes de la pared no incorporan el beneficio ni gastos generales del constructor, que en su conjunto pueden llegar a incrementar el coste de la pared en el orden de un 19 %. También debemos resaltar que algunas de las soluciones propuestas pueden requerir un enfoscado del muro, que vendría a suponer del orden de 10 €/m<sup>2</sup> por cara.

---

<sup>1</sup> Respecto al Biobloc se muestran dos opciones, una según el precio original del material, y una segunda según una oferta para intentar ajustar el coste de producción del Biobloc al de la Termoarcilla. Sin embargo, como el Biobloc viene de Barcelona, se han incluido además de los portes, el precio del palet que en este caso no sería devuelto.

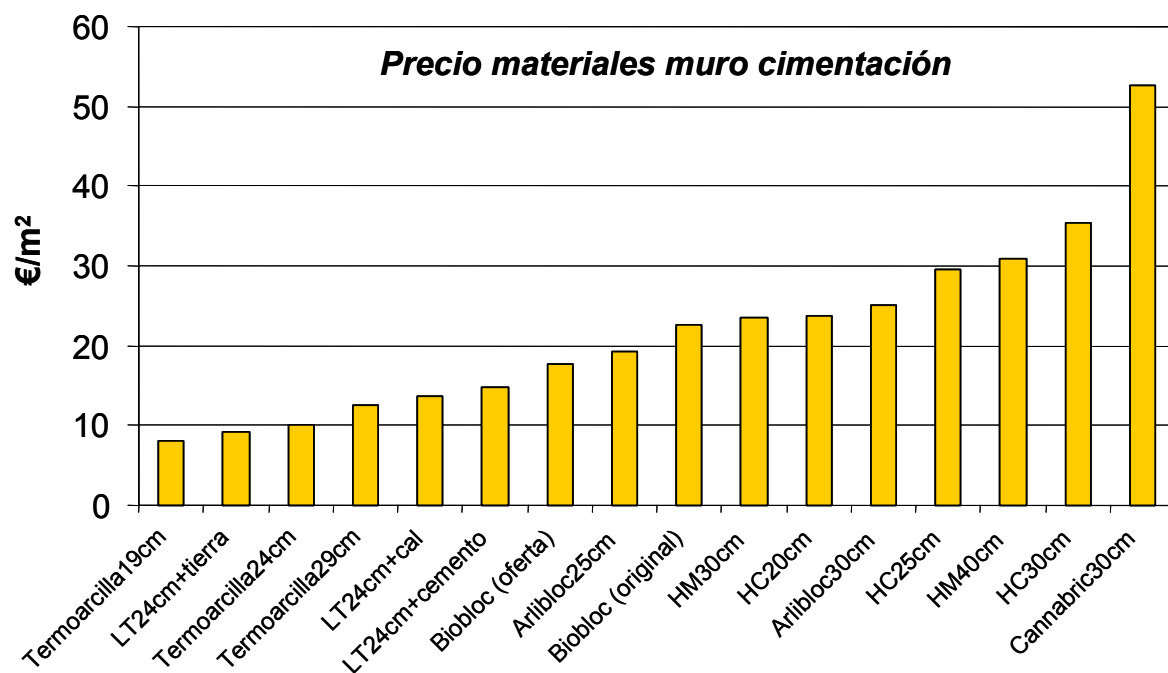


**Figura-17:** Precio de los materiales para muro de cimentación. (LT= Ladrillo tosco; HC = bloque de hormigón celular ; HM = hormigón en masa)

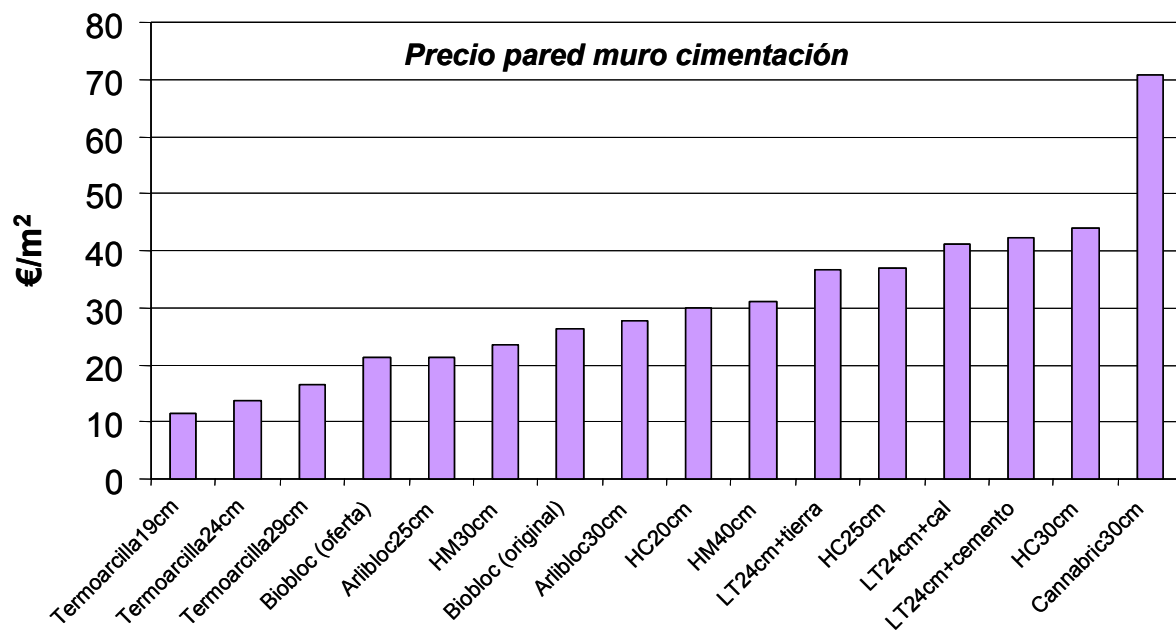


**Figura-18:** Precio del muro de cimentación, incluyendo mano de obra pero no beneficios y gastos generales del constructor. (LT= Ladrillo tosco; HC = bloque de hormigón celular ; HM = hormigón en masa)

En la vivienda con patio, el factor de forma es considerablemente superior (menor compacidad), así como el perímetro expuesto por unidad de superficie

útil. Todo ello conduce a unas pérdidas térmicas por puente térmico perimetral de mayor importancia. Sin embargo, en el caso de la vivienda con patio considerada, su tamaño relativamente pequeño (comparado con otras construcciones con la misma tipología habitualmente empleadas para edificios de mayor tamaño) hace que las esquinas de la vivienda (con una compacidad considerablemente superior) tengan un peso significativo (el 33 % de la superficie de la planta baja), lo cual reduce significativamente los efectos desfavorables de la tipología de vivienda frente al puente térmico perimetral. En las siguientes figuras mostramos el coeficiente de puente térmico perimetral referido a la superficie útil del suelo ( $U_s$ ) y el referido al perímetro de la vivienda ( $U'$ ). Para comparar con los valores anteriores debe emplearse el coeficiente  $U_s$ , que es el que relaciona las pérdidas con la superficie útil de vivienda. Como podemos ver, los valores de  $U_s$  son del orden de un 50 % superiores en la vivienda con patio que en la octagonal, pero a pesar de ello, excepto para el caso de un contacto directo del muro con el terreno (sin muro cimentación), el  $U_s$  asociado al puente térmico perimetral sigue siendo inferior al valor del propio muro invertido con sus 6 cm de aislamiento ( $U = 0,51 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).

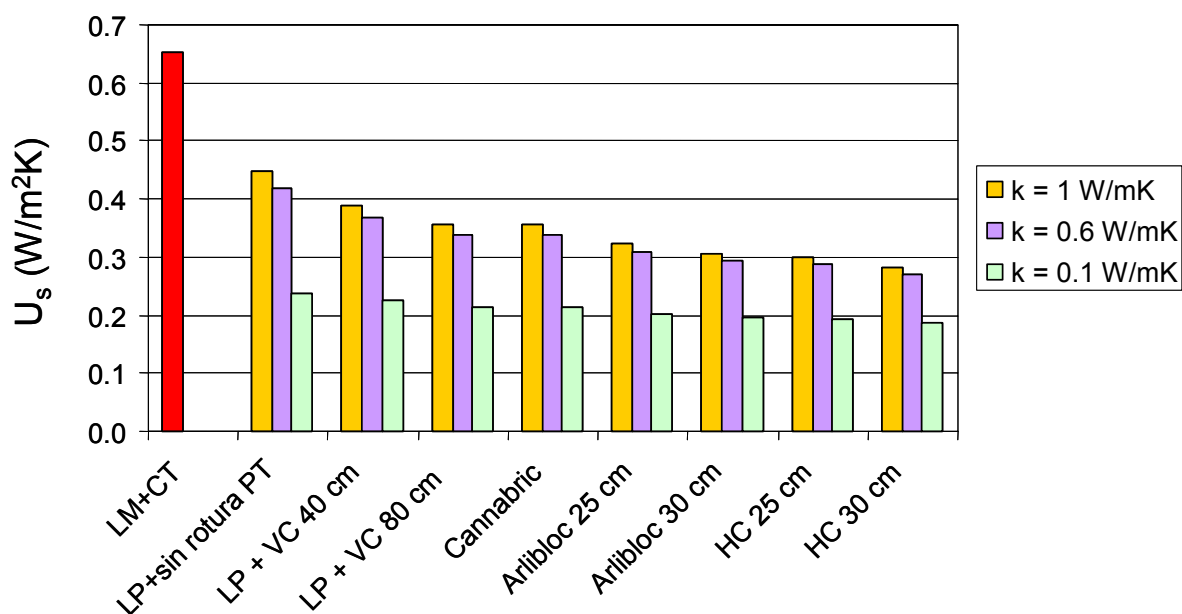


**Figura-19:** Coeficiente de pérdidas térmicas del suelo de la vivienda con patio con distintas soluciones para rotura de puente térmico perimetral, y en función de la conductividad de la solera de tierra y arlita empleada. (LM = Ladrillo macizo; CT = contacto directo con terreno ; LP = Ladrillo perforado sin rellenar huecos ; PT = Puente térmico ; VC = vidrio celular; HC = Hormigón celular).

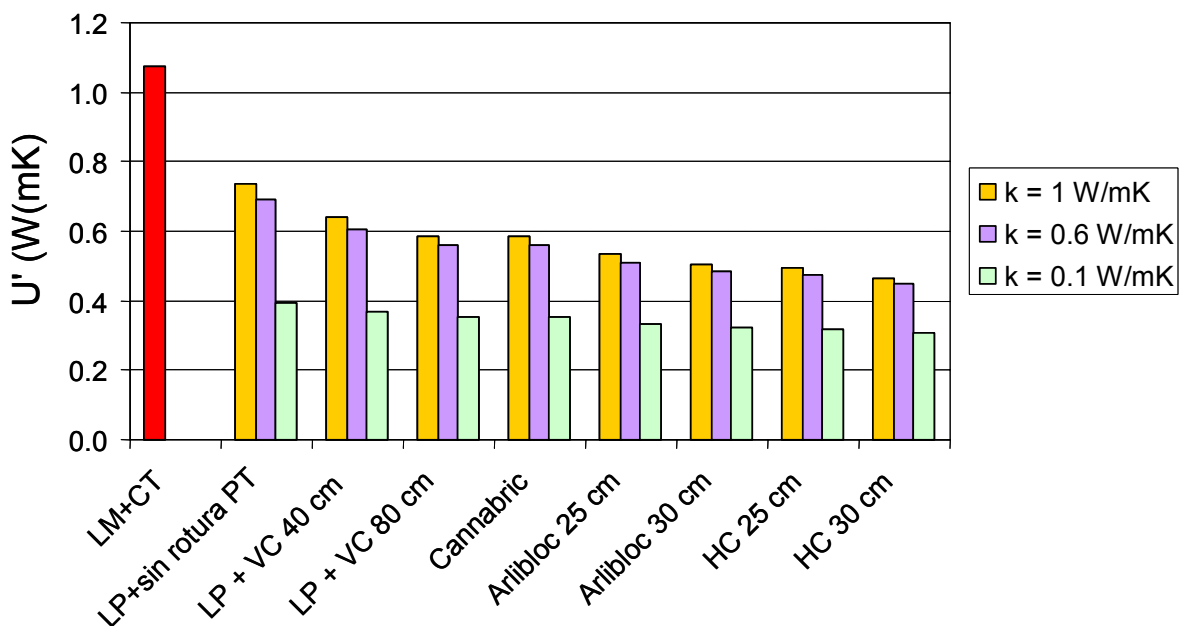


**Figura-20:** Coeficiente de pérdidas lineal por el puente térmico perimetral del suelo en la vivienda con patio, y en función de la solera de tierra y arlita empleada. (LM = Ladrillo macizo; CT = contacto directo con terreno ; LP = Ladrillo perforado sin rellenar huecos ; PT = Puente térmico ; VC = vidrio celular; HC = Hormigón celular).

A la vista de estos resultados, y teniendo en cuenta tanto los costes como los requerimientos de rotura de puente térmico, las recomendaciones para materiales de los muros de cimentación y enterrados serían las siguientes:

- Vivienda octagonal:
  - o Muro cimentación muro de carga interior: El bloque de Termoarcilla de 19 cm, el mismo que se usa para el desarrollo de este muro, con un coste de 11,58 €/m<sup>2</sup> sin enfoscados parece la solución más apropiada. En el caso de tener que enfoscar el muro por ambas caras, podría ponerse en 32 €/m<sup>2</sup>, en cuyo caso el Arliblock de 25 cm con un coste de 21,35 €/m<sup>2</sup> sería la mejor opción. Aunque este muro no requiera de rotura de puente térmico perimetral ni vertical, el uso del Arliblock podría resultar más adecuado que la Termoarcilla , especialmente si se opta por disponer algún panel de muro radiante sobre este muro.
  - o Muro de cimentación del muro de carga exterior: El Arlibloc de 25 cm con sus 21,35 €/m<sup>2</sup> sería la solución óptima. Pasar a el Arlibloc de 30 cm (27,60 €/m<sup>2</sup>) no reporta ventajas térmicas significativas, e incurre en un coste adicional significativo unido al hecho de que este bloque viene de Barcelona mientras que el de 25 cm se fabrica en Madrid. La única justificación que podría tener es el beneficio de disponer de una primera hilada de este bloque sobre el terreno para apoyar el aislamiento exterior

(Thermowall de Gutex). Pero parece más apropiado realizar esta función con una tira de vidrio celular.

- o Muros de sótanos: El Termoarcilla de 24 cm, con sus 13,73 €/m<sup>2</sup> sin revocos parece una buena opción. Sin embargo, con los revocos necesarios se pondría entorno a 34 €/m<sup>2</sup> que hacen que resulte menos favorable que el Arlibloc de 25 cm (21,35 €/m<sup>2</sup>), si este último no requiriera ser enfoscado.
- Vivienda con patio interior:
  - o Muros de cimentación de las paredes interior y exterior. En este caso, ambos muros de carga requieren rotura de puentes térmicos perimetral y vertical, por lo que la opción más adecuada es el Arlibloc de 25 cm.
  - o Muros de sótano: Al igual que en la vivienda octagonal, se pueden usar el Termoarcilla de 24 cm o el Arlibloc de 25 cm según requerimientos de enfoscados.

Por tanto, y con el fin de homogeneizar materiales puede resultar conveniente emplear el Arlibloc de 25 cm en todos los muros enterrados.

## **5. Solución integrada de rotura de puentes térmicos**

Pasamos a continuación a valorar numéricamente la solución integrada de rotura de puentes térmicos perimetral y vertical. Además, extenderemos la evaluación numérica para incorporar los efectos del terreno, evaluando con detalle el proceso de transferencia bidimensional desde el suelo al exterior.

La distribución de temperaturas en el terreno no perturbado por la presencia de la vivienda muestra una dependencia espacial y temporal asociada a los procesos transitorios de aporte y pérdida térmica del terreno. La conductividad térmica del suelo húmedo que hemos considerado es de  $k_s = 2,1 \text{ W/mK}$ , y el instante de cálculo considerado corresponde a la situación en que se alcanza la mínima temperatura superficial del suelo, que en el emplazamiento considerado es a finales de enero - principios de febrero. En la siguiente figura mostramos las distribuciones de temperatura en el terreno no perturbado por la presencia del edificio en función de la profundidad al final de los meses indicados. Como podemos ver en la condición de cálculo (finales de enero), a unos 9 m de profundidad encontramos una condición adiabática, y a unos 12 m estamos ya muy cerca de la región de temperatura constante a lo largo del año. Desde el punto de vista de cálculo extenderemos el dominio computacional hasta la región de suelo no perturbado a 16 m de profundidad donde impondremos una condición adiabática.

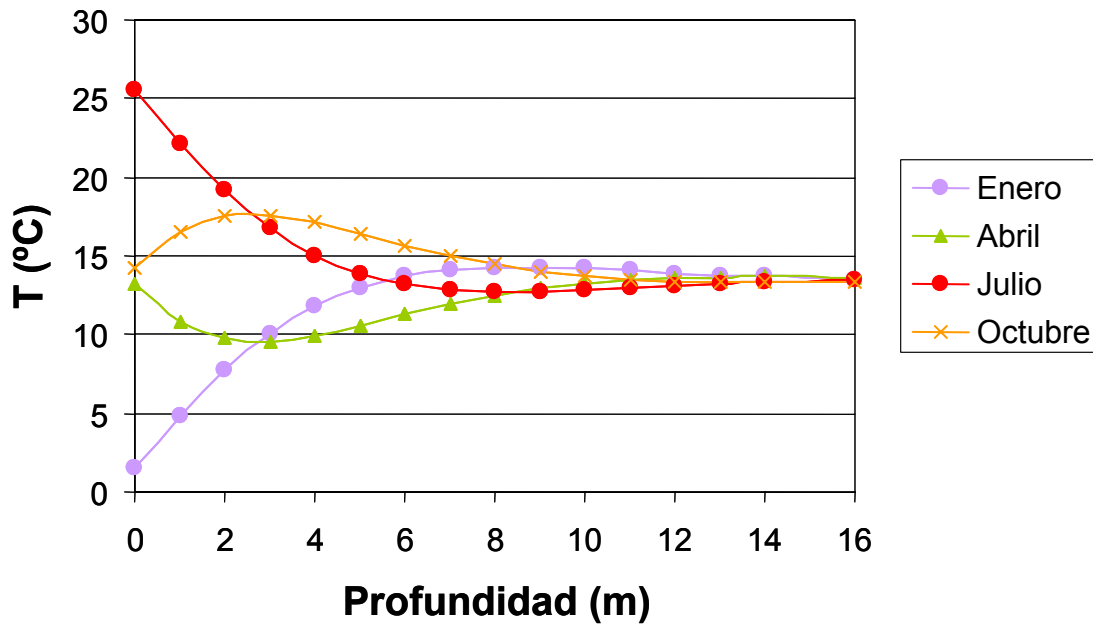


**Figura-21:** Distribuciones de temperatura en el terreno no perturbado por la presencia del edificio en función de la profundidad al final de los meses indicados. Propiedades terreno:  $k = 2,1 \text{ W/mK}$ ;  $c = 920 \text{ J/kgK}$ ;  $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$ .

Empezaremos por analizar el efecto del emplazamiento del vidrio celular en la rotura de los puentes térmicos perimetral y vertical. La solución actualmente planteada en proyecto incorpora una placa de vidrio celular dispuesta verticalmente bajo el nivel del suelo en el interior del muro. Esta capa de aislante, si bien es efectiva para la rotura del puente térmico perimetral, pero no realiza función alguna desde el punto de vista de la rotura del puente térmico vertical. Para una configuración de muro invertido sería más adecuado disponer esta capa en el exterior del muro, con lo cual mantiene su efecto en la rotura del puente térmico perimetral, pero además contribuye a la rotura del puente térmico vertical.

En primer lugar consideramos la situación de un muro de cimentación de ladrillo macizo (o tosco relleno de mortero) como continuación del desarrollo del muro invertido por debajo del terreno, sin zócalo de Arlibloc. Consideraremos que el forjado de planta baja no incorpora capa de arlita alguna para mejorar el contacto térmico con el terreno. Es decir, consideraremos que la capa de tierra situada encima del enchachado de grava tiene una conductividad de  $k = 1 \text{ W/mK}$ . Nos centraremos en analizar el efecto de la longitud de la plancha de vidrio celular empleada.

En la siguiente figura mostramos el campo de temperaturas resultante en el dominio simulado entorno al muro invertido, para el caso de no disponer de capa de vidrio celular. Se pueden observar las bajas temperaturas en la parte inferior del muro, indicativas de la presencia de los puentes térmicos vertical y perimetral.

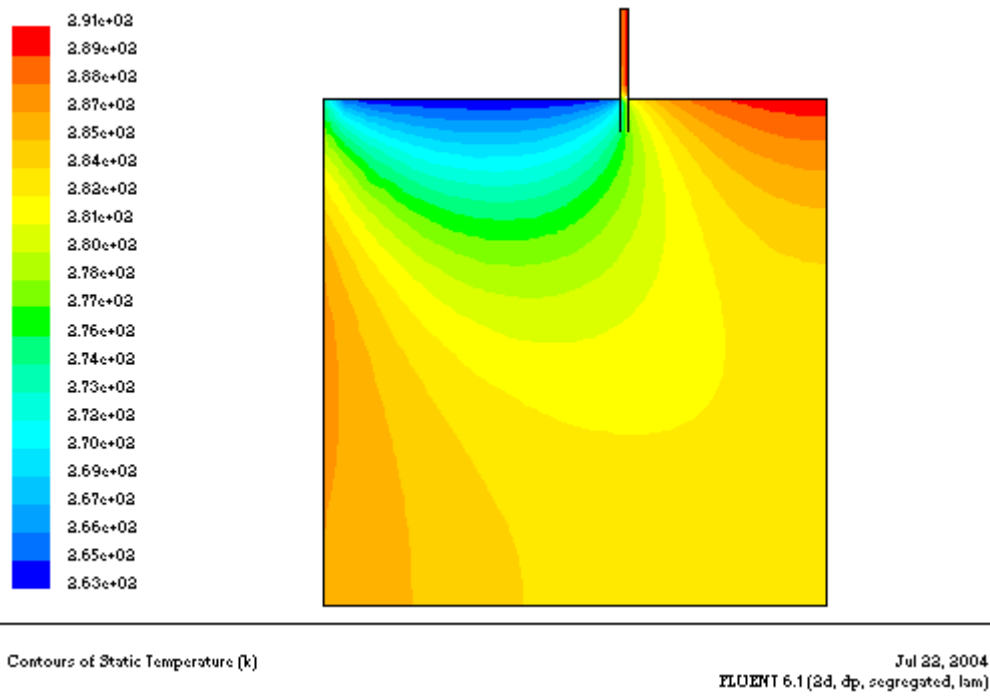


**Figura- 22 :** Campo de temperaturas para muro de cimentación de ladrillo macizo sin capa de vidrio celular en el dominio computacional simulado. Solera de forjado de planta baja con capa de tierra sin arlita ( $k = 1 \text{ W/mK}$ ). Vivienda octagonal.

En la siguiente figura mostramos un detalle con el campo de temperaturas dentro del muro invertido, muro de cimentación y zapata de hormigón para el mismo caso sin capa de vidrio celular.

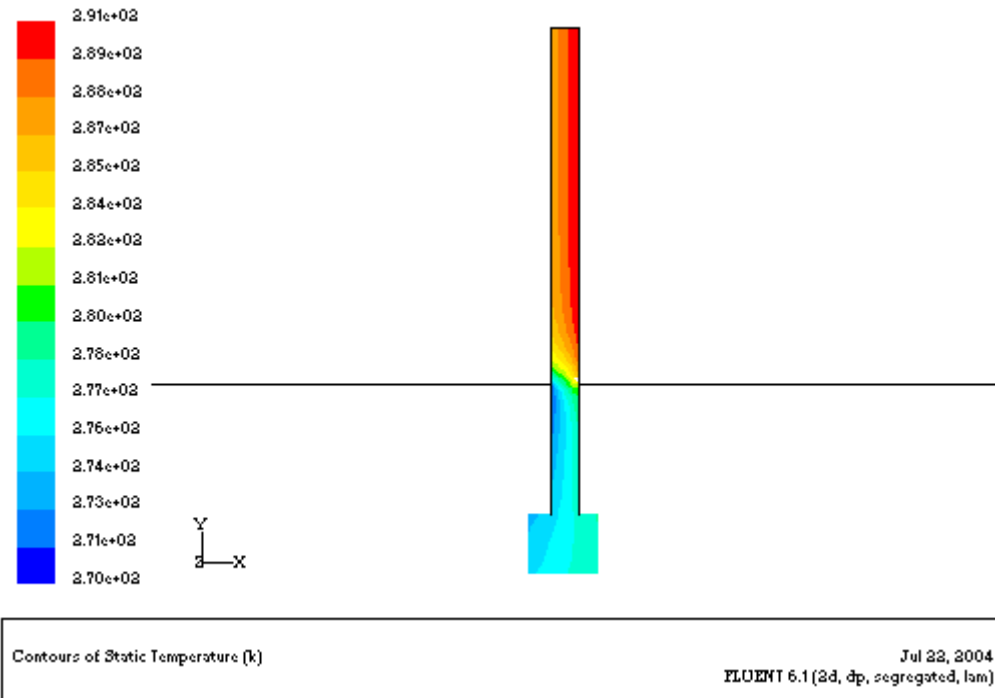


**Figura-23:** Campo de temperaturas para muro de cimentación de ladrillo macizo sin capa de vidrio celular. Detalle en muro invertido, muro de cimentación y zapata de hormigón. Solera de forjado de planta baja con capa de tierra sin arlita ( $k = 1 \text{ W/mK}$ ). Vivienda octagonal.

En la siguiente figura aparece el detalle del campo de temperaturas resultante en la parte inferior del muro invertido, el muro de cimentación y su zapata, y el terreno cercano. Las líneas de temperatura resultantes muestran claramente la fuga de energía térmica desde el interior de la vivienda hacia el exterior. Los puentes térmicos resultantes son de  $U'_{\text{suelo}} = 0,7255 \text{ W/mK}$  y  $U'_{\text{muro}} = 0,2900 \text{ W/mK}$ . También se puede observar la elevada eficacia del muro invertido para almacenar energía térmica, manteniendo gracias a la capa de 6 cm de Thermowall en su exterior un elevado incremento de temperatura en el conjunto de su masa respecto a la temperatura del entorno exterior.

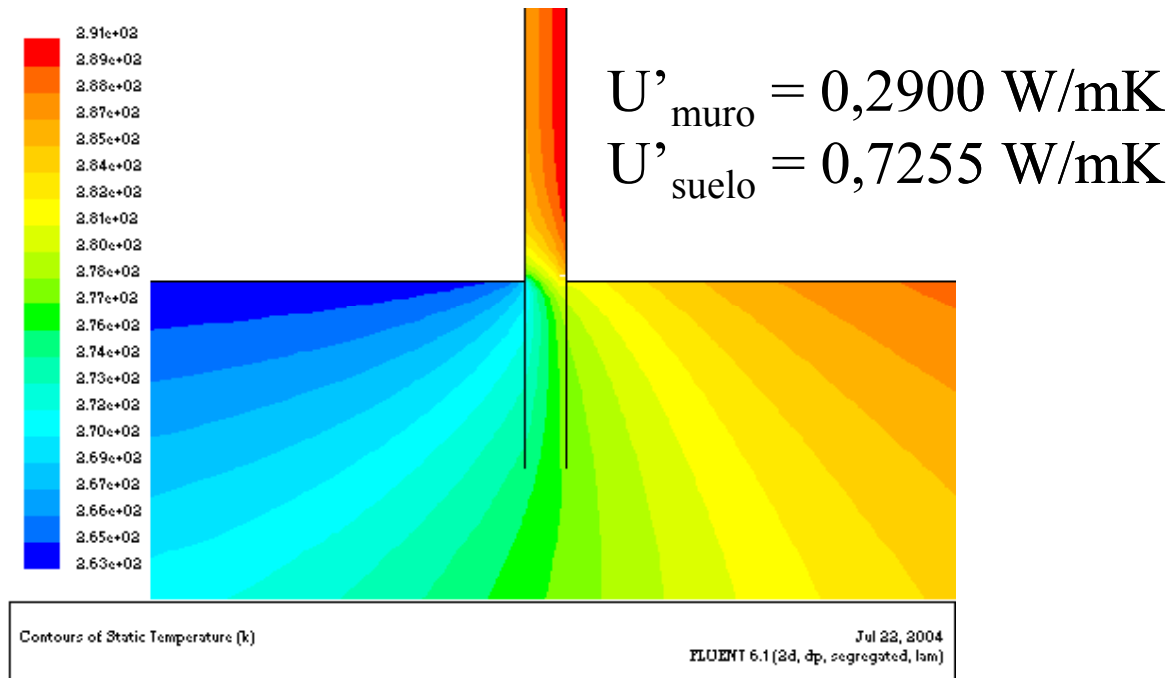


**Figura-24:** Campo de temperaturas para muro de cimentación de ladrillo macizo sin capa de vidrio celular. Detalle en muro invertido, muro de cimentación, zapata de hormigón y terreno cercano. Solera de forjado de planta baja con capa de tierra sin arlita ( $k = 1 \text{ W/mK}$ ). Vivienda octagonal.

En la siguiente figura mostramos los perfiles de temperatura verticales resultantes en el terreno lejano y en el eje de la vivienda, en los cuales puede observarse cómo la capa de terreno en los 4-5 m entorno a la vivienda se está usando de forma efectiva como un almacenamiento térmico inercial, que añadido al de los muros invertidos permitirá suavizar mucho los picos de potencia del sistema de climatización ante un uso continuo de la vivienda. La diferencia en los niveles de temperatura del suelo profundo son consecuencia de la condición de contorno adiabática impuesta en esa región.

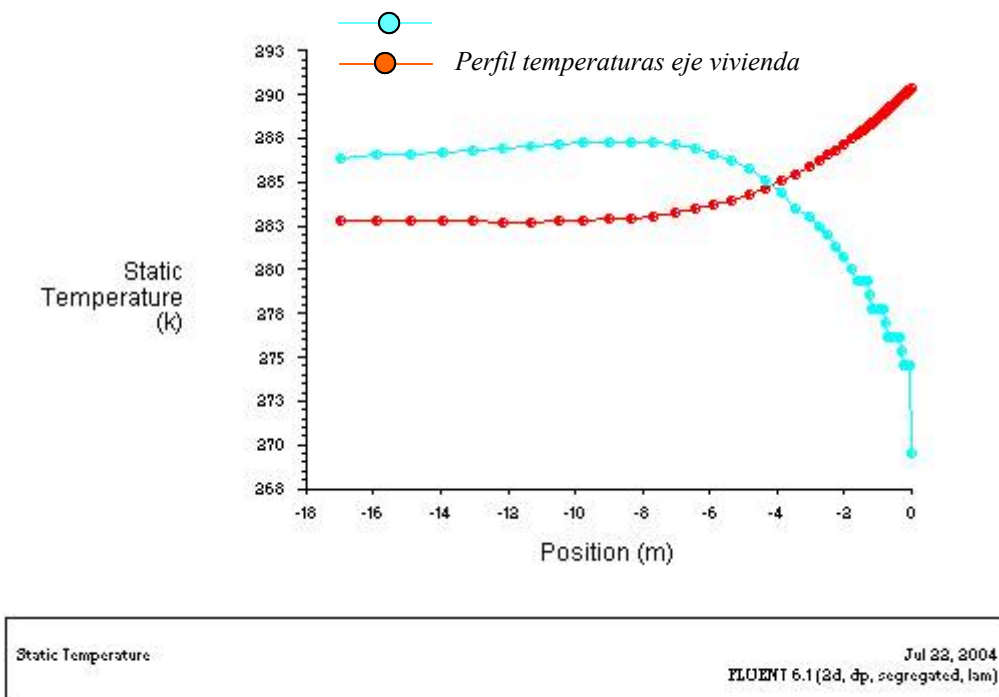


**Figura-25:** Distribuciones de temperatura verticales en eje de vivienda y terreno no perturbado. Solera de forjado de planta baja con capa de tierra sin arlita ( $k = 1 \text{ W/mK}$ ). Hipótesis de suelo profundo adiabático. Vivienda octagonal.

Con el fin de evitar la pérdida de energía asociada al puente térmico perimetral, la práctica habitual consiste en disponer una placa aislante bajo el terreno a lo largo del perímetro del muro, bien sea de forma horizontal o vertical. En este proyecto se había optado por una placa de vidrio celular dispuesta verticalmente para no afectar negativamente al contacto inercial con el terreno. En la siguiente figura mostramos en campo de temperaturas cercano al muro de cimentación resultante al emplear una placa de vidrio celular de 4 cm de espesor y una longitud de 110 cm (todo el muro de cimentación). Como puede verse, la capa de vidrio celular en esta posición es efectiva para limitar el puente térmico perimetral, reduciéndolo a  $U'_{\text{suelo}} = 0,6670 \text{ W/mK}$ , y conteniendo las mayores temperaturas en el suelo cercano al muro. Pero sin embargo, esta capa de vidrio celular trae como efecto secundario una reducción de temperaturas en el muro de cimentación, lo cual a su vez genera un incremento

de la pérdida térmica por el puente térmico vertical, ascendiendo éste hasta  $U'_{\text{muro}} = 0,3134 \text{ W/mK}$ .

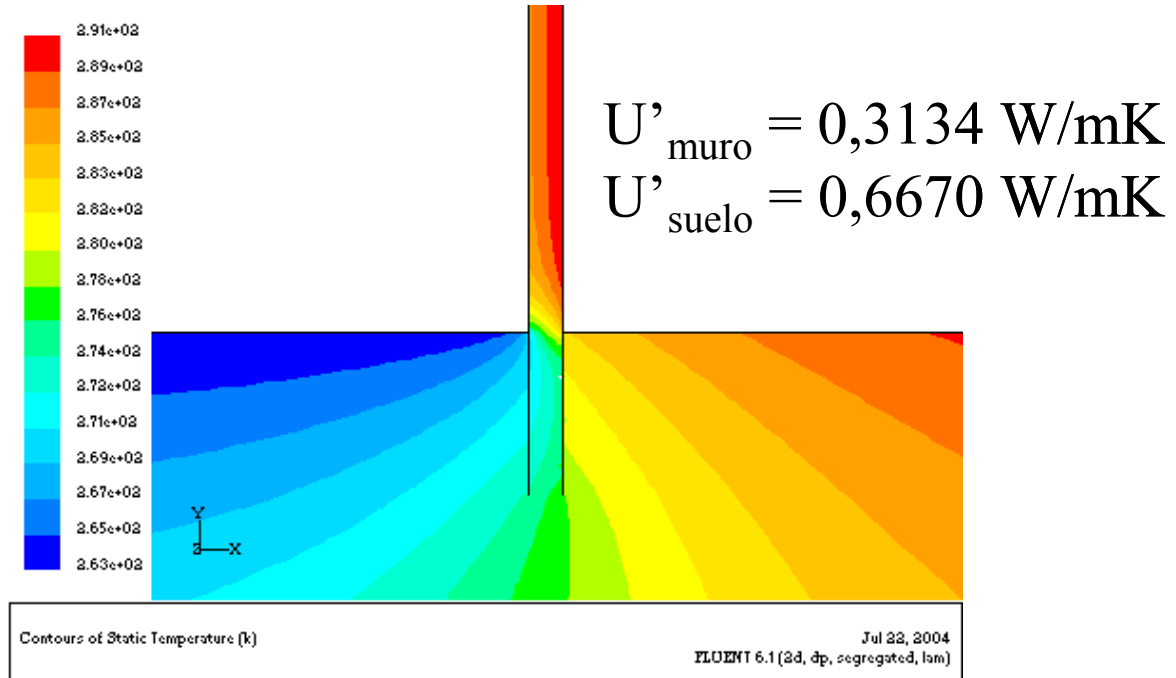


**Figura-26:** Campo de temperaturas para muro de cimentación de ladrillo macizo con capa de vidrio celular de 4 cm de espesor y 110 cm de longitud dispuesta en el interior del muro. Detalle en muro invertido, muro de cimentación, zapata de hormigón y terreno cercano. Solera de forjado de planta baja con capa de tierra sin arlita ( $k = 1 \text{ W/mK}$ ). Vivienda octagonal.

En la siguiente figura mostramos el efecto de colocar la capa de vidrio celular en el exterior del muro de cimentación. En estas condiciones, el nivel de temperaturas en todo el muro de cimentación se ve aumentado, por lo que se obtiene una gran reducción del puente térmico vertical que pasa a  $U'_{\text{muro}} = 0,1663 \text{ W/mK}$ , mientras que el puente térmico perimetral también se ve ligeramente reducido:  $U'_{\text{suelo}} = 0,6609 \text{ W/mK}$ .

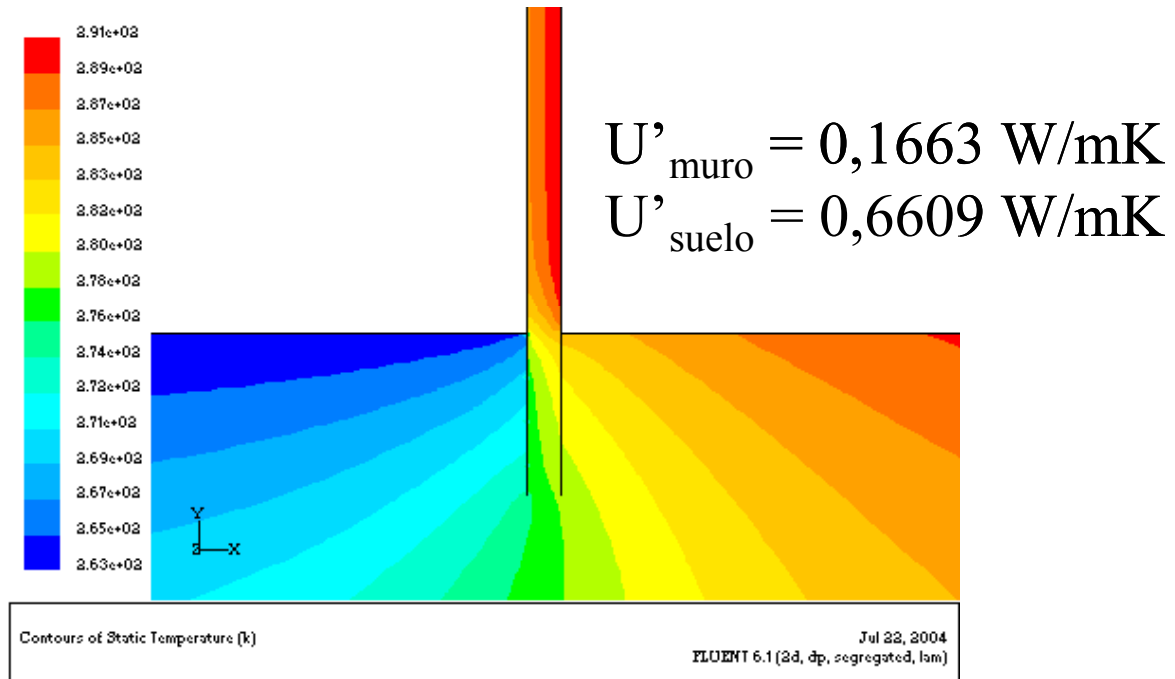


**Figura-27:** Campo de temperaturas para muro de cimentación de ladrillo macizo con capa de vidrio celular de 4 cm de espesor y 110 cm de longitud dispuesta en el exterior del muro. Detalle en muro invertido, muro de cimentación, zapata de hormigón y terreno cercano. Solera de forjado de planta baja con capa de tierra sin arlita ( $k = 1 \text{ W/mK}$ ). Vivienda octagonal.

En la siguiente figura mostramos los resultados de los puentes térmicos vertical (muro) y perimetral (suelo) para esta solución constructiva en función de la longitud de vidrio celular empleada, y de la disposición de la misma. Como podemos observar, la disposición de la capa de vidrio celular en el exterior es mucho más favorable que en el interior. El mayor efecto de la capa de vidrio celular es sobre la rotura del puente térmico vertical. Al disponer el vidrio celular en el interior, el puente térmico vertical aumenta con la longitud de vidrio celular empleada, mientras que al disponer la capa en el exterior, el puente térmico vertical se reduce rápidamente con la longitud empleada hasta valores del orden de 40 cm a partir de cuyo momento el beneficio es mucho más reducido. Desde el punto de vista de la rotura del puente térmico perimetral, la capa de vidrio celular es menos efectiva, pero mantiene la misma tasa de reducción<sup>2</sup> hasta longitudes del orden de 80 cm. Por tanto, en el caso de

<sup>2</sup> El efecto decreciente al aumentar la capa de vidrio celular es debido a afectar cada vez a capas más profundas de terreno con una creciente resistencia conductiva.

emplear esta solución constructiva, la recomendación sería disponer una capa de vidrio celular de 60 cm de espesor en el exterior del muro de cimentación.

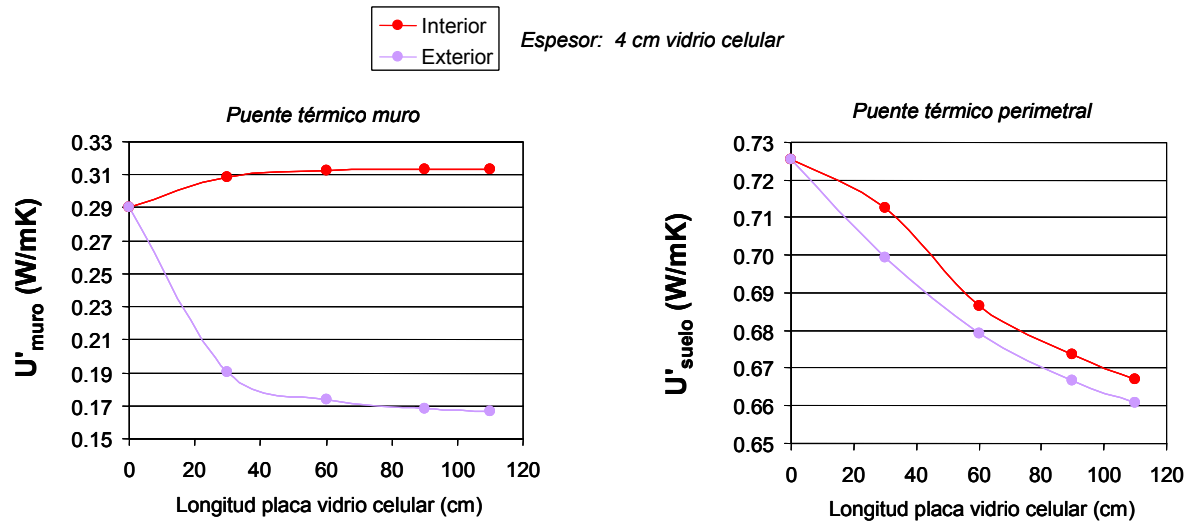


**Figura-28:** Puentes térmicos vertical y perimetral en función de la longitud de la capa de vidrio celular empelada y de su disposición. Espesor del vidrio celular = 4 cm. Solera de forjado de planta baja con capa de tierra sin arlita ( $k = 1 \text{ W/mK}$ ). Vivienda octagonal.

En la figura anterior, en términos de coeficientes lineales de puente térmico, podíamos observar la importancia relativa del puente térmico vertical respecto al perimetral. Sin embargo, para comparar la importancia de estas pérdidas térmicas con otras existentes en la vivienda, conviene expresar el puente térmico perimetral en forma de coeficiente de transferencia referido al área del suelo de la vivienda, tal y como mostramos en la siguiente figura. Como vemos, este coeficiente es considerablemente inferior al del muro invertido ( $U = 0,51 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).

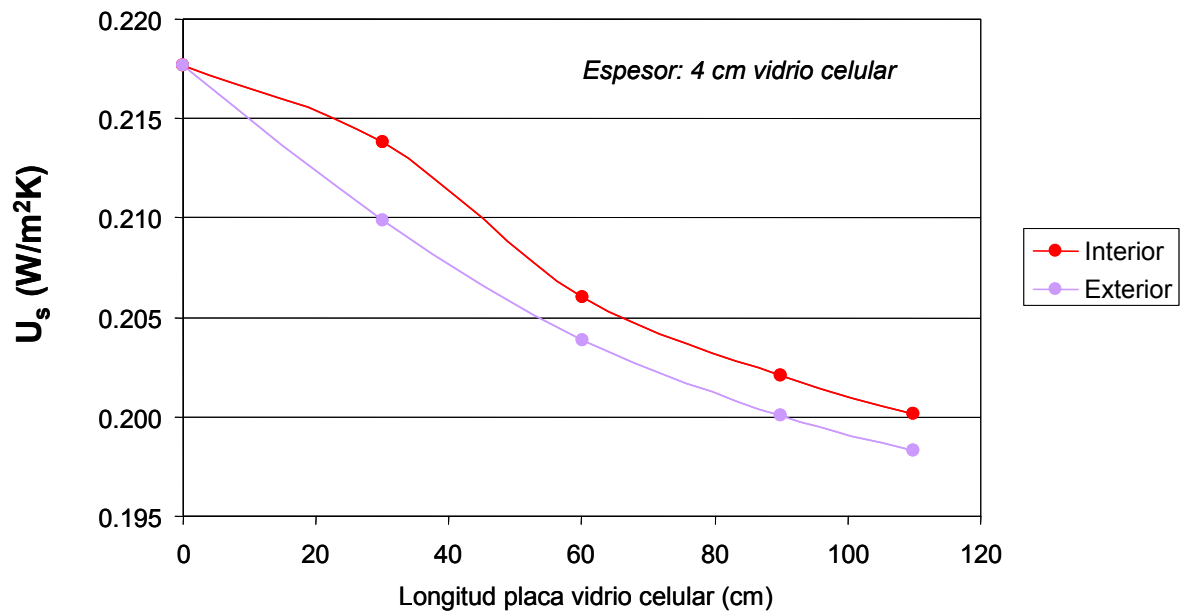


**Figura-29:** Coeficiente de pérdidas del suelo en función de la longitud de la capa de vidrio celular empelada y de su disposición. Espesor del vidrio celular = 4 cm. Solera de forjado de planta baja con capa de tierra sin arlita ( $k = 1 \text{ W/mK}$ ). Vivienda octagonal.

Resulta interesante comparar la evaluación numérica detallada del coeficiente de pérdidas del suelo con la formulación bidimensional simplificada habitualmente empleada. Las hipótesis fundamentales de esta aproximación bidimensional analítica son la no interferencia del puente térmico vertical con el perimetral, y la forma circular de las líneas de flujo resultantes. En la siguiente figura mostramos las líneas de temperatura constante (las de flujo son perpendiculares) para el caso de disponer 110 cm de vidrio celular en el interior. Como podemos ver, las líneas de flujo se apartan de la forma circular especialmente en el interior del muro, conduciendo a trayectorias térmicas de mayor longitud que a su vez ocasionan coeficientes de pérdidas inferiores.

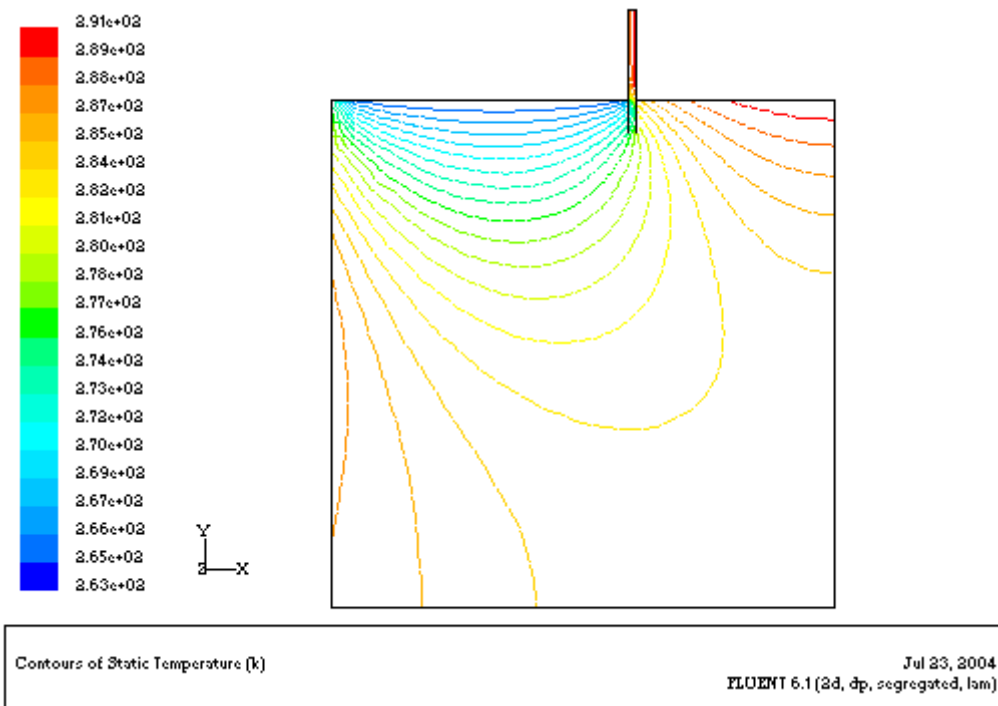


**Figura-30:** Líneas isotermas para el caso de emplear 110 cm de vidrio celular dispuesto en el interior del muro de cimentación. Espesor del vidrio celular = 4 cm. Solera de forjado de planta baja con capa de tierra sin arlita ( $k = 1 \text{ W/mK}$ ). Vivienda octagonal.

En la siguiente figura mostramos la variación relativa del coeficiente de pérdidas del suelo evaluado numéricamente respecto a la solución analítica bidimensional. Como podemos ver, efectivamente obtenemos coeficientes inferiores mediante la evaluación numérica, con errores mayores al disponer el vidrio celular en el exterior del muro, y decrecientes al aumentar la longitud de la capa de vidrio celular, pero en cualquier caso comprendidos entre un 6 % y 10 %, por lo que podemos concluir que la solución analítica bidimensional constituye una aproximación adecuada.

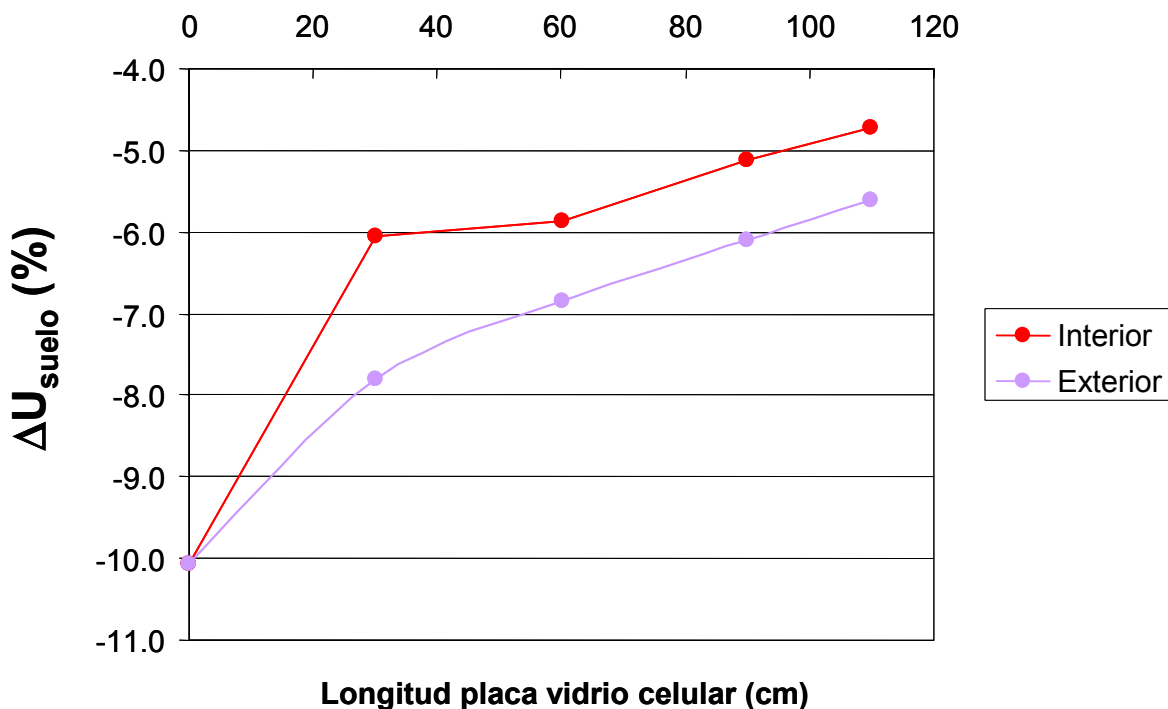


**Figura-31:** Comparación del coeficiente de pérdidas de suelo evaluado numéricamente con la solución analítica bidimensional. 110 cm de vidrio celular dispuesto en el interior / exterior del muro de cimentación. Espesor del vidrio celular = 4 cm. Solera de forjado de planta baja con capa de tierra sin arlita ( $k = 1 \text{ W/mK}$ ). Vivienda octagonal.

En los resultados anteriores hemos asumido una condición de contorno adiabática en el suelo profundo (17 m). Realmente, si a esa profundidad el suelo no está perturbado térmicamente por la presencia del edificio, su temperatura será la correspondiente al suelo profundo, que en este caso la hemos asumido de  $13,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . En la siguiente figura mostramos el campo de temperaturas resultante con la condición de contorno isoterma en el suelo profundo al emplear un muro de cimentación de ladrillo perforado sin capa aislante de vidrio celular.

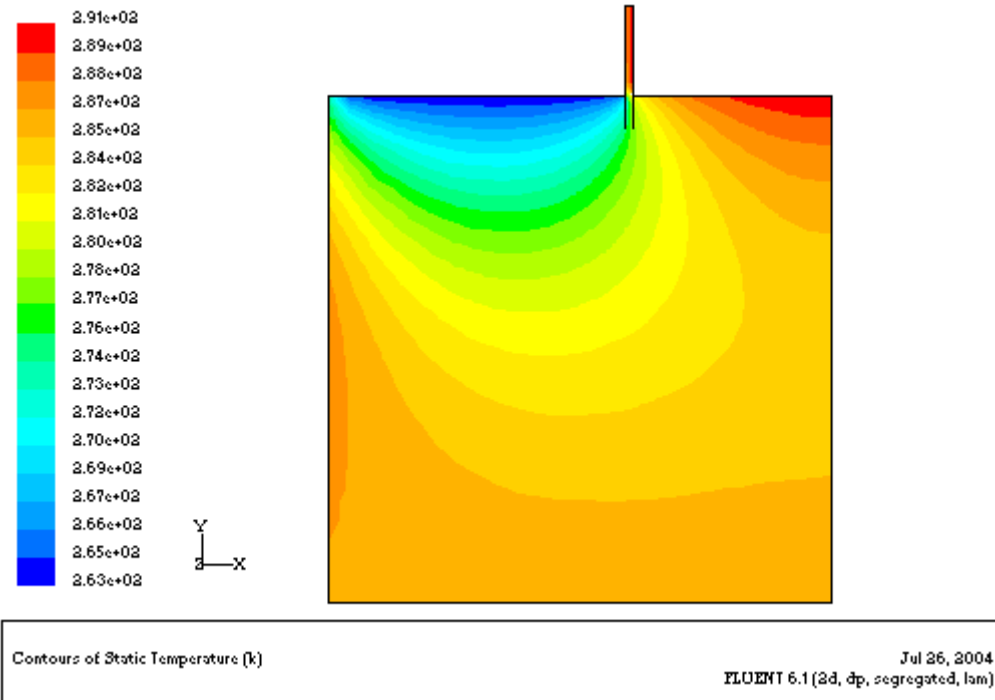


**Figura-32:** Distribución de temperaturas en dominio computacional con condición de contorno isoterma para el suelo profundo. Muro de cimentación de ladrillo perforado con enfoscado de mortero de cemento de 1 cm en el interior y sin vidrio celular. Solera de forjado de planta baja con capa de tierra sin arlita ( $k = 1 \text{ W/mK}$ ). Vivienda octagonal.

Los perfiles de temperatura verticales en el eje de la vivienda y el suelo no perturbado, en el caso de la condición de contorno isoterma en suelo profundo resultan como los indicados en la siguiente figura.

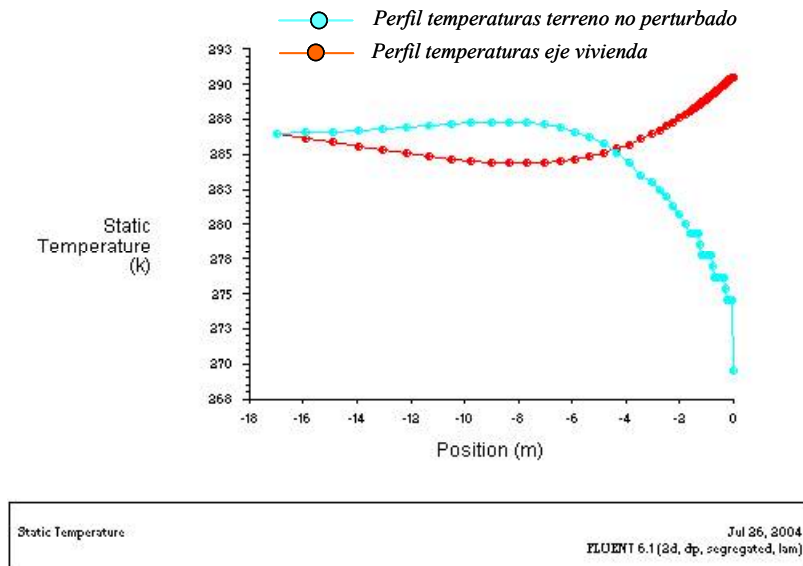


**Figura-33:** Perfiles de temperatura vertical en eje vivienda y suelo no perturbado con condición de contorno isoterma para el suelo profundo. Muro de cimentación de ladrillo perforado con enfoscado de mortero de cemento de 1 cm en el interior y sin vidrio celular. Solera de forjado de planta baja con capa de tierra sin arlita ( $k = 1 \text{ W/mK}$ ). Vivienda octagonal.

En la siguiente figura mostramos la comparación de los puentes térmicos perimetral y vertical evaluados con condición de contorno de suelo profundo adiabática o isotérmica. Como vemos la diferencia entre ambos es pequeña. Por la mayor coherencia de eliminar los flujos de calor horizontales en el suelo profundo, a partir de ahora asumiremos condición de contorno adiabática en el suelo profundo.

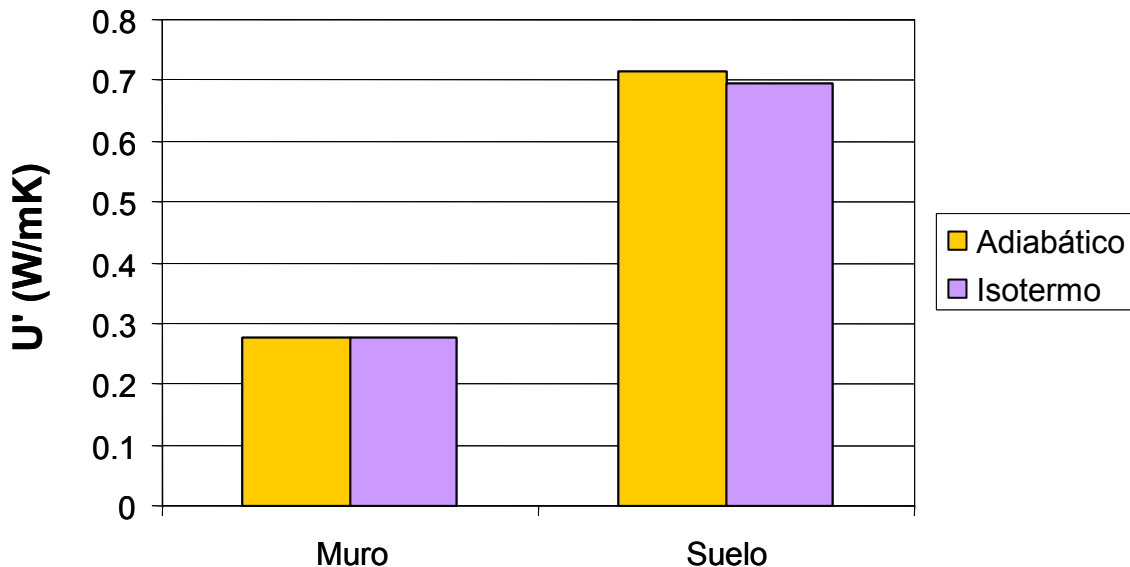


**Figura-34:** Puentes térmicos con condición de contorno adiabática e isoterma en suelo profundo. Muro de cimentación de ladrillo perforado con enfoscado de mortero de cemento de 1 cm en el interior y sin vidrio celular. Solera de forjado de planta baja con capa de tierra sin arlita ( $k = 1$  W/mK). Vivienda octagonal.

Veamos a continuación el efecto del espesor de la capa de vidrio celular. Para ello asumiremos un muro de cimentación de ladrillo perforado con un enfoscado interior de mortero de cemento de 1 cm de espesor. La capa de vidrio celular la disponemos en el exterior del muro de cimentación con una longitud de 60 cm. En las tres figuras siguientes, vemos las distribuciones de temperatura sin capa de vidrio celular, con capa de vidrio celular de 6 cm de espesor, y los valores de los coeficientes de puente térmico en función del espesor de la capa de vidrio celular. Una vez más podemos observar cómo la capa de vidrio celular es más efectiva para la rotura del puente térmico vertical que para la del perimetral. Desde el punto de vista del puente térmico vertical podría justificarse un espesor de 6 cm en la capa de vidrio celular, sin embargo, la menor importancia relativa del puente térmico vertical frente al perimetral permitiría limitar el espesor de vidrio celular a 4 cm desde el punto de vista de las pérdidas térmicas.

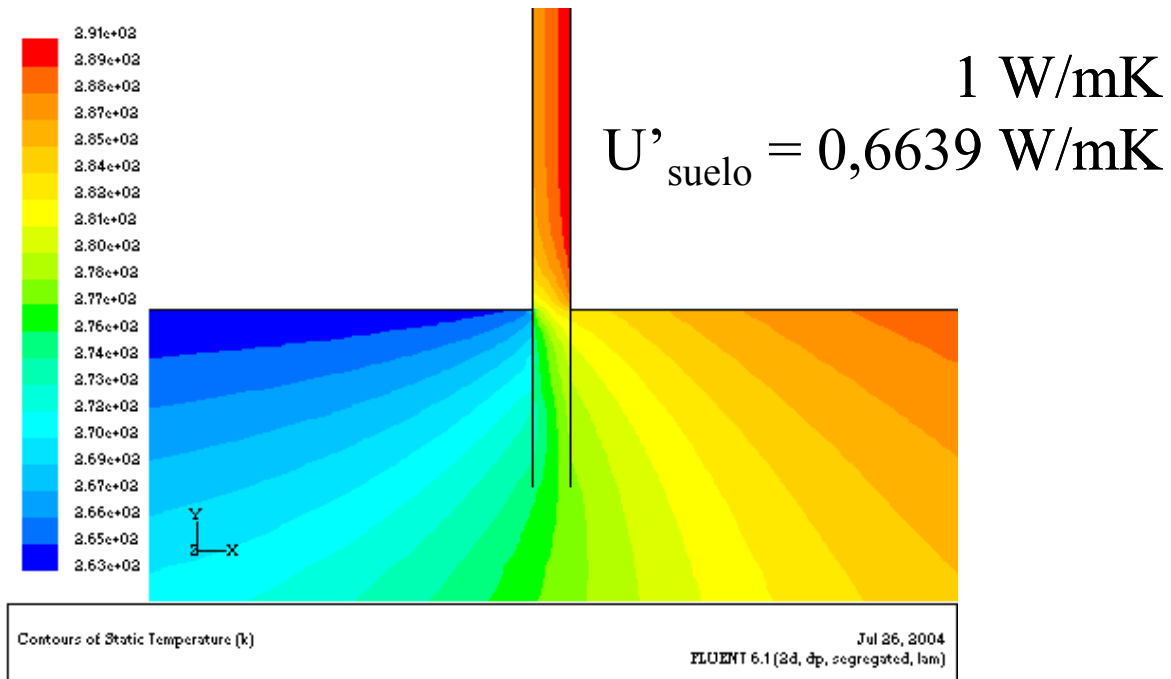


**Figura-35:** Distribución de temperaturas. Muro de cimentación de ladrillo perforado con enfoscado de mortero de cemento de 1 cm en el interior y sin vidrio celular. Solera de forjado de planta baja con capa de tierra sin arlita ( $k = 1 \text{ W/mK}$ ). Vivienda octagonal.

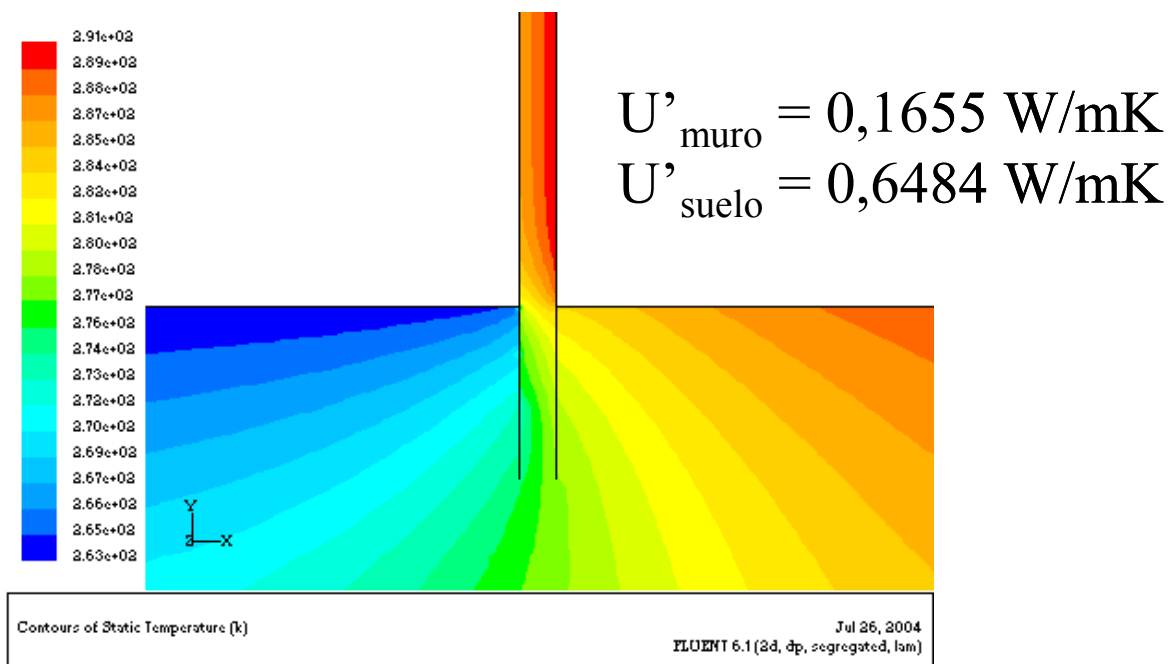


**Figura-36:** Distribución de temperaturas. Muro de cimentación de ladrillo perforado con enfoscado de mortero de cemento de 1 cm en el interior y con 4 cm de vidrio celular. Solera de forjado de planta baja con capa de tierra sin arlita ( $k = 1 \text{ W/mK}$ ). Vivienda octagonal.

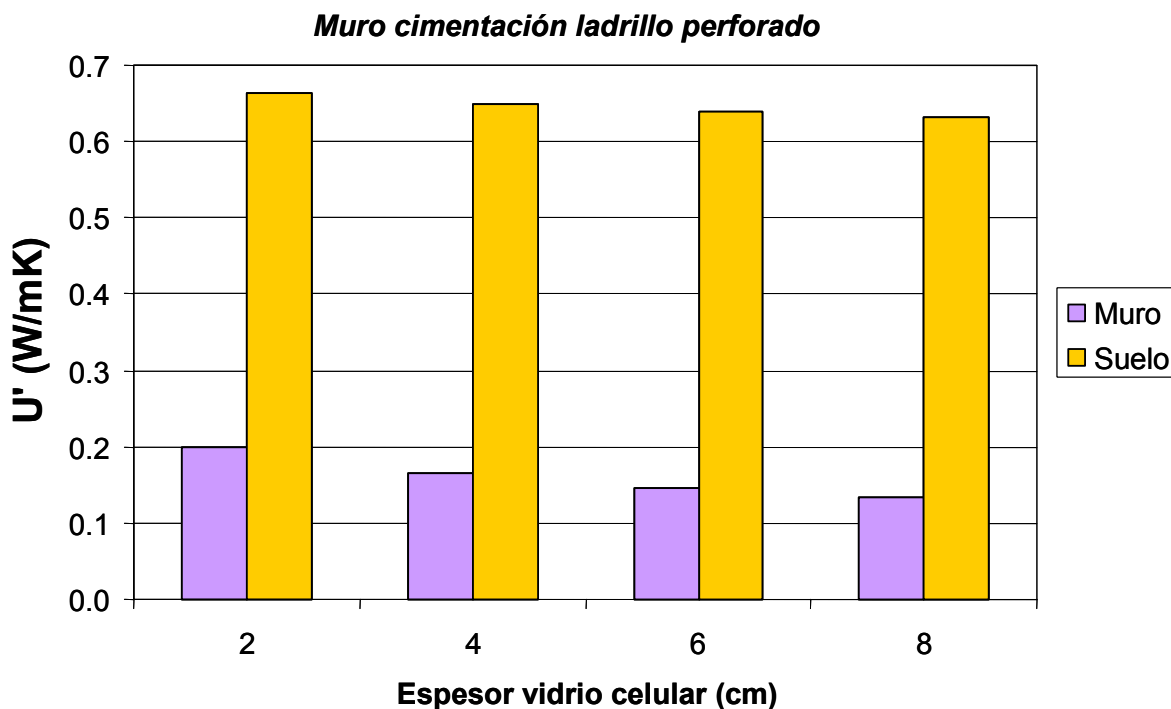


**Figura-37:** Efecto del espesor de vidrio celular en el exterior del muro de cimentación sobre los puentes térmico vertical y perimetral. Solera de forjado de planta baja con capa de tierra sin arlita ( $k = 1 \text{ W/mK}$ ). Vivienda octagonal.

Desde el punto de vista constructivo de muro invertido, es conveniente que la capa de Thermowall en su exterior no apoye directamente en el terreno para no degradarse por humedad. En estas condiciones convendría arrancar el muro con una capa de vidrio celular del mismo espesor del Thermowall. Sin embargo, por la mayor conductividad del vidrio celular, esto conducirá a un incremento de las pérdidas térmicas por el muro, que con fines comparativos podemos seguir asociando al puente térmico vertical. En la siguiente figura mostramos los puentes térmicos y distribución de temperaturas resultantes al emplear 20 cm de vidrio celular en la base del muro invertido. Como vemos, el efecto de sustituir el Thermowall por vidrio celular en el zócalo es de incrementar en un 3,8 % el puente térmico vertical (incrementar en un 0,38 % el coeficiente de transferencia del muro). Este incremento es asumible dada la importancia relativamente pequeña del puente térmico vertical frente a los otros mecanismos de pérdida, y podría recuperarse incrementando a 6 cm el espesor del vidrio celular en el muro de cimentación, tal y como se muestra en la segunda figura..

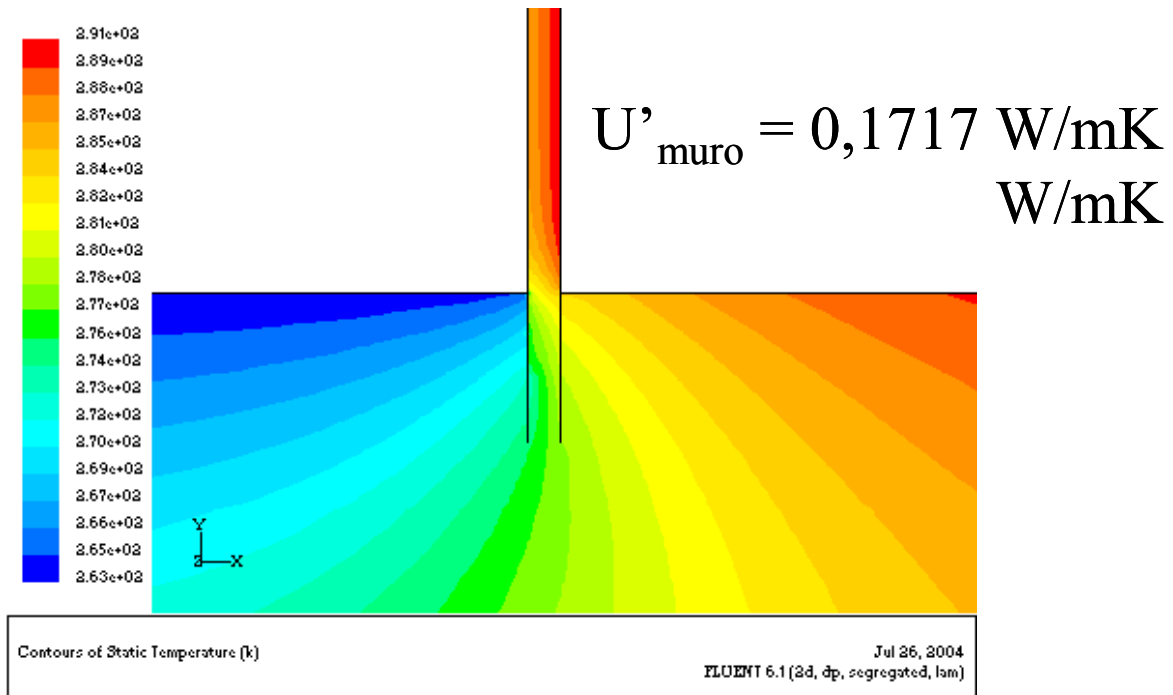


**Figura-38:** Zócalo de 20 cm en el que se ha sustituido el Thermowall de 6 cm por vidrio celular del mismo espesor. Distribución de temperaturas y coeficientes de puente térmico. Muro de cimentación de ladrillo perforado con enfoscado de mortero de cemento de 1 cm en el interior y con 60 cm de vidrio celular de 4 cm de espesor en el exterior. Solera de forjado de planta baja con capa de tierra sin arlita ( $k = 1 \text{ W/mK}$ ). Vivienda octagonal.

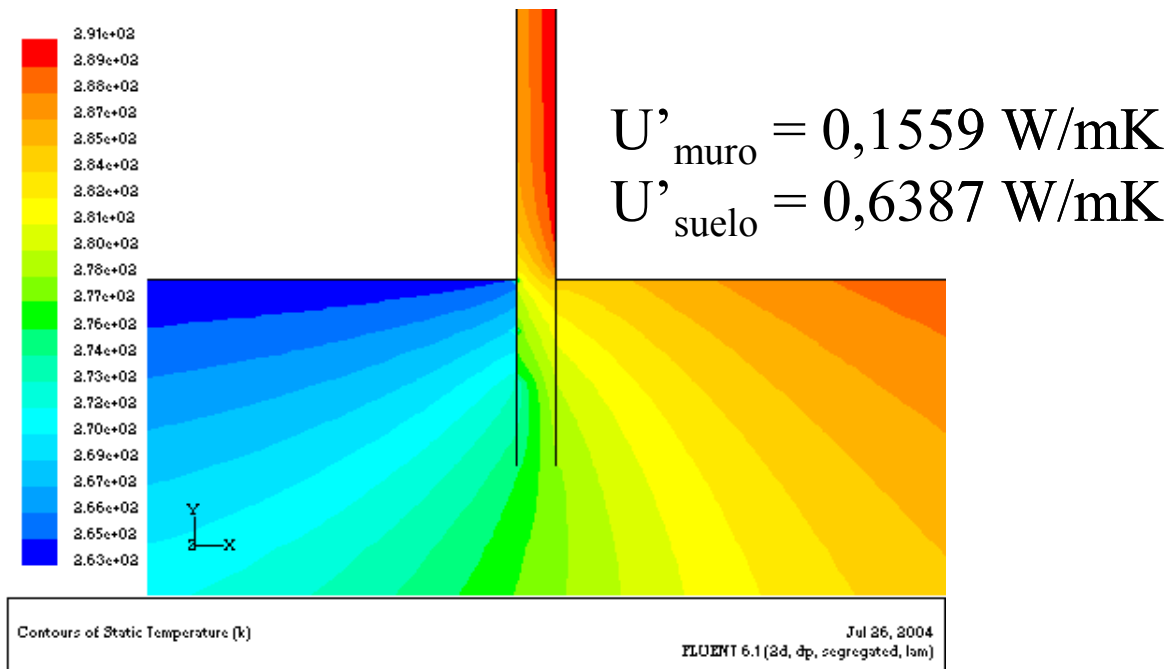


**Figura-39:** Zócalo de 20 cm en el que se ha sustituido el Thermowall de 6 cm por vidrio celular del mismo espesor. Distribución de temperaturas y coeficientes de puente térmico. Muro de cimentación de ladrillo perforado con enfoscado de mortero de cemento de 1 cm en el interior y con 60 cm de vidrio celular de 6 cm de espesor en el exterior. Solera de forjado de planta baja con capa de tierra sin arlita ( $k = 1 \text{ W/mK}$ ). Vivienda octagonal.

Pasamos a continuación a analizar la solución constructiva de implementar un muro de cimentación de Arlibloc de 25 cm. En todos los casos vamos a partir del hecho de que se usa una banda perimetral exterior de 20 cm de altura y 6 cm de espesor de vidrio celular para apoyar el Thermowall del muro invertido (por encima del terreno). Pasamos a comparar la opción del muro de cimentación de ladrillo perforado con el muro de cimentación de Arlibloc, y en este último caso las soluciones de incorporar un zócalo de 20 cm con Arlibloc. En la siguientes figuras mostramos en primer lugar las distribuciones de temperatura resultantes en el caso de emplear el muro de cimentación de Arlibloc sin y con zócalo de Arlibloc. En la tercera figura mostramos la dependencia de los coeficientes de puente térmico vertical y perimetral con el espesor de la capa de vidrio celular dispuesta en el exterior del muro de cimentación.

Como podemos ver en esta figura, el efecto del espesor de la capa de vidrio celular en el exterior del muro de cimentación es considerablemente inferior en el caso de que dicho muro esté confeccionado con Arlibloc que si lo está con Ladrillo perforado. En el caso de disponer además del muro de cimentación de ladrillo perforado, un zócalo de 20 cm del mismo material, el efecto de la capa de vidrio celular en el exterior del muro de cimentación pasa a ser prácticamente despreciable.

Si tomamos como punto de partida la solución propuesta en el caso de emplear muro de cimentación de ladrillo perforado (capa de 60 cm de vidrio celular con 4 cm de espesor dispuesta en el exterior del muro de cimentación), vemos cómo en el caso de emplear muro de cimentación de Arlibloc podemos suprimir dicha capa de vidrio celular manteniendo coeficientes de puente térmico inferiores a la solución anterior. Con un espesor de 2 cm en la capa de vidrio celular exterior al muro de cimentación se consigue otra reducción del mismo orden en el puente térmico vertical, pero en aras a la simplicidad constructiva, probablemente no tenga sentido el disponer esta capa adicional de vidrio celular para reducir más un puente térmico ya de por si relativamente poco importante.

En el caso de añadir un zócalo de 20 cm de Arlibloc, el puente térmico vertical se reduce a menos de una tercera parte incluso sin presencia de capa externa de vidrio celular, pasando a ser prácticamente despreciable<sup>3</sup>, y por tanto careciendo de sentido la capa de vidrio celular en la cara externa del muro de cimentación.

<sup>3</sup> Realmente, es el menor coeficiente de transferencia de esos 20 cm de muro el que compensa casi totalmente la presencia del puente térmico vertical que sigue existiendo.

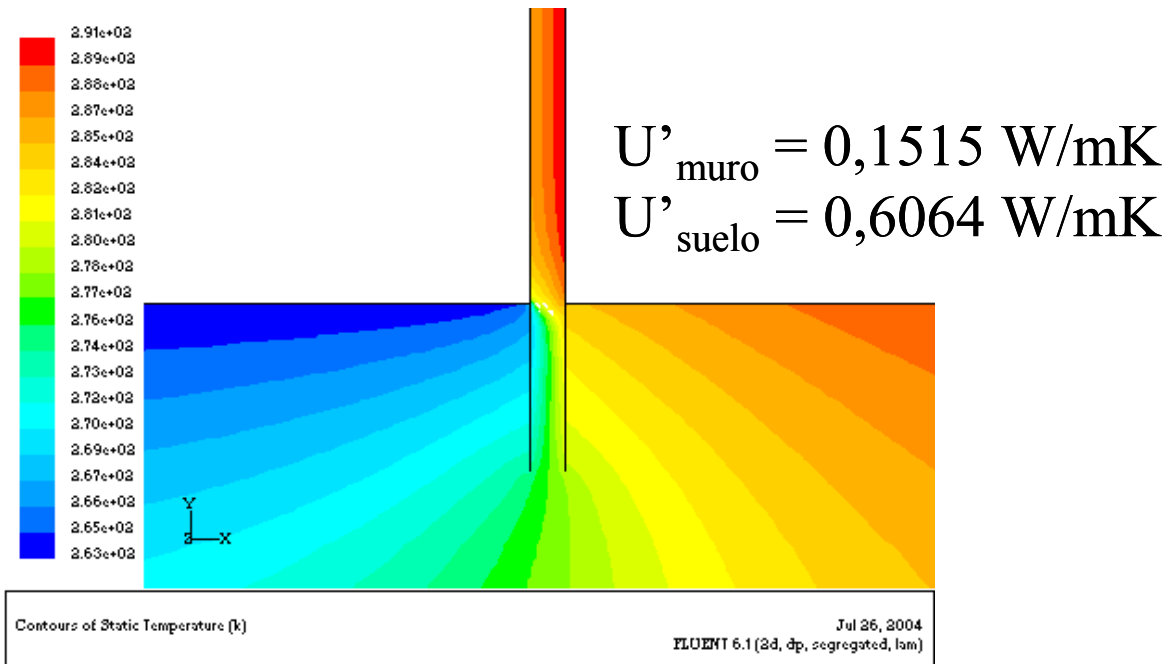


**Figura-40:** Zócalo de 20 cm de ladrillo macizo en el que se ha sustituido el Thermowall de 6 cm por vidrio celular del mismo espesor. Distribución de temperaturas y coeficientes de puente térmico. Muro de cimentación de Arlibloc de 25 cm sin vidrio celular. Solera de forjado de planta baja con capa de tierra sin arlita ( $k = 1 \text{ W/mK}$ ). Vivienda octagonal.

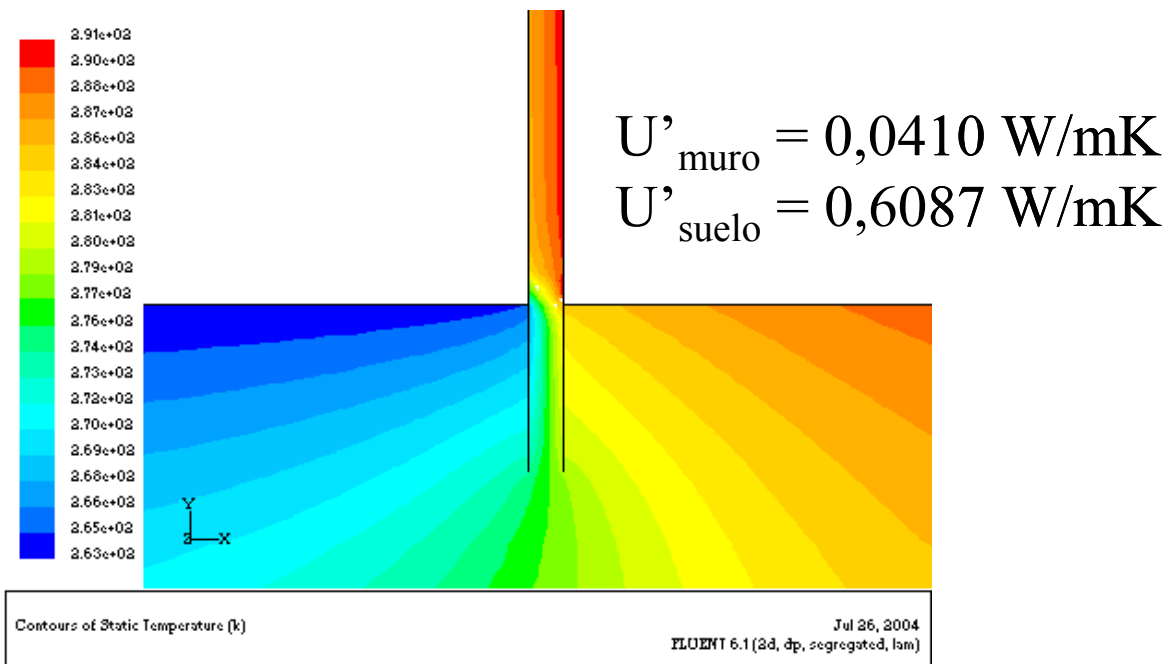


**Figura-41:** Zócalo de 20 cm de Arlibloc en el que se ha sustituido el Thermowall de 6 cm por vidrio celular del mismo espesor. Distribución de temperaturas y coeficientes de puente térmico. Muro de cimentación de Arlibloc sin vidrio celular. Solera de forjado de planta baja con capa de tierra sin arlita ( $k = 1 \text{ W/mK}$ ). Vivienda octagonal.

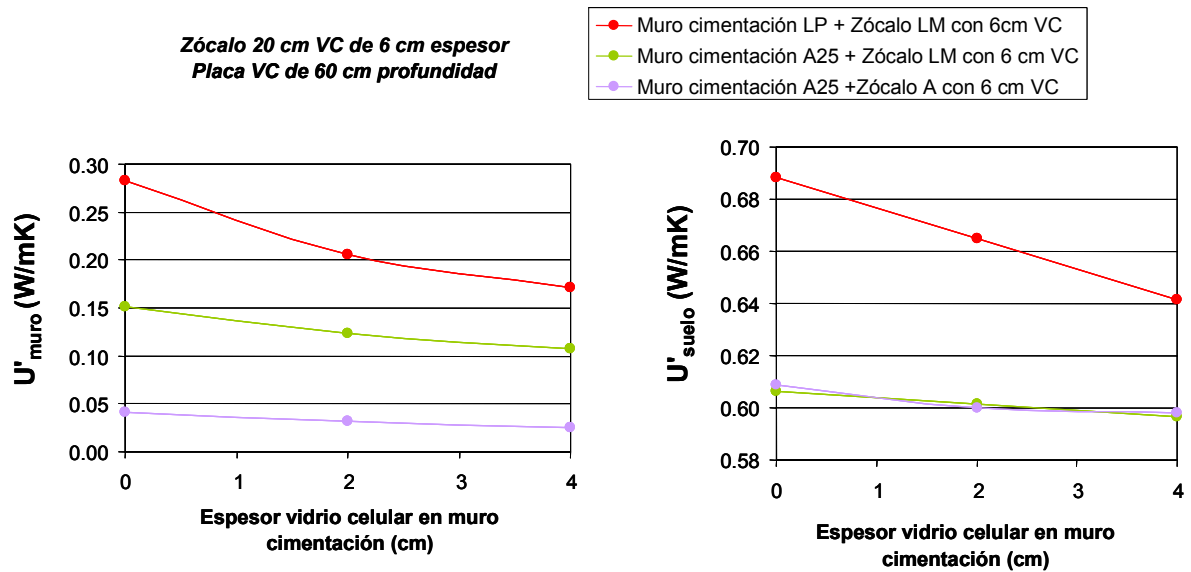


**Figura-42:** Comparación del efecto del espesor de la capa de vidrio celular (60 cm) en exterior del muro de cimentación para muros de cimentación de la drillo perforado y Arlibloc. Solera de forjado de planta baja con capa de tierra sin arlita ( $k = 1 \text{ W/mK}$ ). Vivienda octagonal. LP = Ladrillo perforado; LM = Ladrillo macizo ; A = Arlibloc ; VC = Vidrio celular.

Por último, vamos a analizar las ventajas de implementar el muro de cimentación con Arlibloc de 30 cm. En las siguientes figuras mostramos<sup>4</sup> los campos de temperatura resultantes al emplear el muro de cimentación de Arlibloc 30 y al añadir un zócalo de Arlibloc 30 (una hilada = 20 cm). En el zócalo, el uso del Arlibloc de 30 cm permite prescindir de la capa de vidrio celular, pues el mayor espesor del Arlibloc ya proporciona los 6 cm necesarios para apoyar la capa de Thermowall, con la potencial simplificación del procedimiento constructivo. Como podemos ver, la opción con una hilada de Arlibloc de 30 cm como zócalo proporciona un menor puente térmico vertical y un puente térmico perimetral ligeramente superior.

<sup>4</sup> El espesor del muro de cimentación en la figura aparece igual que en los casos anteriores, pero se ha empleado una conductividad ortotrópica para modelar el incremento de espesor del Arlibloc.

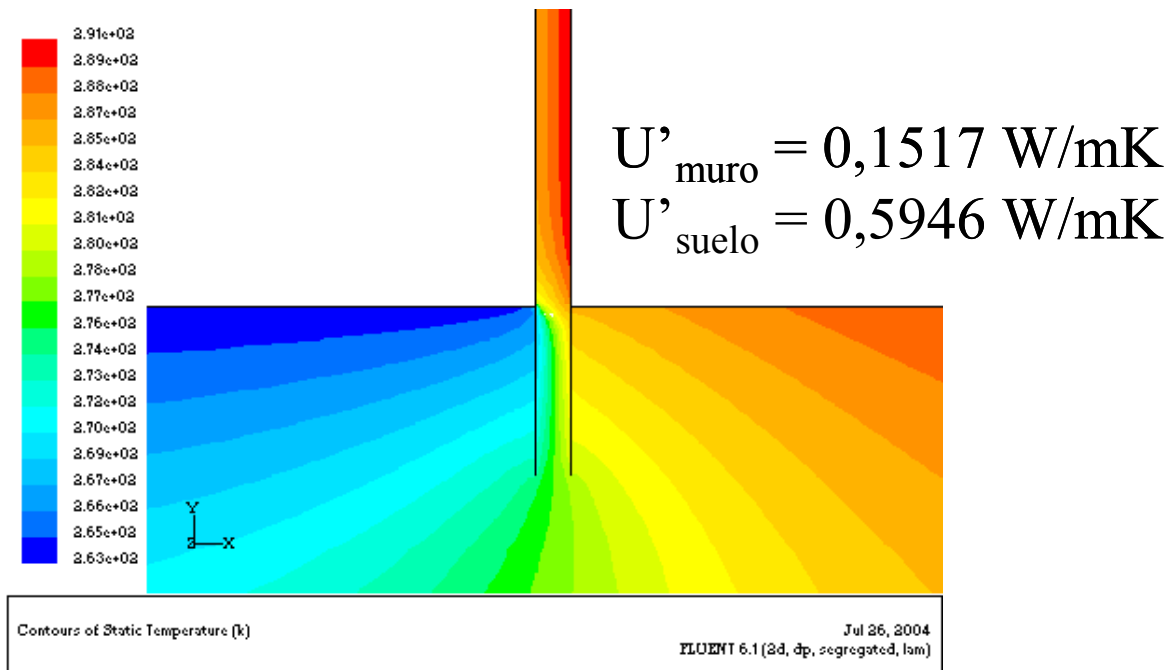


**Figura-43:** Distribución de temperaturas y coeficientes de puente térmico. Muro de cimentación de Arlibloc de 30 cm sin vidrio celular. Zócalo de ladrillo macizo con una capa de 20 cm de vidrio celular de 6 cm. Solera de forjado de planta baja con capa de tierra sin arlita ( $k = 1 \text{ W/mK}$ ). Vivienda octagonal.

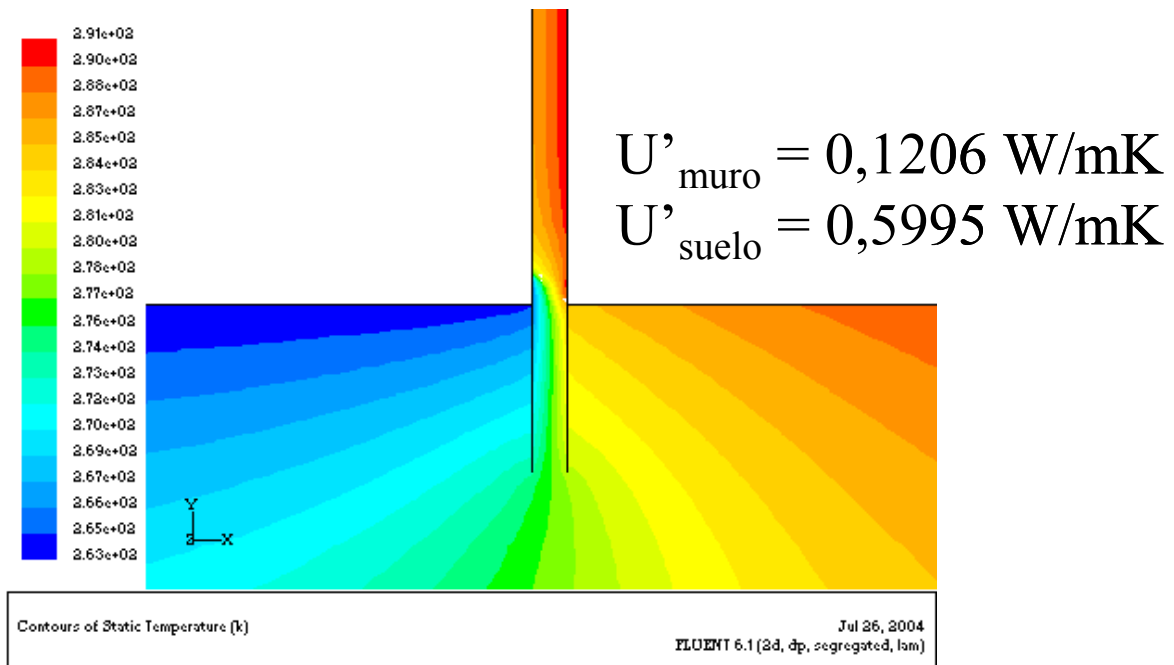


**Figura-44:** Distribución de temperaturas y coeficientes de puente térmico. Muro de cimentación de Arlibloc de 30 cm sin vidrio celular. Zócalo de una hilada de Arlibloc de 30 cm. Solera de forjado de planta baja con capa de tierra sin arlita ( $k = 1 \text{ W/mK}$ ). Vivienda octagonal.

Finalmente, en la siguiente figura mostramos una comparativa de los puentes térmicos en las soluciones más apropiadas con los distintos elementos constructivos.

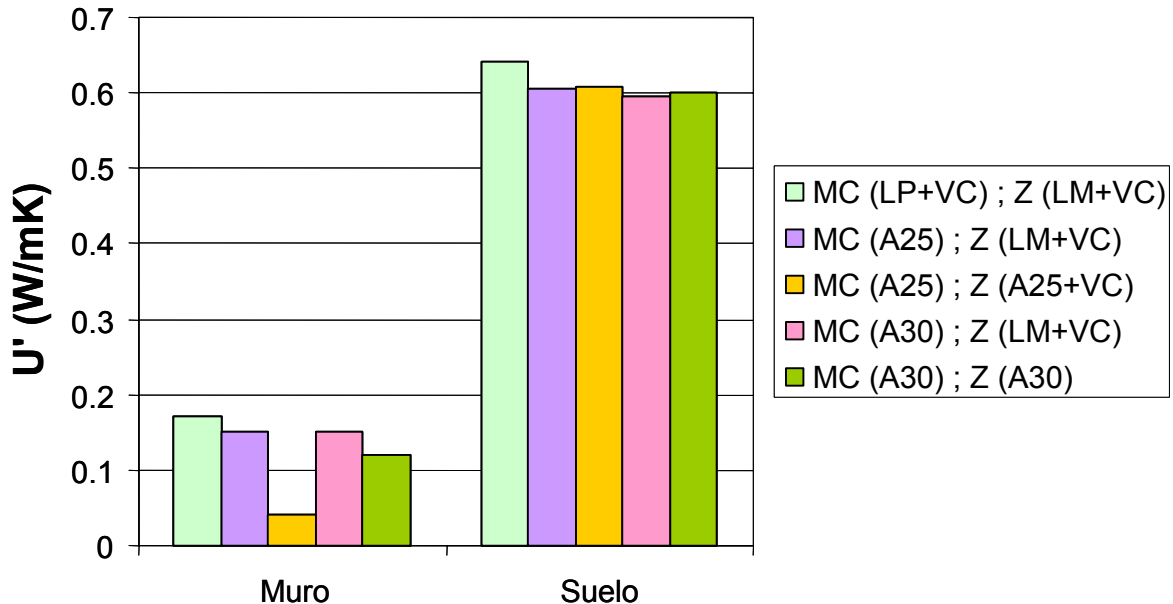


**Figura-45:** Comparativa de puentes térmico vertical (muro) y perimetral (suelo) en las mejores soluciones identificadas según el material constructivo. Solera de forjado de planta baja con capa de tierra sin arlita ( $k = 1 \text{ W/mK}$ ). Vivienda octagonal. (MC = muro cimentación ; Z = zócalo ; LP = ladrillo perforado ; LM = ladrillo macizo ; VC = vidrio celular ; A25 = arlibloc de 25 cm de espesor ; A30 = arlibloc de 30 cm de espesor). En caso de existir, el vidrio celular del zócalo tiene un espesor de 6 cm y una altura de 20 cm. En caso de existir, el vidrio celular del muro de cimentación está colocadop externamente con un espesor de 4 cm y una altura de 60 cm.

Desde el punto de vista del puente térmico perimetral, el dominante, todas las soluciones con Arlibloc son significativamente mejores que la solución con ladrillo perforado y capa externa de vidrio celular. Entre las distintas soluciones con Arlibloc no hay diferencias importantes en el valor del puente térmico perimetral.

Desde el punto de vista del puente térmico vertical, las soluciones con Arlibloc también superan a la de ladrillo perforado con vidrio celular. Entre las soluciones con Arlibloc, asumiendo que no empleamos vidrio celular en muro de cimentación con este material, en ausencia del zócalo de Arlibloc, las soluciones con espesor de 25 cm y 30 cm son prácticamente equivalentes. La solución incorporando un zócalo de Arlibloc-30 supone una mejora significativa respecto a la reducción del puente térmico vertical, y una simplificación constructiva al evitar el zócalo de vidrio celular. Sin embargo, el coste considerablemente superior del muro de cimentación con Arlibloc-30, junto al hecho de que este bloque viene de Barcelona mientras el Arlibloc-25 se fabrica en Madrid, cuestionan que quede justificada la mejora en el puente térmico vertical. Por otro lado, esta primera hilada de Arlibloc representa una ligera

reducción en la capacidad de almacenamiento térmico del muro, aunque como hemos visto en esta región el nivel de temperaturas es inferior.

Por tanto, como conclusión recomendamos dos soluciones muy parecidas desde un punto de vista térmico, dependiendo la elección entre una u otra del balance entre los costes, simplicidad constructiva y de consecución de materiales en obra.

Agrupamos a continuación las características de cada una de estas soluciones incluyendo una evaluación de costes (materiales y mano de obra) para el desarrollo de las unidades de obra muro de cimentación y zócalo. Con fines comparativos, a las dos alternativas propuestas (alternativa-1 y alternativa-2) añadimos los resultados para la alternativa-0 de referencia.

Para la evaluación de costes se han empleado las ofertas de materiales, jornales y rendimientos de puesta en obra indicados en [Ref. 10] y desarrollados para este proyecto en concreto. Hemos considerado una altura del muro de cimentación de 120 cm (6 hiladas de Arlibloc). En el caso del muro de cimentación de ladrillo tosco hemos considerado un enfoscado del mismo por las dos caras a 10 €/m<sup>2</sup>. Para el vidrio celular, hemos considerado un coste de materiales de 22,66 €/m<sup>2</sup> para un espesor de 4 cm, y unos rendimientos de puesta en obra en el exterior del zócalo y muro de cimentación de 0,05 h/m<sup>2</sup> de ayudante y 0,1 h/m<sup>2</sup> de oficial. Los costes presentados son para la vivienda octagonal, siendo

#### Solución-0:

- Muro de cimentación de ladrillo tosco parcialmente relleno de cemento y enfoscado a dos caras, con 60 cm de aislamiento de vidrio celular de 4 cm de espesor dispuesto en su cara externa.
- Zócalo de ladrillo tosco relleno de tierra (como resto de muro invertido) con 20 cm de vidrio celular de 6 cm de espesor en su cara externa.
- $U'_{\text{muro}} = 0,174 \text{ W/mK}$
- $U'_{\text{suelo}} = 0,650 \text{ W/mK}$
- Coste de muro cimentación y zócalo en vivienda octagonal: 4452.36 €
- Coste de muro cimentación y zócalo en vivienda con patio: 8111.39 €

#### Solución-1:

- Muro de cimentación de Arlibloc-25
- Zócalo de 20 cm de ladrillo macizo (tosco relleno al igual que el resto del muro) con aislamiento exterior de vidrio celular (6 cm) par apoyo del Thermowall.
- $U'_{\text{muro}} = 0,152 \text{ W/mK}$
- $U'_{\text{suelo}} = 0,606 \text{ W/mK}$
- Coste de muro cimentación y zócalo en vivienda octagonal: 1765,24 €
- Coste de muro cimentación y zócalo en vivienda con patio: 3215,94 €

## Solución-2:

- Muro de cimentación de Arlibloc-30
- Zócalo de 20 cm (una hilada) de Arlibloc-30
- $U'_{\text{muro}} = 0,121 \text{ W/mK}$
- $U'_{\text{suelo}} = 0,600 \text{ W/mK}$
- Coste de muro cimentación y zócalo en vivienda octagonal: 1700.16 €
- Coste de muro cimentación y zócalo en vivienda con patio: 3097.38 €

Como podemos ver, los costes de las Alternativa-1 y 2 son prácticamente idénticos, por lo que el argumento costes tampoco introduce ninguna discriminación significativa entre ellas. Por tanto, la mayor simplicidad constructiva de la alternativa-3 deberá sopesarse con la dificultad de abastecimiento del Arlibloc-30 desde Barcelona (el coste incorporado ya incluye el transporte) para decidir entre ellas.

En cuanto a costes, las alternativas 1 y 2 representan una reducción de costes del 60 % y el 62 % respectivamente respecto a la alternativa-0, lo cual es especialmente relevante en el caso de la vivienda con patio que por su menor compacidad presenta un coste significativamente superior en estas partidas.

## 6. Conclusiones

1. El muro invertido constituye un elemento bioclimático apropiado al permitir una adecuada gestión de los aportes térmicos a la vivienda (solares y de los elementos activos de climatización), conduciendo a unos menores requerimientos de potencia instalada en los equipos climatizadores (tanto emisores como generadores, y en este caso tanto convencionales como basados en energías renovables)

2. El muro invertido introduce un puente térmico vertical significativo que es preciso romper para no degradar la capacidad aislante de la capa colocada en el exterior del muro.

3. El contacto directo con el terreno, al igual que el muro invertido, representa un elemento bioclimático adecuado al permitir una mejor gestión energética en la vivienda por su elevada capacidad de almacenamiento. Sin embargo, su implementación genera un puente térmico perimetral que conviene reducir, especialmente al emplear geometrías constructivas de elevado factor de forma, como es el caso de la vivienda con patio interior (una de las dos tipologías consideradas en este proyecto).

4. El puente térmico vertical que se origina en el apoyo del muro invertido de ladrillo de 24 cm directamente sobre el terreno es responsable de un incremento del 13,11 % en el coeficiente de transferencia efectivo del muro de la planta baja. Para eliminar dicho efecto es preciso emplear tres hiladas (zócalo de 60 cm) de Arlibloc del mismo espesor que el ladrillo y con el mismo aislamiento exterior que el muro original. Si el zócalo de Arlibloc se coloca sin

aislamiento exterior el beneficio de la primera hilada es muy escaso, y las siguientes hiladas empeoran la situación, por lo que esta no es una solución adecuada. Al colocar Arlibloc con un aislamiento exterior tal que el coeficiente de transferencia unidimensional sea igual al del muro original, la primera hilada es significativamente efectiva en la reducción del puente térmico vertical (incremento de 8,64 % respecto a caso 1D), pero las sucesivas no proporcionan beneficios significativos, por lo que bastaría con un zócalo de una hilada (20 cm)

5. Desde el punto de vista de la rotura de puente térmico vertical mediante un zócalo de baja conductividad, prácticamente todo el beneficio alcanzable se consigue con una hilada (20 cm) de un material con la conductividad del Arlibloc (0,18 W/mK).

6. La importancia relativa del puente térmico vertical es del orden de 3 - 4 veces inferior a la del puente térmico perimetral. En el caso de viviendas con elevada compacidad, como es el caso de la vivienda octagonal, el puente térmico perimetral es a su vez menos importante que los otros conceptos de pérdidas energéticas, si bien retiene un a importancia significativa. En el caso de la vivienda con patio interior, debido a su menor compacidad, tanto el puente térmico vertical como el perimetral adoptan una mayor relevancia.

7. En este estudio se analiza la viabilidad de una solución integrada que permita la rotura simultánea de ambos puentes térmicos (vertical y perimetral) simplificando el procedimiento constructivo y con un coste significativamente inferior, mediante el uso de un material monocapa (cerramiento de baja conductividad térmica) para el desarrollo de los muros de cimentación de la vivienda.

8. El uso de bloques de baja conductividad térmica para el desarrollo del muro de cimentación proporciona una forma efectiva de rotura del puente térmico perimetral simplificando el procedimiento constructivo al obviar la necesidad de capas aislantes específicas (vidrio celular). En el caso de la vivienda de tipología octagonal, la rotura de este puente térmico perimetral no es crítica, pero en la vivienda con patio es más importante. Sin embargo, el uso de estos bloques de baja conductividad tiene ventajas adicionales que hace recomendable su uso para ambas viviendas: En efecto, el gran formato de estos bloques (Arlibloc: 50x20xe cm ; Hormigón celular: 62,5x25xe cm) permite reducir significativamente los requerimientos de mano de obra para su colocación, conduciendo a unos costes inferiores del m<sup>2</sup> de pared terminada, que en el caso del muro de cimentación son especialmente beneficiosos al tener que desarrollarse bajo el terreno. Por otro lado, el uso de un muro de cimentación de baja conductividad proporciona simultáneamente solución a la rotura del puente térmico vertical del muro invertido, obviando por tanto la necesidad de emplear una solución constructiva específica para este fin. Por tanto, vemos cómo con el uso de estos materiales en el muro de cimentación se consigue el quíntuple objetivo de rotura de puente térmico perimetral, rotura de puente térmico vertical, simplificar el procedimiento constructivo, facilitar la construcción del muro de cimentación bajo el nivel del suelo y reducir costes.

Entre las opciones del bloque de hormigón celular y el Arliblock, recomendamos ésta última por la mayor garantía bioconstructiva de los materiales empleados (arlita y cemento). El bloque de Canabric es otra opción posible, pero sus menores dimensiones (30x14,5x10,5 cm) y mayor coste no permiten alcanzar algunos de los anteriores objetivos.

9. A la vista de estos resultados, y teniendo en cuenta tanto los costes como los requerimientos de rotura de puente térmico, en el caso de optar por romper los puentes térmicos vertical y perimetral con bloques de baja conductividad en los muros de cimentación, las recomendaciones para materiales de los muros de cimentación y enterados serían las siguientes:

- Vivienda octagonal:
  - o Muro cimentación muro de carga interior: El bloque de Termoarcilla de 19 cm, el mismo que se usa para el desarrollo de este muro, con un coste de 11,58 €/m<sup>2</sup> sin enfoscados parece la solución más apropiada. En el caso de tener que enfoscar el muro por ambas caras, podría ponerse en 32 €/m<sup>2</sup>, en cuyo caso el Arliblock de 25 cm con un coste de 21,35 €/m<sup>2</sup> sería la mejor opción. Aunque este muro no requiera de rotura de puente térmico perimetral, el uso del Arliblock podría resultar más adecuado que la Termoarcilla especialmente si se opta por disponer algún panel de muro radiante sobre este muro.
  - o Muro de cimentación del muro de carga exterior: El Arlibloc de 25 cm con sus 21,35 €/m<sup>2</sup> sería la solución óptima. Pasar a el Arlibloc de 30 cm (27,60 €/m<sup>2</sup>) no reporta ventajas térmicas significativas, e incurre en un coste adicional significativo unido al hecho de que este bloque viene de Barcelona mientras que el de 25 cm se fabrica en Madrid. La única justificación que podría tener es el beneficio de disponer de una primera hilada de este bloque sobre el terreno para apoyar el aislamiento exterior (Thermowall de Gutex). como alternativa a realizar esta función con una tira de vidrio celular.
  - o Muros de sótanos: El Termoarcilla de 24 cm, con sus 13,73 €/m<sup>2</sup> sin revocos parece una buena opción. Sin embargo, con los revocos necesarios se pondría entorno a 34 €/m<sup>2</sup> que hacen que resulte menos favorable que el Arlibloc de 25 cm (21,35 €/m<sup>2</sup>), si este último no requiriera ser enfoscado.
- Vivienda con patio interior:
  - o Muros de cimentación de las paredes interior y exterior. En este caso, ambos muros de carga requieren rotura de puentes térmicos perimetral y vertical, por lo que la opción más adecuada es el Arlibloc de 25 cm o de 30 cm (ver más adelante).
  - o Muros de sótano: Al igual que en la vivienda octagonal, se pueden usar el Termoarcilla de 24 cm o el Arlibloc de 25 cm según requerimientos de enfoscados.

Por tanto, y con el fin de homogeneizar materiales puede resultar conveniente emplear el Arlibloc de 25 cm en todos los muros enterrados.

10. Al comparar la evaluación del coeficiente de pérdidas del suelo mediante la solución analítica bidimensional con la resultante de la simulación numérica detallada del campo de temperaturas resultante en el terreno, vemos cómo esta última es de un 6 % a un 10 % inferior, con un error decreciente al incrementar la longitud de la capa de vidrio celular. Por tanto, la aproximación analítica bidimensional es adecuada para el diseño.

11. Al abordar la rotura de los puentes térmicos perimetral y vertical con la disposición de una capa de vidrio celular dispuesta verticalmente y paralela al muro de cimentación, para el caso del muro invertido es mucho más favorable disponer la capa de vidrio celular en el exterior del muro de cimentación que en su interior. El efecto de dicha capa de vidrio celular dispuesta exteriormente sobre el puente térmico vertical es muy importante hasta longitudes del orden de 40 cm. El efecto sobre el puente térmico perimetral es menos importante, pero mantiene tasas de reducción del mismo orden hasta longitudes de 80 cm. Por tanto, en el caso de optar por esta solución, la longitud de la placa de vidrio celular óptima está entorno a los 60 cm.

12. En el caso de emplear una placa de 60 cm de vidrio celular (espesor 4 cm) en el exterior de un muro de cimentación de ladrillo perforado, la sustitución de el Thermowall en los primeros 20 cm del muro invertido por el mismo espesor (6 cm) de vidrio celular con el fin de evitar el contacto directo al terreno del tablero de Gutex, conduce a un incremento de un 3,8 % en el coeficiente lineal de puente térmico vertical.

13. El uso de Arlibloc de 25 cm para el desarrollo de los muros de cimentación proporciona puentes térmicos verticales y perimetrales inferiores a los de la solución con muro de cimentación perforado y capa externa de vidrio celular. Por tanto, desde los puntos de vista térmico, económico y de simplicidad constructiva, resulta recomendable sustituir el muro de cimentación de ladrillo perforado con capa externa de vidrio celular por un muro de cimentación de Arlibloc 25 sin capa perimetral de vidrio celular por debajo del terreno. Si además se añade un zócalo de 20 cm de arlibloc (una hilada) sobre el nivel del terreno, el puente térmico vertical pasa a ser prácticamente despreciable (el efecto sobre el puente térmico perimetral es despreciable).

14. El uso del Arlibloc de 30 cm de espesor permite simplificar constructivamente la ejecución de estas unidades de obra, al poder prescindirse de la banda de 20 cm de altura y 6 cm de espesor de vidrio celular en el zócalo de apoyo del Thermowall. Sus prestaciones térmicas y económicas son ligeramente mejores a las obtenidas con el Arlibloc de 25 cm, y el único inconveniente puede ser la gestión del suministro procedente de Barcelona en este caso. Cualquiera de las alternativas propuestas con Arlibloc representan una reducción de costes del orden del 60 % respecto a la solución de referencia a base de ladrillo tosco en el muro de cimentación, lo cual es especialmente significativo en la vivienda con patio por su menor compacidad.

15. A la vista de los resultados mostrados en este informe, la recomendación para resolver los puentes térmicos vertical y perimetral es el uso de cualquiera de las alternativa-1 o alternativa-2 especificadas a continuación junto a sus actuaciones. Indicamos también como alternativa-0 la de referencia basada en ladrillo tosco para comparación de las mejoras introducidas.

**Solución-0:**

- Muro de cimentación de ladrillo tosco parcialmente relleno de cemento y enfoscado a dos caras, con 60 cm de aislamiento de vidrio celular de 4 cm de espesor dispuesto en su cara externa.
- Zócalo de ladrillo tosco relleno de tierra (como resto de muro invertido) con 20 cm de vidrio celular de 6 cm de espesor en su cara externa.
- $U'_{\text{muro}} = 0,174 \text{ W/mK}$
- $U'_{\text{suelo}} = 0,650 \text{ W/mK}$
- Coste de muro cimentación y zócalo en vivienda octagonal: 4452.36 €
- Coste de muro cimentación y zócalo en vivienda con patio: 8111.39 €

**Solución-1:**

- Muro de cimentación de Arlibloc-25
- Zócalo de 20 cm de ladrillo macizo (tosco relleno al igual que el resto del muro) con aislamiento exterior de vidrio celular (6 cm) par apoyo del Thermowall.
- $U'_{\text{muro}} = 0,152 \text{ W/mK}$
- $U'_{\text{suelo}} = 0,606 \text{ W/mK}$
- Coste de muro cimentación y zócalo en vivienda octagonal: 1765,24 €
- Coste de muro cimentación y zócalo en vivienda con patio: 3215,94 €

**Solución-2:**

- Muro de cimentación de Arlibloc-30
- Zócalo de 20 cm (una hilada) de Arlibloc-30
- $U'_{\text{muro}} = 0,121 \text{ W/mK}$
- $U'_{\text{suelo}} = 0,600 \text{ W/mK}$
- Coste de muro cimentación y zócalo en vivienda octagonal: 1700.16 €
- Coste de muro cimentación y zócalo en vivienda con patio: 3097.38 €

## 7. Referencias

1. Rosete-Guillén M.T., Bigaré H., Llobera-Serra F., Garcia-Casals X., *'Estudio Geobiológico del Terreno en Torremocha para Construcción de Viviendas Bioclimáticas'*, Noviembre 2002
2. García-Casals X., *'El Clima en Torremocha de Jarama: Recopilación de Datos Climáticos para los Análisis Energéticos y de Confort en Tres Viviendas Bioclimáticas de Torremocha de Jarama (Madrid)'*, Noviembre 2002
3. García-Casals X., *'Consideraciones Energéticas y Bioclimáticas sobre las Viviendas Sostenibles de Torremocha'*, Informe interno del IIT (IIT-03-003I), Febrero 2003
4. García-Casals X., *Análisis y Optimización Energética de los Voladizos y Porches de una Vivienda Bioclimática*, Informe interno del IIT (IIT-03-015I), Abril 2003
5. García-Casals X., *Análisis y Optimización Estructural de la Tipología Octagonal de Vivienda de Bioconstrucción*, Informe interno del IIT (IIT-03-054I), Septiembre 2003
6. García-Casals X., *Embodied Energy en Vivienda de Tipología Octagonal. Comparación Soluciones Bioconstruida y Convencional*, Informe interno del IIT (IIT-03-061I), Octubre 2003
7. García-Casals X., *Idoneidad de los Cerramientos Monocapa para Viviendas Bioclimáticas en Emplazamientos de Elevada Severidad Climática*, Informe interno del IIT (IIT-03-063I), Octubre 2003
8. Ministerio de Fomento, *'Primer Proyecto de Código Técnico de la Edificación'*, Mayo 2002
9. García-Casals X., *'La Simulación Dinámica de Edificios y la Eficiencia Energética en el Sector de la Edificación'*, XV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Cádiz, 10-13 Diciembre 2002
10. García-Casals X., *'Análisis Técnico-Económico y de Sostenibilidad (Embodied Energy) del BTC como solución Bioconstructiva en la Comunidad de Madrid'*, Informe interno del IIT (IIT-03-064I), Octubre 2003
11. Kasuda T., Archenbach P.R., *'Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the United States'*, ASHRAE transactions, Vol.71, Part1, 1965