

Bloques cerámicos de alto aislamiento térmico, Termoarcilla ECO.

Víctor Sastre Álvarez.
Ingeniero de Caminos.

La aprobación del Código Técnico de la Edificación ha supuesto un cambio muy importante para los materiales de construcción. El aumento de exigencias en las prestaciones de los edificios, y concretamente, las propuestas por el Documento Básico DB-HE Ahorro de Energía, son una invitación apremiante a la búsqueda de mejores productos y sistemas de construcción.

El bloque cerámico aligerado, como material específicamente contemplado en el CTE, está llamado a ser punta de lanza en este escenario. Elemento equilibrado como pocos, la fábrica construida con estas piezas combina un buen aislamiento acústico, alta resistencia mecánica y una excepcional resistencia a fuego con unas propiedades de aislamiento y confort térmico (inercia térmica) muy notables. Además hay que recalcar el hecho importantísimo de que es un producto totalmente sostenible y respetuoso con el medio ambiente, ya que se compone únicamente de arcilla cocida, cuya vida útil puede llegar a ser de siglos.

Sin embargo, el diseño de bloque cerámico no es trivial. Es necesario un estudio detallado de las características de la arcilla y de la instalación donde se van a producir el bloque. Estos dos elementos nos van a proporcionar el contexto del bloque a optimizar.

Termoarcilla ECO se encuadra dentro de los bloques cerámicos de alto aislamiento térmico. No se trata de un bloque en particular, sino de una familia de bloques cuyas prestaciones están muy por encima del estándar de calidad habitual, y cuyo ánimo es cumplir con las más altas exigencias del CTE. Asimismo, al no tratarse de un solo producto se dispondrá de un amplio abanico de bloques con sus propias características.

El aislamiento térmico que proporciona un bloque cerámico está basado en la capacidad aislante del aire cuando está ocluido en pequeños recintos. Es el mismo concepto de la mayoría de los aislantes, llevado a una escala mayor. Para crear multitud de pequeños recintos es necesario tener un esqueleto físico, tarea que es confiada a la arcilla cocida. Aquí es donde surgen las primeras cuestiones, ¿cómo combinar la arcilla con las celdas internas, para llegar a un punto de máximo aislamiento?, si lo que aísla es el aire, ¿qué influencia tiene el esqueleto de arcilla en este aspecto? Es importante señalar que no hay respuestas absolutas en este sentido ya que, en mayor o menor medida, todos los elementos del bloque influyen en el aislamiento térmico.

– Tipo de arcilla:

El primer punto a definir es la arcilla. No todas las arcillas son iguales, pero es obvio que cuanto mejor es la conductividad térmica de la arcilla, mejor es el comportamiento aislante. Cada arcilla tiene una conductividad térmica propia. En los bloques Termoarcilla la arcilla se aditiva para conseguir una porosidad en la arcilla cocida de forma que se consiga bajar su conductividad natural. Este aligeramiento de las arcillas se realiza de forma muy controlada, ya que es preciso no comprometer la resistencia mecánica del bloque.

– Tipo de geometría interna:

La geometría interna del bloque es uno de los factores más importantes a la hora de evaluar el comportamiento térmico del bloque. La geometría interna del bloque se compone de la disposición de las celdillas y del espesor de los tabiquillos. El espesor de los tabiquillos interiores tiene una influencia importante en la transmisión del calor, por lo que se ha hecho necesario reducir este espesor tanto como ha sido posible.

El diseño de la disposición de las celdillas es bastante más complicado. La conductividad térmica del aire depende de las dimensiones de la celdilla, que a su vez tiene limitaciones técnicas por el molde de extrusión y los procesos de secado y cocido de pieza. El esqueleto de arcilla por su parte, se tiene que diseñar para que térmicamente sea lo menos influyente posible, pero sin olvidar que tiene que ser autoportante en los procesos de extrusión y secado.

Atendiendo primero a la forma de la celdilla, y a la forma en la que el calor pasa a través de ella, hay que distinguir tres sucesos: la transmisión de calor por conducción, por convección y por radiación.

En los bloques Termoarcilla ECO, el tamaño de la celdilla se ha estudiado para que no se produzca la mínima transmisión de calor por convección. Esto provoca un aumento muy importante de la resistencia térmica del aire, ya que la transmisión de calor por convección suele tener una influencia importante en la mayoría de celdas de piezas de fábrica habituales.

La transmisión de calor por conducción es siempre constante. El valor medio de la conductividad térmica del aire en reposo, aunque varía ligeramente con la temperatura, es de 0,025 W/m·K, que es un valor excepcionalmente bajo. No es de extrañar que, por este motivo, esto sea utilizada por la mayoría de los materiales que pretenden tener propiedades aislantes. Sin embargo, aunque este valor es bajo, es en sí mismo una fuerte limitación, ya que no se puede hacer nada para poder mejorarlo.

La transmisión de calor por radiación se produce por el mero hecho de que a lo largo del contorno del interior de la celdilla existe una variación de temperatura. Esta radiación se emite fundamentalmente en el espectro infrarrojo y, dado que el aire es transparente a la radiación infrarroja, dentro de la celdilla se produce un intercambio de calor entre todos los puntos de su contorno interior.



Como cada punto del interior de la celdilla intercambia calor con el resto de la celdilla, el estudio mediante análisis matemático es muy complicado. Es necesario hacer algunas simplificaciones.

Estas simplificaciones a realizar son muy útiles, puesto que reduce la dificultad del problema dando un resultado muy cercano a la realidad. En este paso, el objetivo es obtener una R_g (resistencia térmica equivalente) como si el aire fuera un material sólido, para describir el problema en clave de transmisión de calor por conducción. Esta R_g se puede escribir como:

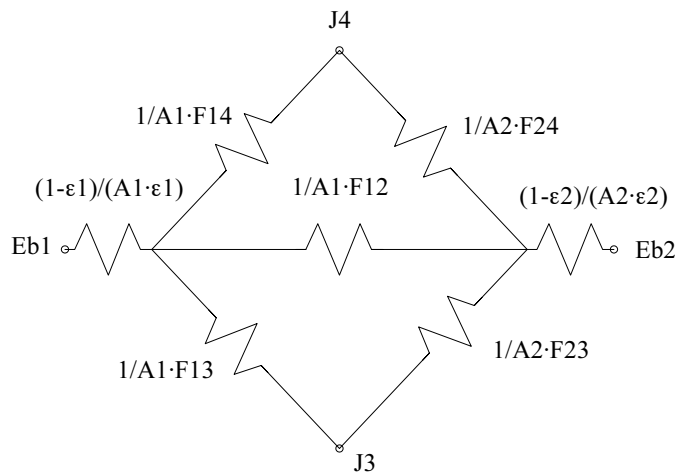
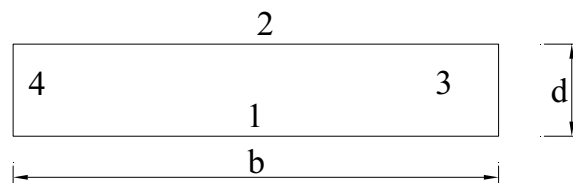
$$R_g = \frac{1}{h_a + h_r}$$

Donde h_a y h_r son los coeficientes de convección-conducción y radiación respectivamente.

Como ya se ha comentado, el coeficiente h_a no crea mayores problemas, ya que se mantiene constante hasta un espesor de celdilla de 20 mm. Sin embargo el coeficiente h_r es más complejo de tratar.

En la transmisión de calor por conducción se cumple $Q = h \cdot A \cdot \Delta T$. Nos interesa llegar a una h_r que sustituya a la h de la fórmula anterior.

Empezamos a solucionar el problema con la celdilla de forma rectangular:



Planteando el problema con unas condiciones donde el lado 1 tiene una temperatura uniforme T_1 , y es fuente de calor y el lado 2 tiene una temperatura uniforme T_2 , y es sumidero de calor, y los lados 3 y 4 son reirradiantes, podemos solucionar el problema con el método de redes eléctricas (la conexión del lado 3 al 4 se obvia, para no restar claridad al esquema). Además como $A_1 = A_2$ podemos simplificar y escribir A . También podemos observar que $F_{14} = F_{24} = F_{13} = F_{23}$

$$Q_{12} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{R_1 + R_2 + R_3}, \text{ donde:}$$

Según lo anterior tenemos que

$$E_{b1} = \sigma \cdot T_1^4$$

$$E_{b2} = \sigma \cdot T_2^4$$

$$R_1 = \frac{1 - \epsilon_1}{A \cdot \epsilon_1}$$

$$R_3 = \frac{1 - \epsilon_2}{A \cdot \epsilon_2}$$

$$\frac{1}{R_2} = A \cdot F_{12} + \frac{1}{\frac{2}{A \cdot F_{14}}} + \frac{1}{\frac{2}{A \cdot F_{14}}} = A \cdot F_{12} + A \cdot F_{14}$$

Definiendo $H = d/b$, podemos hallar los factores de visión F_{12} y F_{14} por el método de las cuerdas cruzadas:

$$F_{12} = \sqrt{1 + H^2} - H$$

$$F_{14} = \frac{1 + H - \sqrt{1 + H^2}}{2}$$

$$F_{14} + F_{12} = \frac{1 - H + \sqrt{1 + H^2}}{2}$$

Con lo cual R_2 nos queda:

$$R_2 = \frac{2}{A \cdot \left(1 - \frac{d}{b} + \sqrt{1 + \left(\frac{d}{b} \right)^2} \right)}$$

Sumando R_1 y R_2 nos queda

$$\frac{1}{A} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_1} - 1 + \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)$$

Dado que, tanto en el DB-HE como en la UNE EN 6946 se define E como

$$E = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$

entonces el resultado nos queda:

$$R_1 + R_2 = \frac{1}{A} \cdot \left(\frac{1}{E} - 1 \right)$$

y Q_{12} nos resulta:

$$Q_{12} = \frac{A \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{E} - 1 + \frac{2}{1 - \frac{d}{b} + \sqrt{1 + \left(\frac{d}{b}\right)^2}}}$$

Ahora bien, llegado a este punto tenemos que hacer una simplificación para poder asimilar el factor $(T_1^4 - T_2^4)$ a otro del tipo $h \Delta T$. Esta simplificación es aceptable puesto que la diferencia de temperaturas en el interior de la celdilla es muy pequeña.

$$T_1 \approx T_2 \approx T_m ; \quad T_m = \frac{T_1 + T_2}{2} ; \quad T_1 - T_2 \ll T_1$$

$$T_1^4 - T_2^4 = (T_1^2 - T_2^2) \cdot (T_1 + T_2) \cdot (T_1 - T_2) = (T_1^2 - T_2^2) \cdot (T_1 + T_2) \cdot \Delta T$$

$$(T_1^2 - T_2^2) \cdot (T_1 + T_2) = [(T_1 - T_2)^2 - 2 \cdot T_1 \cdot T_2] \cdot 2 \cdot T_m = (4 \cdot T_m^2 - 2 \cdot T_m^2) \cdot 2 \cdot T_m = 4 \cdot T_m^3$$

$$T_1^4 - T_2^4 = 4 \cdot T_m^3 \cdot \Delta T$$

Con lo cual Q_{12} nos queda:

$$Q_{12} = \frac{4 \cdot \sigma \cdot T_m^3 \cdot A \cdot \Delta T}{\frac{1}{E} - 1 + \frac{2}{1 - \frac{d}{b} + \sqrt{1 + \left(\frac{d}{b}\right)^2}}}$$

Llamando $h_{ro} = 4 \cdot \sigma \cdot T_m^3$, como se indica en la UNE EN 6946, tenemos:

$$Q_{12} = \frac{h_{ro} \cdot A \cdot \Delta T}{\frac{1}{E} - 1 + \frac{2}{1 - \frac{d}{b} + \sqrt{1 + \left(\frac{d}{b}\right)^2}}}$$

Y comparando con la ecuación de transmisión de calor por conducción $Q = h \cdot A \cdot \Delta T$, donde a h lo denominamos h_r , por ser el coeficiente de radiación, obtenemos que:

$$h_r = \frac{h_{ro}}{\frac{1}{E} - 1 + \frac{2}{1 - \frac{d}{b} + \sqrt{1 + \left(\frac{d}{b}\right)^2}}}$$

con lo cual el valor final de R_g resulta:

$$R_g = \frac{1}{h_a + \frac{h_{ro}}{\frac{1}{E} - 1 + \frac{2}{1 - \frac{d}{b} + \sqrt{1 + \left(\frac{d}{b}\right)^2}}}}$$

Que coincide con la fórmula expuesta en el CTEDB-HE. La ecuación propuesta en la UNE EN 6946 es una buena aproximación.

Una vez que hemos definido de manera concisa el valor de la resistencia de una cavidad de aire rectangular, el siguiente paso es abordar el cálculo de otras formas geométricas, tales como rombos o triángulos.

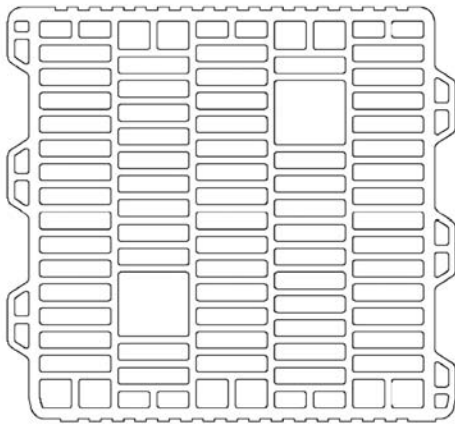
Llegados a este punto nos encontramos con un escollo importante. La principal dificultad para analizar otro tipo de celdas que no tengan sus lados principales 1 y 2 perpendiculares al flujo de calor (es decir todas las que no son rectangulares), es que ya no se puede aplicar el supuesto de que en todo el lado la temperatura es uniforme.

Esto provoca que el análisis del flujo de calor mediante el cálculo de los factores de visión y la reducción del problema a un circuito eléctrico sea muy complicado y poco operativo. En estos casos es mejor seguir el criterio de igualdad de áreas para obtener un primer acercamiento al problema.

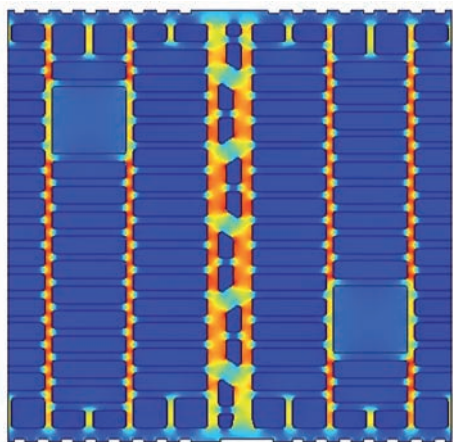
Una vez se ha reducido el problema a una transmisión de calor por conducción, se estudia la interacción aire-arcilla con las fórmulas clásicas de transmisión de calor, y con software de elementos finitos. De este modo se afina cada geometría en función de las características del proceso industrial y de la arcilla.

Sin embargo, en el caso de celdas no rectangulares donde usamos el criterio de igualdad de áreas, las fórmulas clásicas de transmisión de calor no nos ayudan a maximizar el aislamiento de la pieza. El criterio de igualdad de áreas nos proporciona un valor acertado de la conductividad equivalente de la arcilla, pero para definir las dimensiones adecuadas de la celda, es imprescindible el uso de software de elementos finitos.

De esta forma, la familia Termoarcilla ECO tiene tres geometrías básicas diferenciadas.



Modelo de celdillas rectangulares alineadas

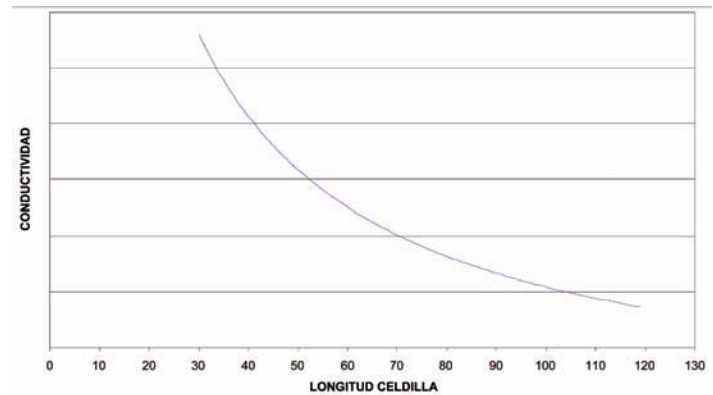


Flujo de calor del modelo de celdas alineadas

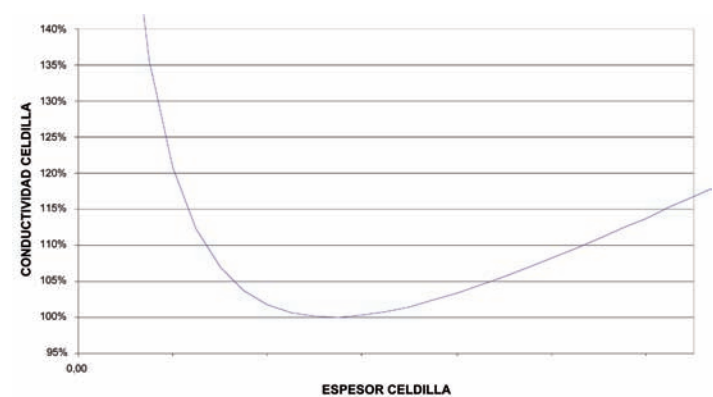
El primer modelo se basa en columnas de celdas alineadas. Es un modelo que favorece el proceso industrial, por lo que es más fácil reducir el espesor de tabiquillos interiores o alargar la celdilla, lo que a su vez, aumenta el aislamiento térmico del muro. En las imágenes expuestas, se aprecia un modelo tipo de celdillas rectangulares alineadas, y la transmisión de flujo de calor en su interior. Los colores rojizos indican el paso de un mayor flujo, y los colores azulados el paso de un menor flujo de calor.

En la primera gráfica expuesta, se puede comprobar la influencia que tiene la longitud y el espesor de la celdilla en la conductividad térmica equivalente del aire. En la segunda, referente al espesor de la celdilla, hay que observar que el óptimo depende de varios factores, principalmente de la conductividad térmica de la arcilla y del espesor de tabiquillo interior. Hay que señalar que estas gráficas son, por lo tanto, indicadores de tendencia, y que los valores concretos vienen definidos en cada caso por las características propias del bloque.

Con estos parámetros, el valor final de conductividad térmica de la pieza puede resultar muy bajo, con valores en torno a $0,14 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ que pueden ser mucho menores si la arcilla y las características finales de la pieza. Con este tipo de bloque se cumplen los requisitos más exigentes del CTE en materia de aislamiento térmico de cerramientos, con los espesores de muro habituales. Es importante volver a destacar, sin embargo, que, cada pieza tendrá sus propias características, y que el valor final de aislamiento del muro depende también de los morteros de agarre y los revestimientos utilizados.



Relación Conductividad térmica celdilla – Longitud de celdilla

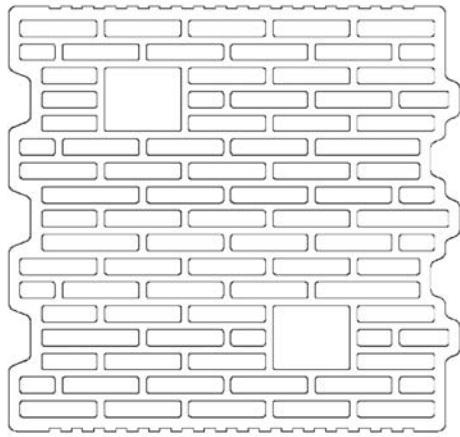


Relación Conductividad térmica celdilla – Espesor de celdilla

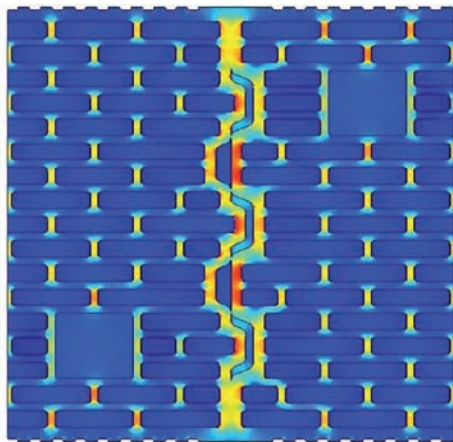
La segunda familia se basa en celdas rectangulares dispuestas al trespelillo. Esta disposición es más exigente desde el punto de vista de fabricación, pero, a cambio, a igualdad de características (conductividad térmica de arcilla, espesor de tabiquillos, etc.) es más beneficiosa desde el punto de vista térmico, ya que rompe los caminos de flujo de calor directo. En las siguientes imágenes observamos un modelo tipo de celdas rectangulares dispuestas al trespelillo, y el flujo de calor que lo atraviesa. Si lo comparamos con el modelo anterior, se puede observar como la interrupción de los tabiquillos transversales provoca una atenuación del flujo de calor a través de ellos. La elección de producir este tipo de modelo no es obvia, ya que es necesario ponderar si la mayor exigencia en la fabricación no va a permitir aprovechar otros factores como la disminución del espesor de tabiquillos interiores, o la mayor longitud de la celda.

Sin embargo, en los bloques Termoarcilla ECO en los que se han podido optimizar estas variables, la mejora térmica es apreciable. La conductividad térmica de la pieza baja por debajo de $0,13 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, aunque como en el caso anterior, en función del diseño del bloque, puede variar.

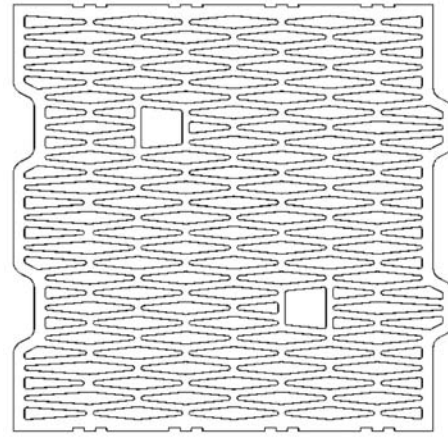
El tercer modelo es una evolución del anterior. La celda rectangular no es la mejor cavidad de aire posible a la hora de diseñar una geometría interior de arcilla. Este tipo de configuración requiere de un estudio muy delicado, puesto que no se pueden aplicar directamente fórmulas analíticas y hay que realizar sucesivas aproximaciones para poder llegar al óptimo. Las celdas de tipo romboidal o triangular dispuestas al trespelillo son muy adecuadas para realizar este tipo de perfeccionamiento, pero hallar sus



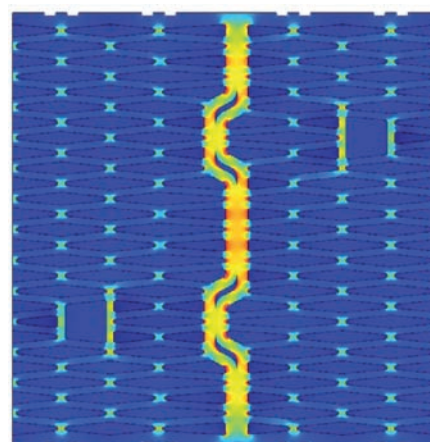
Modelo de celdas dispuestas al tresbolillo



Flujo de calor del modelo de celdas dispuestas al tresbolillo



Modelo de celdas romboidales



Flujo de calor del modelo de celdas romboidales

dimensiones adecuadas no es una labor sencilla. Sin embargo, la dificultad principal que nos encontramos con este tipo de bloque es el mismo que el anterior, el proceso de producción. La geometría requiere un proceso aún más riguroso que el anterior, fundamentalmente durante el proceso de extrusionado.

Sin embargo, los bloques fabricados de Termoarcilla ECO con esta tipología consiguen otro avance significativo en el aislamiento térmico. En condiciones internas similares a los dos modelos anteriores, este bloque tiene una conductividad térmica de pieza por debajo de 0,12 W/mK.

Observando la imagen del flujo de calor, se advierte la homogeneización alcanzada en el paso del flujo de calor. Con excepción de la parte del machihembrado, que necesariamente es la parte más débil de la pieza en cuanto a aislamiento, el diseño del bloque obliga a una distribución del flujo de calor en toda su extensión, eliminando cualquier leve puente térmico.

Esto maximiza la capacidad del bloque de aislar térmicamente, y además al repartir este aislamiento de manera muy homogénea, la distribución de temperatura también es muy homogénea, y se potencia el aprovechamiento de la masa del muro desde el punto de vista de la inercia térmica.

En cualquier caso, es necesario recalcar que el valor final de aislamiento de la pieza no depende de manera exclusiva del diseño en sí mismo, sino que hay que tener en cuenta que los espesores de tabiquillos y la conductividad de la arcilla tienen una fuerte influencia. Por este motivo no se puede

discernir a simple vista cual va a ser el aislamiento de una pieza determinada, y será necesario consultar el valor declarado.

Aislamiento final del muro:

Finalmente, hay que realizar una observación importante. El aislamiento final del muro va a depender del aislamiento de la pieza, pero no es el mismo valor de conductividad de la pieza. El muro se monta con pasta de agarre, que tiene influencia en el valor de la transmitancia térmica. Por este motivo, si se quiere potenciar más el aislamiento final del muro se pueden utilizar morteros y revestimientos aislantes sin variar el concepto del sistema.

CONCLUSIONES

En el actual marco del sector de la edificación, donde el CTE ya está vigente, y los estándares de calidad son cada vez más altos, el bloque cerámico tiene mucho que aportar.

Termoarcilla ECO es la conclusión de un periodo de investigación largo y denso, cuyo objetivo era conseguir un producto muy satisfactorio con las nuevas exigencias que demanda la arquitectura moderna. Es una herramienta que une, de una manera muy efectiva, la construcción de viviendas con criterios de edificación sostenible y ahorro energético, con la practicidad y coste de la vivienda residencial tradicional.

El bloque cerámico de altas prestaciones se convierte en un instrumento polivalente, muy adaptable a las variadas tipologías de edificación actuales.