

# La inercia térmica de los edificios y su incidencia en las condiciones de confort como refuerzo de los aportes solares de carácter pasivo

J.A. Turégano, M.A. Hernández, F. García (Grupo Energía y Edificación)

Dpto. de Ingeniería Mecánica, Universidad de Zaragoza. jat@unizar.es

## 1.- Introducción

Con toda seguridad y en más de una ocasión, todos nosotros hemos experimentado una sensación de frescura agradable al traspasar, en una pesada tarde veraniega, el umbral de una casa solariega o de una ermita y penetrar en su interior umbrío protegido por espesos muros de piedra. En este caso el ambiente agradable, incluso fresco, es la consecuencia de superponer la respuesta de un edificio con una gran masa térmica, capaz de redistribuir las más bajas temperaturas nocturnas con las más elevadas de las caliginosas horas de feroz insolación. Todo ello superpuesto con un efecto de escasa captación de la radiación solar. En esencia, es la consecuencia de la ausencia de aportes y de que el edificio se encarga de "promediar" las temperaturas de la evolución diaria dando lugar a una temperatura casi constante en su interior igual o inferior a la media de la temperatura externa en ausencia de otros aportes. Además, con una humedad adecuada el efecto resultante caerá dentro del espacio de confort que un porcentaje superior al 90% de la población considera agradable (Fig. 1).

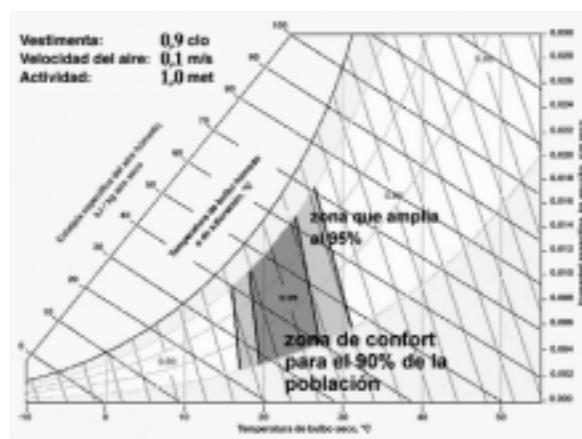


Fig. 1.- Diagrama psicrométrico con definición de zona de confort para condiciones típicas en una vivienda.

Las paredes de la envolvente refuerzan la sensación de confort proporcionando un equilibrio natural con la temperatura del aire ambiente. Como comentaremos más adelante, este equilibrio radiativo que supone para la persona ocupante un intercambio homogéneo y reducido de energía radiante con la envolvente es una condición clave del confort y es un resultado natural de los edificios con elevada inercia térmica cuando la temperatura interior de los cerramientos se aproxima a los veinte grados. Por así decirlo, las paredes se convierten en un radiador, o mejor en un intercambiador con el contenido, que dará o recibirá energía en función de la temperatura relativa de uno y otro. El efecto es el contrario al que recibimos en un espacio similar, en pleno invierno, y con un fuego de chimenea como único foco emisor. El desequilibrio entre una pequeña fuente radiativa y el resto de las superficies del entorno produce una clara sensación de desconfort, sensación que es frecuente aunque con menor intensidad con dispositivos de intercambio de reducidas dimensiones a poco que la temperatura de las paredes sea diferente de la del aire ambiente.

Lo anterior plantea varias cuestiones en relación con las variables físicas que definen el comportamiento señalado y con la aparente contraposición en el comportamiento agradable en verano y el descrito para el invierno y con el papel de la energía solar incidente. Intentaremos ir respondiendo a estas cuestiones en lo que sigue.

### 1.1 Algunas definiciones

Supongamos que un espacio determinado está cerrado por paredes físicamente distinguibles pero sumamente delgadas. La intuición nos dice que un cerramiento de esta suerte no ofrecerá apenas protección alguna respecto de las condiciones ambientales externas y, en ausencia de aportes auxiliares, la temperatura interior reflejará las variaciones de la temperatura exterior sin matizaciones. La energía necesaria para mantener condiciones de confort será muy superior al caso de un cerramiento en el que hayamos añadido unos centímetros de material aislante.

Este comportamiento es la consecuencia de la capacidad aislante del cerramiento respecto de los flujos de calor a través del mismo. Identificamos esto como la resistencia al flujo de calor, y lo medimos para un material homogéneo de espesor  $e$  mediante el concepto de la conductividad  $\lambda$ .

El **coeficiente de conductividad**  $\lambda$  se define como la cantidad de energía que atraviesa una superficie de  $1 \text{ m}^2$  y un  $\text{m}$  de espesor cuando las temperaturas a ambos lados difieren en un  $^{\circ}\text{C}$ . Sus unidades en el SI serán el  $\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$  que equivale a  $0,86 \text{ kcal}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$ .

Para un cerramiento compuesto por capas paralelas podemos hablar de la resistencia global que equivaldrá, para esta configuración, a la suma de las resistencias debidas a cada capa, dependiendo éstas de su espesor y de su conductividad. El efecto combinado queda recogido por el denominado **coeficiente de transmisión térmica de un cerramiento, K**, que es la cantidad de calor que pasa por un  $\text{m}^2$  del cerramiento cuando las temperaturas a ambos lados difieren en  $1^{\circ}\text{C}$ . Sus unidades:  $\text{W}/\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ .

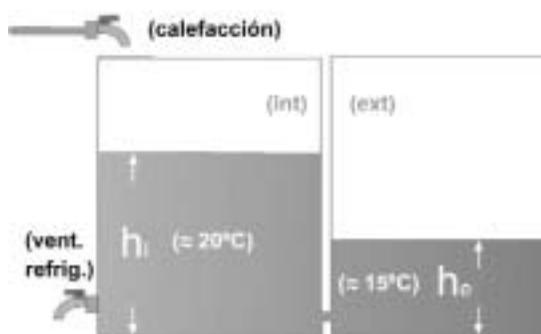


Fig. 2.1

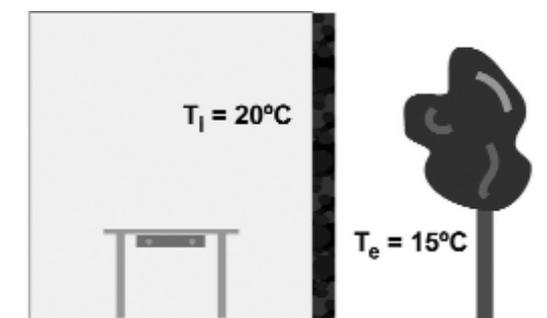


Fig. 2.2

Cuanto mayor es este  $K$  más rápido se transfiere el calor a través del cerramiento. El símil que recoge la Fig. 2 nos ayudará a extender este comportamiento a otras situaciones. En dicha figura, 2.1, tenemos dos recipientes con diferentes alturas de líquido en su interior y comunicados por un conducto. El ritmo de líquido que atravesará el conducto es función de la diferencia de alturas (equivalente a la diferencia de temperaturas, Fig. 2.2) y de las características del tubo –rugosidad, longitud, sección-, en forma simplificada: del diámetro del tubo, cuyo equivalente en Fig. 2.2 será el valor de  $K$ . Conviene insistir en la idea anterior. Cuando hablamos de ritmo o velocidad a la que el líquido pasará de un recipiente a otro, nos referimos en el símil a la idea de que la conductividad  $\lambda$ , en definitiva  $K$ , reflejan la velocidad de transferencia del flujo de calor de un lado del cerramiento al otro. Así, sea grande o pequeño el valor de  $K$ , ambos lados acabarán alcanzando la misma temperatura. La diferencia estará en el tiempo necesario para ello o en el ritmo del aporte que compense la transferencia, si hay una fuente auxiliar para compensar las pérdidas o ganancias (calefacción o ventilación/refrigeración).

Así, si en invierno queremos mantener la temperatura del interior (altura del depósito  $a$ ) pese a la transferencia de calor al exterior (trasvase al depósito  $b$ ) debido a la menor temperatura exterior (menor altura del líquido en  $b$ ) tendremos que aportar energía (líquido) que compense las pérdidas. Si estamos en verano y queremos mantener una temperatura interior por debajo de la más elevada del exterior tendremos que ingeniarlas para “vaciar” el depósito  $a$  compensando el flujo desde  $b$  (exterior).

Podemos preguntarnos ahora si todos los cerramientos con el mismo  $K$  se comportarán igual desde el punto de vista de pérdidas y velocidad de las mismas. La respuesta es afirmativa con lo dicho hasta ahora. Sin embargo hay algo más que esa velocidad y que no debemos olvidar.

Consideremos ahora dos cerramientos claramente diferenciados en cuanto al material pero con un espesor apropiado cada uno de ellos, de modo que ambos tengan el mismo valor de  $K$ , por ejemplo  $0,7 \text{ W}/\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ . El primero está constituido por un buen aislante ( $\lambda = 0,027$ , densidad  $50 \text{ kg}/\text{m}^3$ ) y el otro es un muro macizo de hormigón ( $\lambda = 0,9$ , densidad  $1700 \text{ kg}/\text{m}^3$ ). Su equivalente en el símil utilizado antes, para ambos casos, será el recogido en la Fig. 2.1 dado que tienen el mismo coeficiente  $K$ .

Por lo dicho hasta aquí, si estamos protegidos del exterior por uno u otro de modo que en el interior haya 20° C constantes por aportes auxiliares y en el exterior 15°C, tendremos un perfil de temperaturas en el interior del cerramiento con una pendiente constante –olvidando el pequeño efecto que provoca la convección en las superficies- desde 20°C hasta 15°C. El flujo de calor hacia el exterior tendrá el mismo valor: si el cerramiento al exterior tiene 12 m<sup>2</sup>, cada hora se perderán:

$$Q = K (W/m^2\text{°C}) \cdot A (m^2) \cdot (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}) (\text{°C}) \cdot 1 h = 0,7 \cdot 12 \cdot 5 \text{ Wh} = 42 \text{ Wh} \quad (1)$$

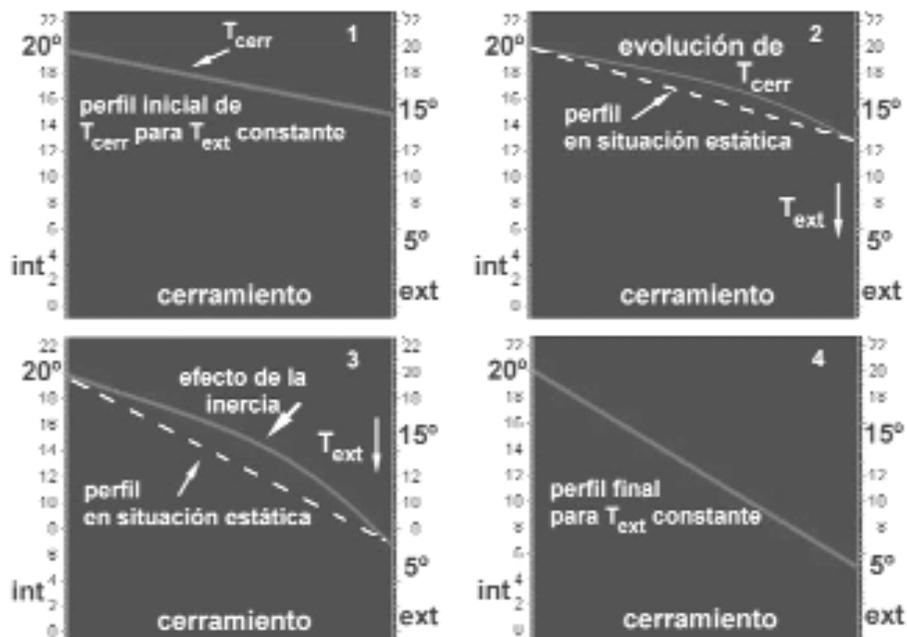


Fig. 3-1 a 3-4 .- Evolución de T en el interior de un cerramiento cuando varían las T del entorno

Hasta aquí no hay diferencias y ambos cerramientos son equivalentes. Sin embargo, si en el exterior empieza a bajar la temperatura, de modo que en varias horas alcance los 5°C, es posible apreciar ya las diferencias. En las Figs. 3-1 a 3-4 se recoge el perfil de temperaturas en ambos cerramientos, obtenido mediante simulación con el programa ATC para análisis y simulación del comportamiento térmico de cerramientos. Puede comprobarse que el perfil de temperaturas en el interior muestra lo que podríamos llamar un efecto tampón que se superpone al perfil de transferencias cuando las T en ambas caras del cerramiento se mantienen constantes. Este efecto es consecuencia de la capacidad de almacenar energía que tiene el cerramiento considerado. Esta capacidad es proporcional a la masa del cerramiento y al calor específico del material. Así, las propiedades a considerar, en relación con este efecto, serán la densidad, que para un volumen dado es determinante de la masa, y el calor específico que determina cuanta energía acumula un material por kg y °C. Para los materiales de la Fig.3, al aislante le corresponde un c<sub>p</sub> de 1,2 kJ/kg·K, y al hormigón un c<sub>p</sub> de 0,8 kJ/kg·K. Vemos que el segundo tiene una capacidad de almacenamiento varias decenas mayor que el primero para una misma capacidad aislante.

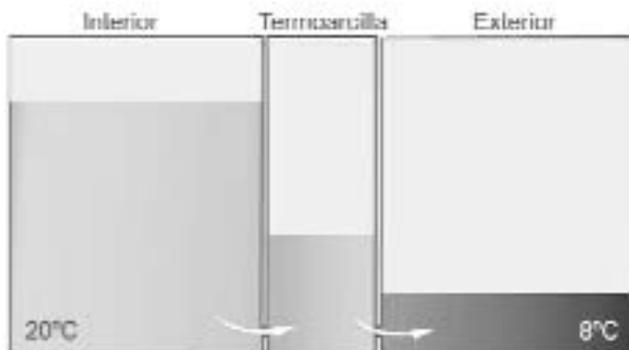


Fig. 4.- El cerramiento y su capacidad de almacenar energía.

## 2. La inercia de un cerramiento

### 2.1 Definición y efectos ante perturbaciones en una de sus caras o en ambas

Para entender bien las implicaciones de lo anterior volveremos al ejemplo de vasos comunicantes antes utilizado. A las dos cámaras representando el ambiente interior del cerramiento y el exterior, deberemos añadir ahora el efecto de acumulación del cerramiento definido arriba. Es lo que recoge la Fig. 4., para un cerramiento de Termoarcilla, material que combina, por su estructura de alvéolos y su composición, un buen nivel de aislamiento distribuido muy homogéneamente que se combina con masa con elevada inercia. Si es en este caso estudiamos una situación de cambio, situación dinámica, como supone que la temperatura exterior fluctúe entre un valor máximo y un mínimo, que es la situación habitual de variación diaria de la temperatura ambiente.

El efecto es la combinación de diferentes ritmos: por un lado está la rapidez con la que cambia la  $T_{ext}$  y por otro la rapidez de trasvase de energía entre un "depósito" (el recinto interior) y otro (el exterior), todo ello modulado por el efecto de llenado-vaciado del depósito intermedio (el cerramiento). En estos ritmos intervienen varios coeficientes: la conductividad del cerramiento: a mayor valor se producirá una tendencia más fuerte al equilibrio entre niveles en los tres recintos. Además está la capacidad del recinto intermedio: cuanto mayor sea ésta mayor será el efecto de distorsión en el ritmo de transferencia. Por así decir, a la fuente que cede calor, por ej. el recinto interior, le costará más o menos tiempo transferir energía al exterior en función de las condiciones previas del cerramiento. Por lo mismo, en esa transferencia se podrá ver ayudada por la propia energía del cerramiento, si éste estaba lleno y, después, será el ambiente externo el quien ayudará a volver a llenar el cerramiento si sube su temperatura en forma apropiada. Es evidente que la situación real presenta un conjunto de posibilidades cuyo análisis teórico exige la resolución de ecuaciones de transferencia planteadas como función del tiempo, ecuaciones diferenciales, y no ecuaciones estáticas como la (1), válidas sólo para analizar comportamientos integrados en el tiempo, comportamientos promediado.

Todo esto queda reflejado de forma más apropiada en la Fig. 5 que recoge el efecto del cerramiento distribuido en una combinación de vasos comunicantes. En función de la historia precedente de distribución de temperaturas en el cerramiento y de la evolución de temperaturas interior-exterior pueden encontrarse distribuciones tan variadas como recogen las figs. 5-1 a 5-4 siendo su efecto acumulativo diverso en función de los valores de  $K$  y de inercia térmica así como del comportamiento de pérdidas (o ganancias si estamos en verano) en el resto de cerramientos.

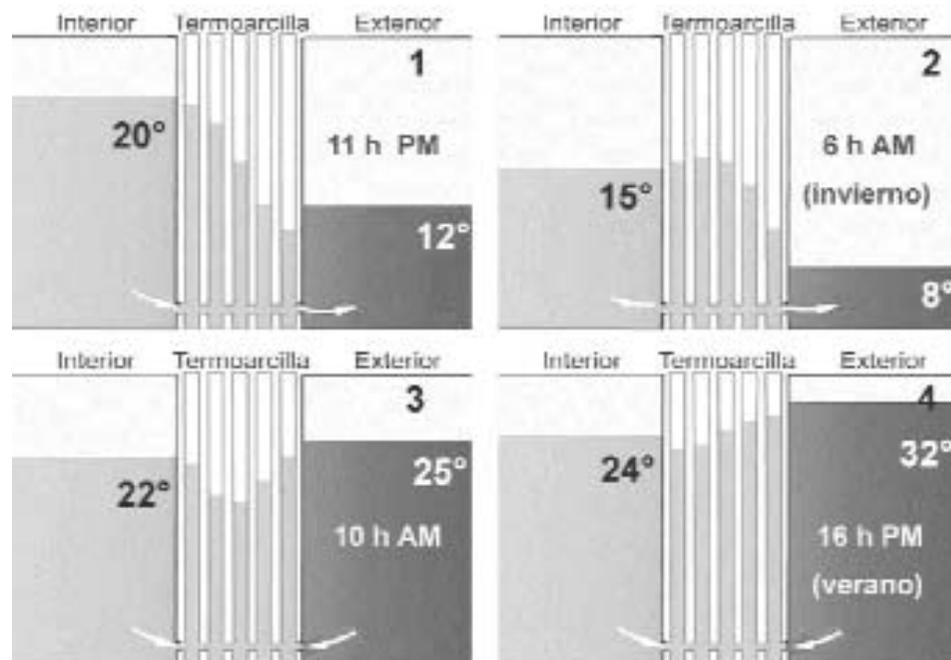


Fig. 5-1 a 5-4.- Diferentes situaciones en función del perfil y evolución de T a ambos lados de un cerramiento con elevada masa térmica.

A modo de resumen, en un cerramiento son magnitudes importantes el coeficiente K que mide el mayor o menor ritmo de transferencia de calor a través del mismo y que es proporcional a la diferencia de temperaturas que el cerramiento percibe entre sus caras, y su masa térmica (combinación de masa y calor específico medio), que identifica la capacidad de modular el mecanismo de transferencia de calor modificando la temperatura efectiva que percibe cada una de las caras del cerramiento.



Fig. 6 - Efectos de la señal interior según la inercia del cerramiento

La manera de medir este comportamiento es mediante dos parámetros relacionados con la transferencia de calor a través del cerramiento cuando en el exterior tenemos una señal de carácter variable como muestra la Fig. 6 que recoge el comportamiento de un muro ligero frente a uno pesado. Cuando se combinan señales variables en el interior y en el exterior que no corresponden a variaciones más o menos sinusoidales tenemos resultados en los que el muro puede ser emisor o receptor simultáneamente de las dos zonas que separa.

Nos queda ahora considerar cómo afecta añadir aislamiento a un muro con capacidad de acumulación que es la situación más frecuente pues, en principio, la casi totalidad de cerramientos tienen una configuración multicapa de modo que alguna(s) de las capa(s) tienen una cierta capacidad de acumulación y otras asumen el peso de reducir el coeficiente K del conjunto. La Fig. 7 remite el análisis al símil manejado hasta ahora. Con él, la posición del aislamiento viene reflejada por la mayor resistencia al flujo de líquido (calor) que supone el tubo más alargado y estrecho. Hemos elegido dos configuraciones extremas en el sentido de que el aislamiento se ubica en una u otra de las caras del cerramiento.

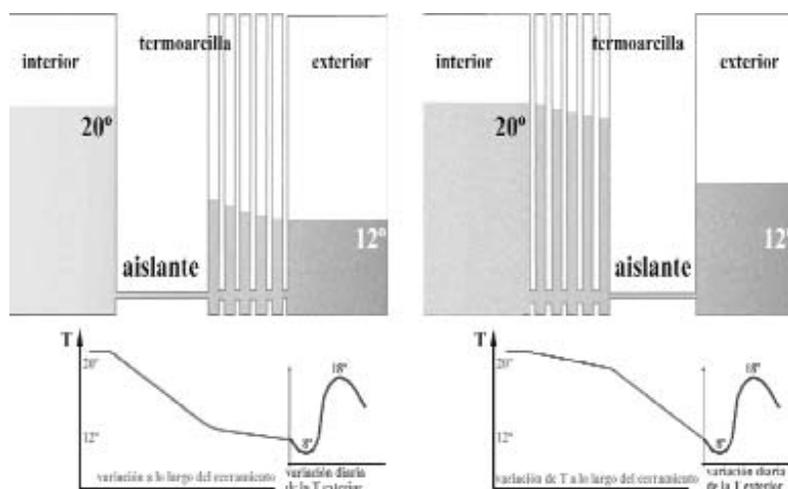


Fig. 7.- Comportamiento en función de la ordenación de capas en un cerramiento

Veremos luego la importancia del comportamiento que refleja la Fig. 7. Procede ahora analizar los resultados experimentales obtenidos tanto en viviendas con un funcionamiento definido por usuarios con perfiles y hábitos diferentes y los obtenidos en células de laboratorio en las que es posible definir y controlar las condiciones internas del habitáculo.

## 2.2 Amortiguamiento y desfase: el caso de la Termoarcilla. Medidas experimentales realizadas en células de laboratorio

Como hemos analizado antes, en un cerramiento sometido a las condiciones ambientales (radiación solar, temperatura y viento) se produce una transferencia de energía en régimen dinámico, produciéndose un retraso a la vez que un amortiguamiento de la onda de temperatura que penetra desde el exterior hacia el interior.

Este fenómeno de retraso se aprecia en mayor grado en verano sobre todo en fachadas expuestas a una elevada captación solar, siendo interesante que el pico de máxima temperatura que llega al interior del edificio presente un desfase suficiente como para poder ventilar nocturnamente la vivienda y no notar el momento de máxima transferencia de energía al interior.

Para analizar el comportamiento térmico de un muro de alta inercia (Termoarcilla 29 cm) y otro de baja inercia se han construido dos células laboratorio, que se han ubicado en una zona próxima al Centro Politécnico Superior de Ingenieros de Zaragoza, carente de sombreado. En la Fig. 8 se incluye una fotografía de las células con el aspecto final.

El objetivo de las mediciones realizadas pretende obtener la caracterización dinámica de ambos muros (retardo y atenuación).

Las células tienen forma prismática, con unas dimensiones exteriores de 2,2 x 1,8 x 2,5 m (anchura, profundidad, altura). De los seis lados con que cuenta, cinco de ellos están constituidos por un cerramiento de 16 cm de poliestireno expandido tipo II recubierto con dos capas metálicas protectoras.

Los dos muros analizados se han construido en la fachada sur de las células, estando constituidos por los siguientes materiales (de interior a exterior):

### Termoarcilla 29

0.01	'Enlucido yeso'
0.29	'Bloque Termoarcilla 29'
0.02	'Mortero cemento'

**Tabla 1. Composición por capas del cerramiento de Termoarcilla de 29 cm.**

### Doble hoja equivalente

0.01	'Enlucido yeso'
0.04	'Ladrillo hueco cerámico'
0.01	'Cámara de aire'
0.04	'Poliestireno expandido tipo II'
0.04	'Cámara de aire'
0.115	'Ladrillo perforado cerámico'
0.02	'Mortero cemento'

**Tabla 2. Composición por capas del cerramiento de doble hoja.**

Para analizar la transmisión de energía se han colocado a diferente profundidad sondas de temperatura protegidas con vainas metálicas entre las capas que lo constituyen y un fluxómetro superficial interior en cada muro.



Fig. 8. Aspecto externo de las células, con el muro de Termoarcilla en la derecha, con el muro de doble hoja en la izquierda.

### 2.3 Transferencia estática y dinámica

Para caracterizar un cerramiento se emplea habitualmente el valor de su coeficiente de conducción (K) en régimen estático, sin embargo el cerramiento se le somete a condiciones dinámicas.

A continuación se muestran los resultados de diferentes ensayos que han permitido obtener los coeficientes de transmisión, verificar la alta inercia térmica del muro de Termoarcilla y la mejora del confort interior que se obtendría en una vivienda con esta tipología de cerramiento.

Con calefacción intermitente con el cerramiento de Termoarcilla se crean condiciones de mayor confort respecto al cerramiento de doble hoja, al producirse en el muro de Termoarcilla menores variaciones de la temperatura superficial interior.

En la Fig. 10, se muestran los resultados de una semana de calefacción intermitente en la que se comprueba como por las noches las temperaturas superficiales interiores son superiores para el muro de Termoarcilla. La diferencia media máxima de las temperaturas superficiales es de 3,0° C con una desviación típica de 0,5° C, mientras que para todo el periodo (diurno y nocturno) de calefacción intermitente la diferencia media de la temperatura superficial ha sido de 0,4° C. La diferencia de temperaturas es máxima antes de que se produzca el encendido de la calefacción.

Con la Termoarcilla se produce mayor confort térmico por la noche, tanto por la mayor temperatura radiativa del cerramiento como por la temperatura ambiental de la célula. Una ligera desventaja que presenta la Termoarcilla es que, cuando se enciende la calefacción, necesita un intervalo de tiempo mayor para acercarse a la temperatura interior de la célula debido a su mayor inercia.

Si se fija como condición de estudio el retraso de tiempo en alcanzar una temperatura superficial interior un grado inferior respecto a la termostática de la célula, en la monitorización realizada, se han obtenido valores medios de retraso de 1,8 horas, valor que se confirma al analizar el amortiguamiento y el desfase de los cerramientos, como se mostrará posteriormente. Estos detalles se pueden verificar en la Fig. 11, en la que se muestra tan sólo un día de monitorización con calefacción intermitente.



Fig. 9. Detalle de la colocación de las sondas de temperatura en las diferentes capas de registro.

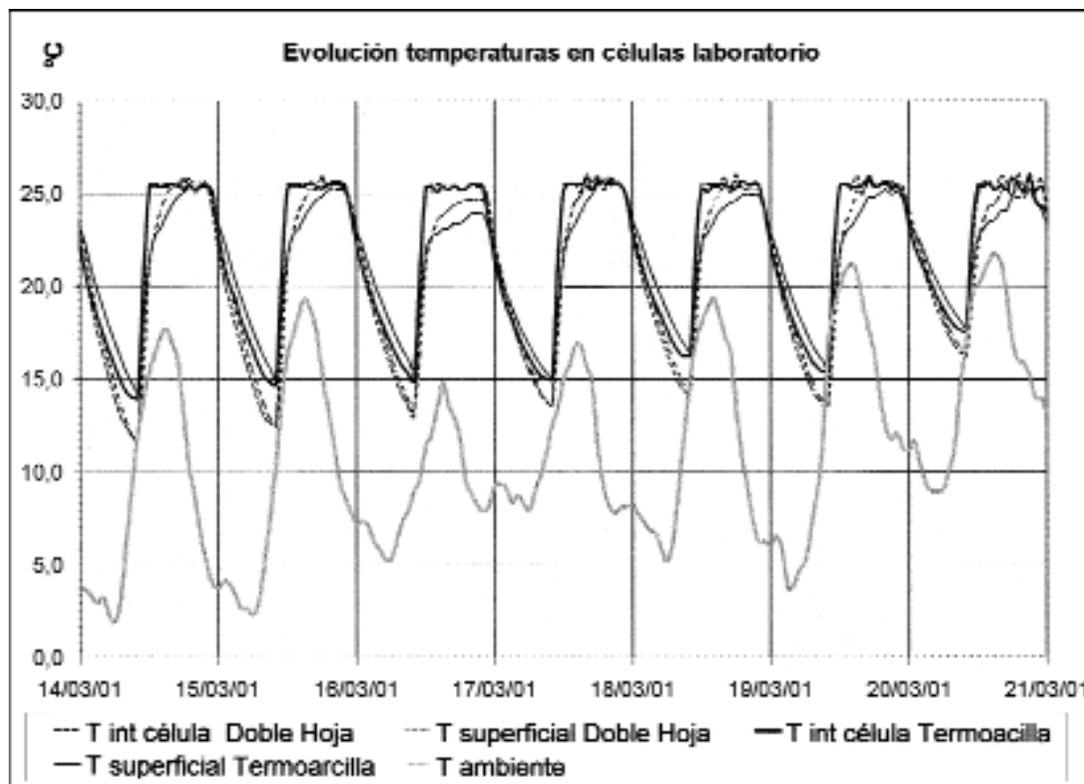
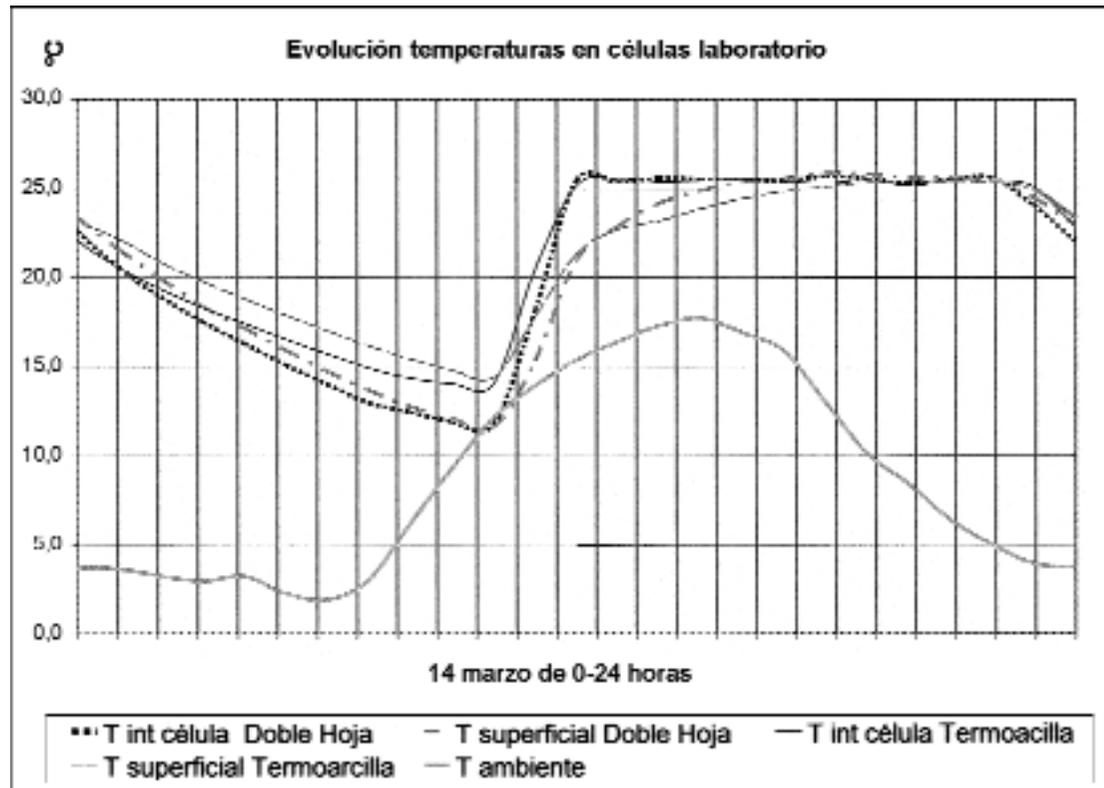


Fig. 10. Evolución semanal con calefacción intermitente (10 a 22 horas) de las temperaturas superficiales interiores de los dos cerramientos y de las temperaturas interiores de las células.

Fig. 11. Evolución diaria con calefacción intermitente (10 a 22 horas) de las temperaturas superficiales interiores de los dos cerramientos y de las temperaturas interiores de las células.



Como confirmación de los resultados de consumo experimentales para diferentes periodos y uso, se han generado para los cerramientos de las células (doble hoja  $0,51 \text{ W/m}^2\text{K}$  y Termoarcilla  $0,77 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) varios modelos de simulación de las células con la aplicación de cálculo dinámico TSBI3 del Danish Building Research Institute, obteniéndose valores de consumo ligeramente inferiores a los experimentales pero que permiten concluir también que la inercia no modifica el consumo de calefacción en régimen continuo.

Este consumo ligeramente inferior es debido, según Lomas K.J. et al (1997), a que los programas de simulación calculan con flujo de energía perpendicular a los cerramientos, no teniendo en cuenta las pérdidas en las aristas, que son más conductoras. El análisis experimental confirma que la inercia con calefacción continua no mejora apreciablemente el comportamiento ni de consumos ni de temperaturas radiantes ni ambientales. El artículo de Demirbilek F.N et al (1996) corrobora el resultado obtenido experimentalmente en las células.

Otra comprobación de este resultado aparece en el libro de Fundamentos Técnicos de la CEV (1999), los autores plantean que la variación del comportamiento de un cerramiento con inercia interior es muy pequeña para climas fríos, (Zaragoza entraría en esta clasificación), mientras que para climas cálidos (Málaga, Sevilla, etc) para muros con orientación S, SE y SO las pérdidas a través del cerramiento pueden ser hasta un 10% inferiores.

Para el caso de verano analizado en la anterior referencia, los autores manifiestan que la inercia muestra menos ahorros energéticos, despreciándose el efecto de la inercia térmica. Este resultado teórico corresponde a un análisis en que las condiciones internas toman valores más restrictivos que los que pueden considerarse como confortables para el 90% de la población. Los resultados indican por el contrario que, desde el punto de vista del confort, la anterior aseveración no se cumple por cuanto el enfriamiento nocturno aprovechado por la inercia térmica puede contribuir a que las condiciones de confort se mantengan sin soporte mecánico la mayor parte del día o incluso todo él.

La potencia máxima que el sistema auxiliar tiene que suministrar en la célula de Termoarcilla es un 17,1% inferior, existiendo además un desfase de cerca de dos horas entre los instantes de potencia máxima en ambas células. El artículo de Demirbilek F.N et al (1996) vuelve a corroborar este hecho, que aparece al tener mayor inercia un cerramiento.

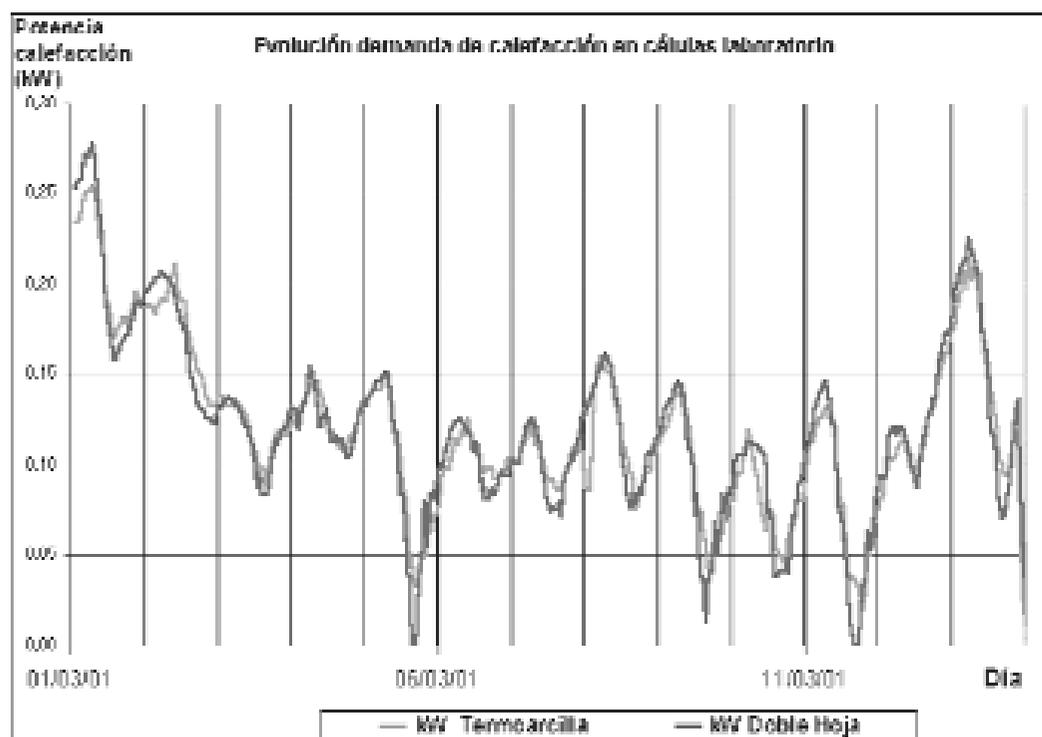


Fig. 12. Evolución diaria de la potencia con calefacción continua para las células con muro de Termoarcilla y con doble hoja.

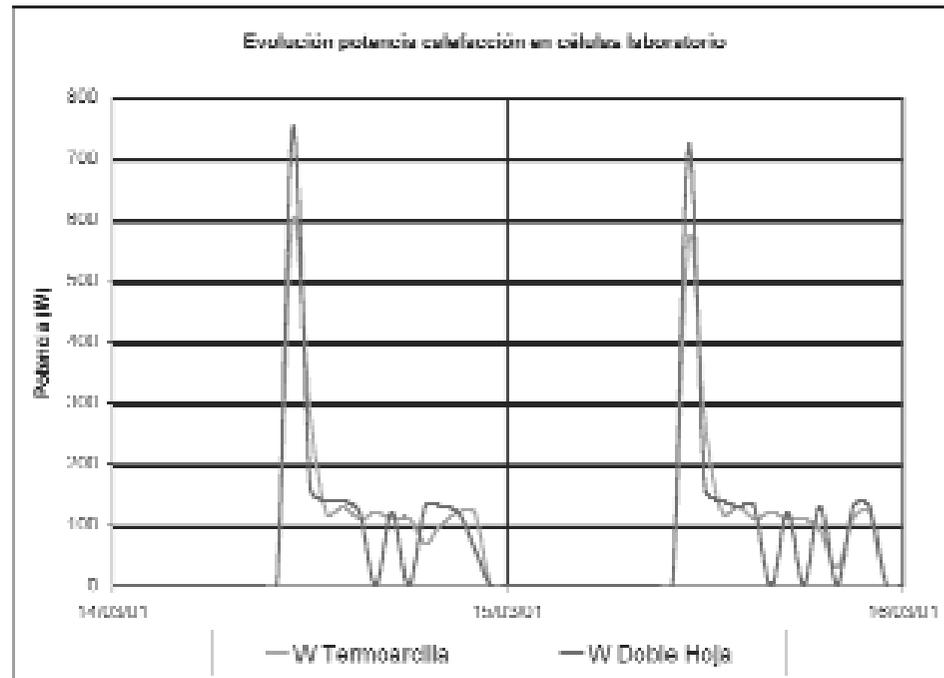
Si se analiza la transferencia de energía sólo de los muros, la necesidad máxima se produce en el cerramiento de Termoarcilla que tiene un coeficiente de pérdidas de conducción un 33,3% superior. Si en vez de tener un muro de doble hoja de  $K=0,51 \text{ W/m}^2\text{K}$ , éste tuviera un  $K=0,77 \text{ W/m}^2\text{K}$ , se podría comparar la potencia máxima de pérdidas entre este último y el cerramiento de Termoarcilla. Este análisis, forzosamente teórico, se ha realizado para los ensayos practicados en el periodo 23 a 29 de abril del 2002, aumentando un 36% las pérdidas del muro de doble hoja, obteniéndose como conclusión que el muro de doble hoja equivalente al de Termoarcilla necesitaría una potencia superior con un valor similar al obtenido en el ensayo de consumo de células realizado en la primera mitad de marzo de 2001, con valor medio de 17,1%.

En la Fig. 12 se muestra la menor amplitud de la potencia de calefacción para la célula con el muro de Termoarcilla (mayor inercia) y el desfase existentes obtenidos en el ensayo realizado entre el 1 al 13 de marzo del 2001. Un hecho importante, verificado en la experiencia, es que la potencia máxima necesaria en la célula de Termoarcilla es un 17,3% inferior, con una desviación típica de un 3%. Este resultado demuestra la mayor inercia del muro de Termoarcilla, ya que cuanto mayor es la inercia térmica menor es la potencia máxima necesaria auxiliar.

Conviene insistir en que este resultado puede considerarse aun más significativo si se comparan dos muros con coeficiente  $K$  similares y no con una diferencia de casi un 40% que corresponde a los valores experimentales, diferencia consecuencia de una limitación en la información de partida.

El efecto de la inercia sobre la potencia media consumida aparece recogida de manera explícita en la norma DIN 4701 (1983), en la que se plantea un aumento de la temperatura exterior de diseño a la hora de determinar la potencia del sistema auxiliar de calefacción cuanto mayor sea la inercia del edificio. La Fig. 13, muestra la evolución de la potencia de calefacción para varios días, comprobándose como es menor la potencia máxima para la célula de Termoarcilla.

Fig. 13. Evolución diaria de la potencia con calefacción intermitente (10 a 22 horas) para las células con muro de Termoarcilla y con doble hoja.



## 2.4 Comportamiento dinámico

Cuando un cerramiento se le somete a unas condiciones climáticas con oscilaciones de la temperatura exterior y de la radiación solar, la temperatura interior de la célula (o vivienda) sigue un comportamiento que es reflejo de las condiciones exteriores, modificadas por el operador térmico que es el propio muro.

Con elevada temperatura y radiación la temperatura exterior del cerramiento se eleva produciéndose un flujo de energía hacia el interior del muro. Si se gráfica la evolución de temperatura en la cara exterior del cerramiento se obtiene una onda caracterizada por una amplitud máxima y por un instante en el que se produce la temperatura máxima, que es función de la orientación del cerramiento.

Esta onda de temperatura atraviesa el muro y se va amortiguando en cuanto a amplitud, surgiendo además un desfase entre temperaturas máximas. El amortiguamiento de la onda se determina con la siguiente expresión.

$$\mu = \frac{A_{\text{sup\_int}}}{A_{\text{sup\_ext}}}$$

:  $\mu$  medida del amortiguamiento del cerramiento: a menor valor mayor es el amortiguamiento.

:  $A_{\text{sup\_int}}$  diferencia máxima de temperatura superficial interior de un cerramiento a lo largo de un día

:  $A_{\text{sup\_ext}}$  diferencia máxima de temperatura superficial exterior de un cerramiento a lo largo de un día

Un muro de gran espesor y construido con un material de alta densidad, tendrá una inercia elevada, frente por ejemplo a una pared con gran aislamiento y poca masa de material pétreo.

Cuanto mayor es la inercia de un cerramiento mayor es el desfase y más amortiguamiento de la onda se produce. La inercia está relacionada con el peso del cerramiento, ya que el calor específico de los materiales de construcción es similar, estando directamente relacionada con la densidad y el espesor de las capas que lo constituyen.

Cuanto mayor es el espesor del muro, mayor será el amortiguamiento y el desfase. Este proceso es más complejo, puesto que intervienen una serie de perturbaciones, como la radiación solar que entra en el interior a través de los huecos, la ventilación natural o cualquier fuente calor interna, que modifican la onda de temperatura interior del cerramiento con lo que distorsionan el valor de la amplitud superficial interior y el desfase característico del cerramiento.

En las células se puede estudiar el amortiguamiento y el desfase de los cerramientos, ya que no existen fuentes de perturbación como serían las ventanas o la ventilación. Si además se eliminan los aportes internos (calefacción o refrigeración) se pueden obtener los parámetros característicos. El ensayo de comprobación del amortiguamiento y el desfase se realizó en septiembre, dejando en evolución libre las dos células.

En la Fig. 14, se muestran las curvas de la evolución de temperaturas superficiales internas de los muros de Termoarcilla y de doble hoja, para las temperaturas externas se tiene similares curvas de temperatura ya que los dos muros presentan la misma absorción solar.

El cerramiento de Termoarcilla presenta mayor amortiguamiento que el de doble hoja (27,7% inferior), mientras que el desfase en el muro de Termoarcilla es superior (1,7 horas más). En la tabla 3 se muestran los valores obtenidos para ambos cerramientos.

Estos dos parámetros indican que el muro de Termoarcilla frente al de doble hoja es mejor desde el punto de vista térmico, realizando un mayor amortiguamiento frente a las oscilaciones exteriores a la vez que se retrasa el valor máximo de temperatura interior. Comprobándose por lo tanto su mayor inercia térmica.

	Célula Termoarcilla	Célula Doble Hoja
Amortiguamiento	0,211	0,292
Desfase (horas)	7,6	5,9

**Tabla 3. Valores característicos de los cerramientos experimentados.**

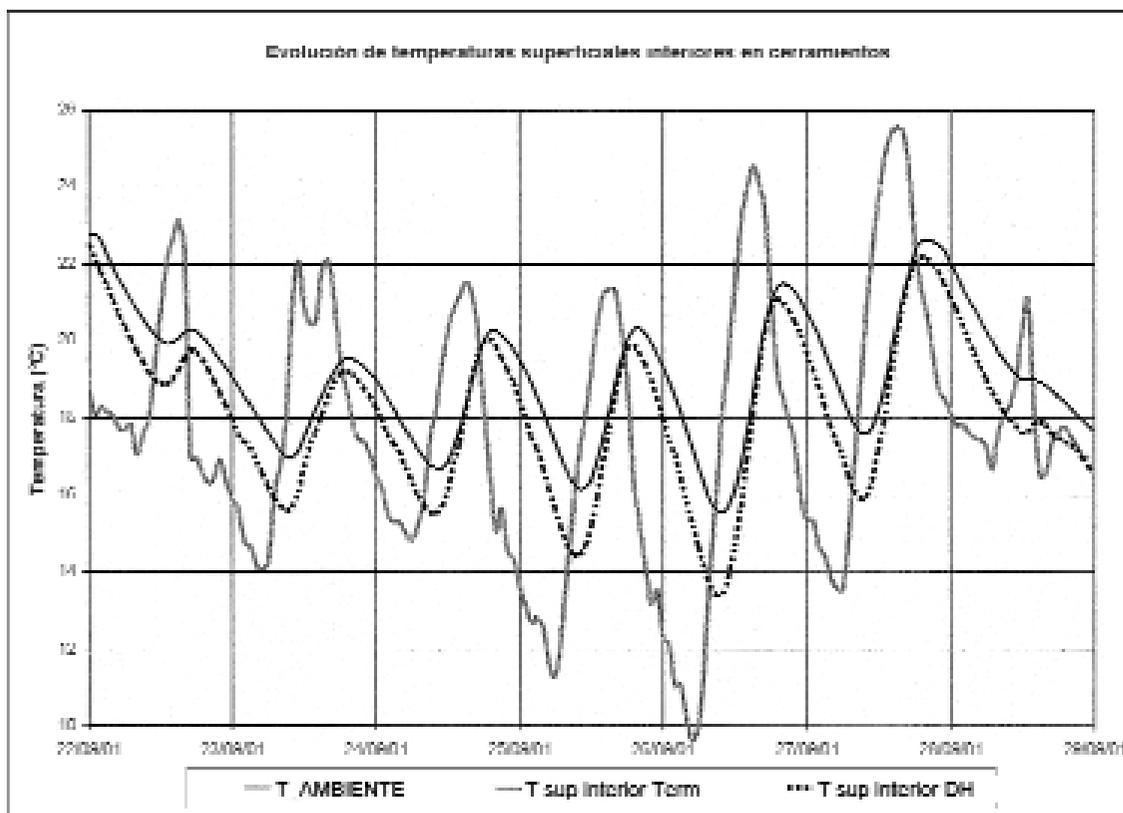


Fig. 14. Evolución de temperaturas superficiales interiores de los cerramientos de Termoarcilla y de doble hoja. Se visualiza el desfase y la diferente amplitud de cada cerramiento.



Fig. 15. Fachada sur de viviendas unifamiliares, parcela PU-9.



Fig. 16. Fachada sur de bloque viviendas, parcela P-11.



Fig. 17. Fachada sur de bloque viviendas, parcela P-4.

## 2.5 Análisis del comportamiento de diferentes cerramientos en viviendas con diseño bioclimático

En Residencial Parque Goya se han monitorizados diversos cerramientos con características constructivas diferentes, alguno de estos muros estaba constituido por bloques de Termoarcilla de diferentes espesores.

En las figuras siguientes se muestran los tres edificios monitorizados de la urbanización, en ellos se registraban las evoluciones de temperaturas de muros de las fachadas sur en contacto con el exterior y en muros de separación con galerías acristaladas.

En las viviendas se comenzó la monitorización permanente desde octubre de 2000, registrándose datos cada 10 minutos. En la tabla 7, se muestran los resultados de caracterización dinámica (amortiguamiento, desfase) de los cerramientos monitorizados, extraídos del periodo Febrero a Septiembre de 2001.

Composición por capas cerramientos	Conductividad teórica K (W/m <sup>2</sup> K)	Amortiguamiento	Desfase h)
Bloque Termoarcilla (19cm) con revoco de yeso y mortero cemento (Galerías edificio P-4)	0,88	0,332	5,1
Ladrillo caravista (11,5cm), poliestireno extrusionado (6cm), cámara aire (3cm), ladrillo hueco (4cm), baldosa cerámica alicatar (Exterior PU-9)	0,44	0,341	3,9
Bloque Termoarcilla (19cm), aislamiento exterior poliestireno expandido Tipo IV (4cm), revoco de yeso y mortero cemento (Exterior P-4 )	0,44	0,163	7,4
Bloque Termoarcilla (14cm), aislamiento exterior poliestireno expandido Tipo IV (6cm), revoco de yeso y mortero cemento (Exterior PU-9)	0,40	0,099	6,8

**Tabla 7. Valores característicos experimentales obtenidos de los cerramientos monitorizados en Residencial Parque Goya.**

Los resultados anteriores indican que los cerramientos con Termoarcilla y aislamiento exterior, presentan un amortiguamiento más acusado y un mayor desfase que un muro equivalente térmicamente (columnas 2, 3 y 4). La tabla muestra el buen comportamiento de estos muros de alta inercia, mejores desde el punto de vista de la transferencia dinámica de energía en los edificios.

## 2.6 Caracterización del comportamiento con elevada inercia térmica

Los efectos de la inercia térmica de los cerramientos que envuelven un habitat, superpuestos a otros aportes o cesiones de energía en el interior del mismo, pueden conducir a aprovechamientos optimizados como los recogidos arriba o a situaciones perjudiciales en función de la integración aislamiento-inercia térmica. Ya hemos señalado en el apartado anterior algunos resultados positivos. Señalaremos ahora algunos de las circunstancias negativas consecuencia de una mala comprensión del concepto.

Hemos visto que la ubicación de la inercia en el interior del cerramiento de modo que el aislamiento quede en el exterior tiene claras ventajas en cuanto a la potencia media de consumo, estabilidad de la temperatura interior y confort correspondiente.

Sin embargo hay circunstancias en las que no es conveniente esta caracterización de los cerramientos y que se corresponden con aquellos casos en los que se busca una rápida respuesta del sistema auxiliar energético o cuando se presentan variaciones muy importantes en el aporte de algunos términos del balance del edificio relativas al resto de los términos.

Un ejemplo del primer caso mencionado es el de viviendas de uso ocasional (fin de semana) en particular si el clima es frío. Una alta inercia de los muros puede implicar que cuando la temperatura superficial de éstos alcance un valor aceptable creando una envolvente de temperatura radiante positiva desde el punto de vista del confort se haya agotado el tiempo de estancia y la alta inercia sólo haya contribuido a un gasto extra de calentamiento de muros que volverán a enfriarse en el periodo desocupado subsiguiente.

Un segundo caso es el de espacios públicos con una elevada variabilidad en el índice de ocupación. En este caso, si la temperatura superficial de los muros con alta inercia debe contribuir al confort en el momento de baja ocupación, la inercia repercutirá en un consumo extra de eliminación de los excedentes energéticos aportados por el incremento del nº de personas, produciéndose la paradoja de que sea necesaria la refrigeración asistida aun en invierno. La situación será opuesta en verano donde los muros enfriados en la noche podrán contribuir a reducir la necesidad de esta refrigeración auxiliar. Sin embargo, el efecto invernal es altamente indeseable y el diseño deberá incorporar elementos que sepan aprovechar la inercia en ambos contextos.

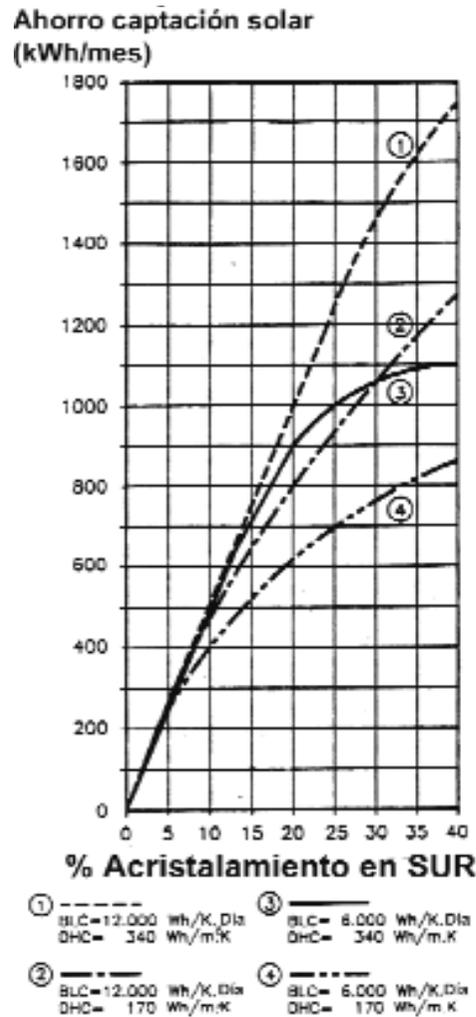


Figura 18. Ahorro solar útil frente al porcentaje de acristalamiento en una fachada sur con 4 tipos de edificio diferenciados por su aislamiento y su inercia térmica. (Fuente: Givoni B., 1991).

### 3 El comportamiento de un cerramiento de Termoarcilla como apoyo a los aportes de energía solar en una edificación

#### 3.1 Descripción de la filosofía

A mayor inercia térmica en el edificio mayor captación solar se podrá aprovechar sin sobrecalentamientos en las estancias. De modo similar, en el uso de calefacción intermitente, desconectada a lo largo de la noche, la temperatura interior desciende más lentamente.

Givoni B. (1991) analizó la capacidad útil de aprovechamiento solar que tiene un edificio en relación con su inercia térmica. Hay que tener en cuenta que el exceso de acristalamiento no conduce a mayores ahorros energéticos ya que se producen situaciones incómodas de sobrecalentamientos debiendo recurrir a la ventilación.

En la Fig. 18 se muestra el efecto combinado de la inercia y el aislamiento de un edificio respecto al porcentaje de acristalamiento en la fachada sur. El coeficiente BLC representa el coeficiente global de pérdidas del edificio por grado de temperatura (Wh/K día) y DHC es la energía que es capaz de almacenar el edificio por unidad de superficie durante el día y devolverla por la noche (Wh/m<sup>2</sup> día).

Las curvas de la figura muestran 4 casos diferentes en los que se ha combinado un mal coeficiente de pérdidas con la mayor capacidad (caso 1), con la menor capacidad (caso 2) y un edificio mejor aislado con capacidad alta (caso 3) y baja (caso 4).

En los edificios con mayor aislamiento (caso 3 y 4), conforme aumenta el área del acristalamiento saturan el ahorro solar de forma más significativa respecto a los casos de menos aislamiento.

Para que se produzca el máximo aprovechamiento solar y por lo tanto un elevado ahorro energético, es interesante construir los cerramientos con elevada inercia térmica, siendo un muro que presenta estas características el de Termoarcilla de 29 cm.

### Resultados en Barrio Goya

En los tres edificios de la urbanización Residencial Parque Goya de Zaragoza se ha realizado una actuación especial, mejorando respecto de otros edificios de la urbanización los niveles de aislamientos, captación solar, sistemas auxiliares, etc. El objetivo del proyecto era verificar lo adecuado de las medidas incorporadas y su viabilidad económica, pudiendo utilizarse estos resultados en futuras actuaciones tanto en urbanismo como para diseño de viviendas bioclimáticas.

En los tres edificios monitorizados se ha incluido calorímetros digitales para la medición del consumo energético de calefacción de las viviendas, aunque en principio sólo hacían falta en las viviendas a monitorizar.

En la tabla 8 se incluyen los consumos medios de los tres edificios del proyecto.

#### Consumos calefacción medios (kWh/m<sup>2</sup> año)

P-4 (98 viviendas)	20
P-11 (50 viviendas)	35
PU-9 (26 unifamiliares)	48

**Tabla 8. Resultados del consumo de calefacción unitario en los tres edificios del proyecto**

Para comparar el consumo de calefacción de los edificios de Barrio Goya se ha utilizado 542 viviendas de alta calidad de Zaragoza, que cuentan con instalaciones colectivas con contadores de consumo de calefacción individuales.

El consumo de calefacción anual medio por edificio es de 41 kWh/m<sup>2</sup> **superior** en un **63%** al consumo de los dos edificios de bloques de Barrio Goya (P-4 y P-11), con un consumo medio de 25 kWh/m<sup>2</sup>. Conviene precisar que este consumo se reduce aun más si eliminamos del cálculo las viviendas con nulo aprovechamiento solar debido a su orientación (norte con cuádruple crujía).

Los datos de consumo de estos edificios han sido facilitados por la empresa Viterra Energy Services, colaboradora en el proyecto Thermie 178/95 de Barrio Goya y las fotografías adjuntas muestran la tipología de alguno de los edificios de la comparación.



las fotografías adjuntas muestran la tipología de alguno de los edificios de la comparación.



#### 4. Bibliografía

- Dermirbilek F.N., Yener C., (1996). *A proposal for correction values for winter outdoor design temperatures*. Solar Energy vol 57, No 2, pp 111-116.
- Givoni B. (1991). *Characteristics, design implications and applicability of passive solar heating systems for buildings*. Solar Energy vol. 47 (6), pp 425-435.
- Lomas K.J., Eppel H., Martin C.J., Bloomfield D.P. (1997). *Empirical validation of building energy simulation programs*. Energy and Building vol. 26, pp. 253-275.
- Ministerio Fomento, IDAE (1999). *Fundamentos Técnicos de la Calificación Energética de Viviendas*. Ministerio de Fomento Centro de Publicaciones.
- Domínguez M., Herrera O., Álvarez I. (1985), *Resolución de la ecuación de transmisión de calor en muros multicapa, aplicando la impedancia térmica*. Publicación interna del Instituto del Frío. Madrid.
- Antonopoulos K.A., Tzivanidis C, (1995). Time constant of greek buildings. Energy. Vol 20, No 8, pp 789-802.
- Janssen J.E. (1982). ASHRAE Trans. 88, 713.
- Santamouris M. (1997). *Passive cooling of buildings*. Commission of the European Communities DG XVII.