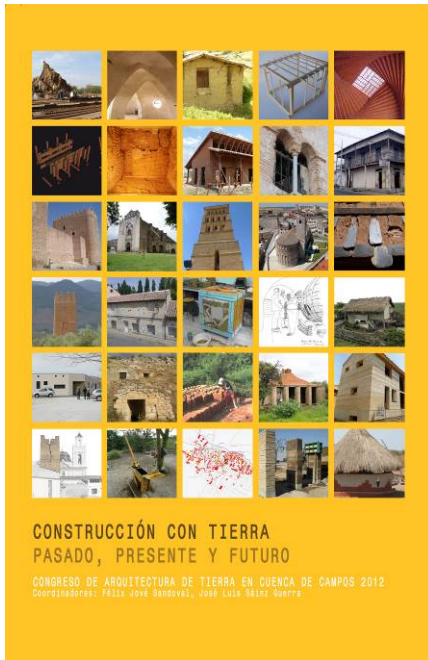




Construcción con Tierra Pasado, presente y futuro

Congreso de Arquitectura de Tierra en Cuenca de Campos 2012.

Coordinadores: Félix Jové Sandoval, José Luis Sáinz Guerra.

ISBN: 978-84-616-3485-9

D.L.: VA 257-2013

Impreso en España

Abril de 2013

Publicación online.

Para citar este artículo:

Cavero, D; Jové, F; "COMPORTAMIENTO TERMODINÁMICO DE MUROS DE BTC EN FUNCIÓN DEL CLIMA" En: *Construcción con tierra. Pasado, presente y futuro. Congreso de Arquitectura de tierra en Cuenca de Campos 2012*. [online]. Valladolid: Cátedra Juan de Villanueva. Universidad de Valladolid. 2013. P. 247-258. Disponible en internet: <http://www5.uva.es/grupotierra/publicaciones/digital/libro2013/24in-cavero.pdf>

URL de la publicación: <http://www5.uva.es/grupotierra/publicaciones.html>

Este artículo sólo puede ser utilizado para la investigación, la docencia y para fines privados de estudio. Cualquier reproducción parcial o total, redistribución, reventa, préstamo o concesión de licencias, la oferta sistemática o distribución en cualquier otra forma a cualquier persona está expresamente prohibida sin previa autorización por escrito del autor. El editor no se hace responsable de ninguna pérdida, acciones, demandas, procedimientos, costes o daños cualesquiera, causados o surgidos directa o indirectamente del uso de este material.

This article may be used for research, teaching and private study purposes. Any substantial or systematic reproduction, re-distribution, re-selling, loan or sub-licensing, systematic supply or distribution in any form to anyone is expressly forbidden. The publisher shall not be liable for any loss, actions, claims, proceedings, demand or costs or damages whatsoever or howsoever caused arising directly or indirectly in connection with or arising out of the use of this material.

Copyright © Todos los derechos reservados

© de los textos: sus autores.

© de las imágenes: sus autores o sus referencias.

COMPORTAMIENTO TERMODINÁMICO DE MUROS DE BTC EN FUNCIÓN DEL CLIMA

IX Congreso de Tierra en Cuenca de Campos, Valladolid, 2012

David Cavero, Arquitecto
Félix Jové, Dr. Arquitecto

Universidad de Valladolid. Escuela Técnica Superior de Arquitectura
Avda de Salamanca s/n 47014 Valladolid (Spain)
Tfno +34 983 423 428

e-mails: davidcavero@davidcavero.es, fjove@arq.uva.es

PALABRAS CLAVE: Transmitancia térmica, Inercia térmica, BTC

Resumen

La tierra como material de construcción parece tener cualidades idóneas para formar parte de la llamada arquitectura sostenible. Pero este concepto va mas allá de la mera utilización de materiales naturales o poco industrializados en los edificios, requiere además que los materiales que forman parte de esta arquitectura sean capaces de participar en las estrategias bioclimáticas del proyecto para reducir la demanda energética de los edificios en su fase de uso.

En este sentido, los bloques de tierra comprimida tienen la cualidad de ser naturales

e incorporar energía casi nula en su proceso de fabricación, no obstante, a la hora de evaluar la transferencia de calor a través del material, existe una gran dispersión de datos en la bibliografía acerca de sus características térmicas que hace difícil valorar su influencia en el consumo energético en la fase de uso del edificio.

Por ello se plantea una investigación en dos fases:

- Fase 1: Construcción y calibrado de caja térmica. Ensayos en laboratorio
- Fase 2: Simulación informática del comportamiento térmico del BTC

CONSTRUCCIÓN CON TIERRA.

En primer lugar se trata de obtener las características térmicas del material a través de ensayos en caja térmica calibrada diseñada a tal efecto conforme ISO 8990:1994 para, en una segunda fase, realizar a partir de los datos obtenidos simulaciones informáticas del comportamiento termodinámico de una “caja gris” situada en cada una de las zonas climáticas en las que la normativa divide la geografía española.

La comparación del muro de BTC con otras soluciones constructivas nos dará una idea de la importancia de la inercia térmica en función del clima y nos permitirá comprender la adaptación de la tierra a los climas en los que mayor incidencia tiene.

Ponencia

1.- Características térmicas de los bloques de tierra comprimida.

Para el caso de los bloques de tierra comprimida, las diferencias encontradas en la bibliografía en lo referente a sus características térmicas son lo suficientemente sustanciales como para no poder plantearse el uso de un valor tipo o un valor medio a la hora de hacer estudios del comportamiento térmico de estos materiales.

Si buscamos los valores térmicos de los bloques de tierra comprimida que aquí estudiaremos en la norma que regula sus características, la UNE-41410, esta se remite a una norma internacional UNE-EN 1745 Esta norma es aplicable a piezas de albañilería cerámica y de hormigón y a piedra natural, pero no se encuentra ninguna referencia explícita a las fábricas de tierra cruda. No obstante, en el caso de no hacer uso de las tablas contenidas en los anexos de la propia norma UNE-EN 1745, esta se remite a los documentos normativos en los que se encuentran recogidos los procedimientos experimentales para la obtención de las propiedades térmicas de los materiales.

El proyectista que opte por utilizar las características térmicas recogidas en el Catálogo de Elementos Constructivos del CTE, para bloques de tierra comprimida, se encontrará con un único epígrafe en el que se engloban junto con el BTC, los muros de tierra apisonada y adobes, materiales estos realizados también con tierra cruda pero de composiciones y naturaleza muy diferentes. El valor dado para la

conductividad de todos estos materiales es de $1,1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. Por otra parte, el valor del calor específico, que definirá la capacidad de acumulación de calor de estos materiales, no se proporciona en CTE, aunque sí aparecerá en las bases de datos que hacen uso de este documento en los programas de referencia para el cálculo de la demanda energética de los edificios, los cuales supondrán una capacidad calorífica igual para todos los materiales de tierra cruda; $1.000 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$, capacidad ésta idéntica a la supuesta para piezas cerámicas y hormigones, yesos y derivados.

En otras normativas como la DIN-4108-4, mantienen una relación lineal entre la densidad de las piezas de albañilería y su resistencia térmica, situándose esta entre $0,6$ y $1,2 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ para condiciones de humedad en torno al 75%, y hasta un 60% menores en materiales completamente secos.

En el caso de consultar los valores requeridos para establecer el comportamiento térmico de los BTC en la documentación facilitada por el Instituto de Arquitectura en Tierra de la UNESCO, observaremos una distinción entre dos clases de bloques; los tipo A, de mayor resistencia mecánica y una conductividad entre $0,46$ y $0,81 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, y los tipo B, de menos resistencia con una conductividad entre $0,81$ y $0,93 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. Estos valores hacen ver que existe una relación directa entre la resistencia mecánica de los bloques y su comportamiento térmico, cuestión que no es tan clara.

La necesidad de disponer de unos valores más concretos de conductividad, calor específico y densidad de los BTC, ha sido el origen de este Trabajo de Investigación. Se ha realizado una búsqueda experimental de esos valores sobre bloques BTC caracterizados por el GrupoTIERRA en el laboratorio de construcciones arquitectónicas de la ETSA de Valladolid. A continuación se describirá el procedimiento y los resultados de los experimentos realizados sobre estos BTC.

Caracterización del material a ensayar

El muro que se va a ensayar estará formado por bloques de tierra comprimida sin ningún tipo de estabilizante, recibidos con una fina capa de mortero de barro realizado con la misma tierra de los bloques y sin ningún otro aditivo, siendo el resultado un muro completamente homogéneo en su composición. La

TABLA 1

Soga	Tizón	Grueso	Volumen	Masa	Densidad	Resistencia fc
30,5 cm.	15,6 cm.	10,2 cm.	4.832 cm3	9,9 Kg	2044 Kg/m3	7,19 N/mm2

Granulometría	%
Arena	64,48
Limo	9,28
Arcilla	26,24
Materia Orgánica oxidable	0,59
Textura	Arcillo arenoso

partida de bloques BTC, mostrada en la Fig 1, ya fue utilizada en otra serie de ensayos del Grupo de Investigación para estudiar la influencia de la erosión hídrica sobre ellos, ensayándose en ese momento la granulometría de las tierras usadas en su producción conforme a la UNE 41410:2008, UNE 103102:1995 y UNE-EN 772-1:2002, así como las características geométricas, granulometría y la resistencia característica a compresión. Los resultados se muestran la Tabla 1.

Determinación de la conductividad de un muro de BTC

El ensayo llevado a cabo para la determinación de la conductividad en régimen estacionario de un muro de BTC, está basado en las normas internacionales ISO 8990:1997 que trata del procedimiento de la caja caliente calibrada. El ensayo se realiza a pequeña escala, según muestra la Fig. 2 el procedimiento asegura que se cumplen las leyes termodinámicas de conducción de calor a través de los cuerpos.

El material elegido para la realización de la caja de ensayos es el panel sándwich de la marca “Thermochip ®” THA. Este panel según el DITE 08/295 tiene una transmitancia de 0,325 W/m2•°C (Ua).

Con el objetivo de construir un muro de BTC aparejado a tizones de medidas aproximadas 60x60x10cm se diseña la caja de ensayos con unas medidas exteriores de 90,8cm de altura y 80,8cm de anchura. La profundidad de la caja es de 55cm, las medidas interiores variarán en función del grosor de la muestra ensayada. Para un muro de 10 cm de espesor, la altura es de 65cm, la anchura es de 55cm y el fondo de 32,1cm.

Una vez montada la caja y dispuesta en el Laboratorio de Construcciones Arquitectónicas de la ETSA de Valladolid, se procede al primer ensayo para hallar el factor de pérdidas del sistema Qc, cerrando la caja con un panel idéntico

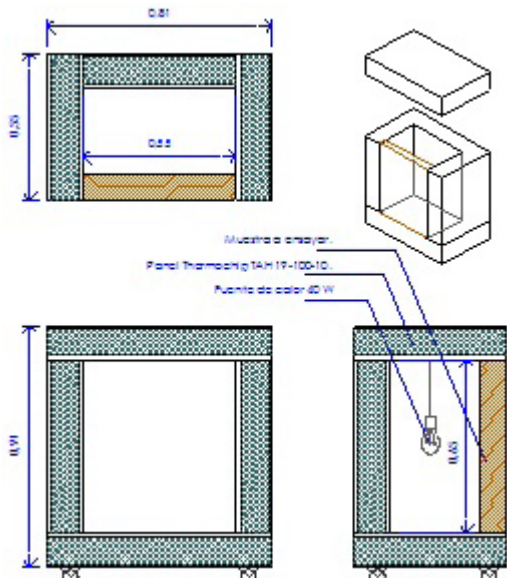


Figura 2. Esquema del Proyecto.

CONSTRUCCIÓN CON TIERRA.



Figura 3. Encolado y ensamblaje de los paneles.



Figura 4. La caja con el muro de BTC instrumentalizado.

a los de construcción de la misma. Se posicionan dos termopares en cada cara del panel, de la marca Ahlborn, conectados a una central de registro de datos Almeno/2390-5. El registro de datos se programa cada diez minutos. Una vez conectada la bombilla como fuente de calor de potencia conocida, realizado el registro y sellada la caja, se deja en funcionamiento para que alcance el flujo estacionario de calor. También se toman datos de la temperatura y humedad ambientales en el momento del ensayo, realizado el último fin de semana de Julio.

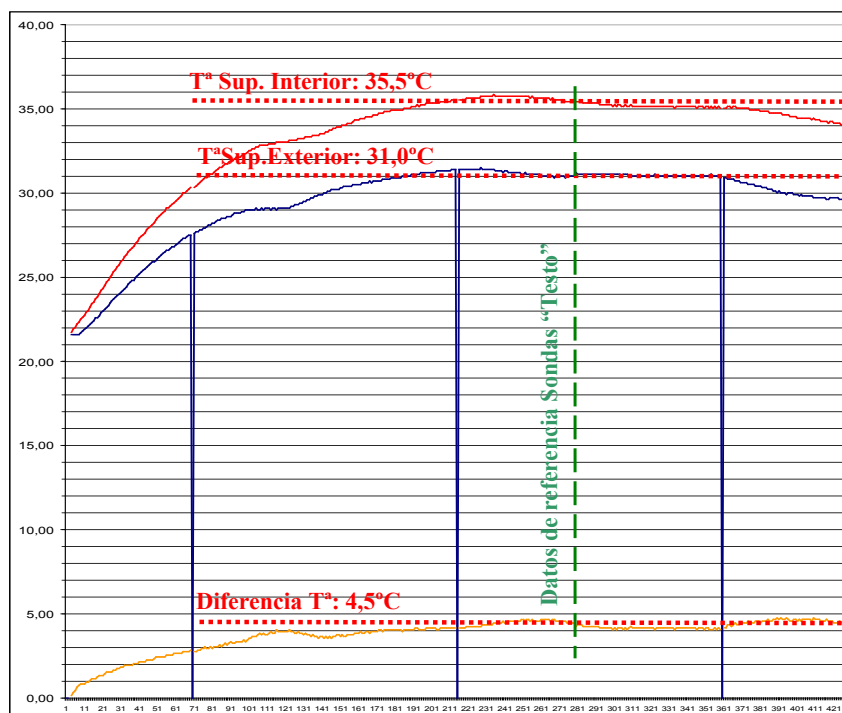
El paso siguiente es la medición de los valores en un muro de BTC. La construcción del muro se realiza directamente en el interior de la caja desmontando la tapa frontal. Los BTC se recibieron con un mortero de barro de la misma composición que los propios bloques. El muro se aparejó a junta encontrada para aproximarlos a la realidad constructiva de estos muros, y las juntas verticales y horizontales se colmataron con el mortero de barro dejando apenas unos pocos milímetros entre las piezas.

Una vez terminado se dejó secar 24 horas para limitar la cantidad de agua del mortero que hubiera podido absorber el muro en su construcción. No obstante hay que dejar constancia de que el tiempo para obtener un completo secado del muro debiera haber sido mayor. Transcurrido ese plazo, el muro se instrumentalizó con la misma configuración y el mismo registrador de datos del primer ensayo. Además se dispusieron sondas de temperatura y humedad de la marca Testo conectadas a un sistema de

toma de datos mediante radiofrecuencia Testo-Saveris. Este ensayo se prolongó, como el anterior, durante tres días.

Resultados del ensayo

La primera fase del ensayo, correspondiente a la calibración de la caja, produjo una diferencia de temperaturas superficiales muy notables. Estas diferencias llegaron a ser de más de 40°C una vez alcanzado el estado estacionario de transmisión de calor. Mientras que la temperatura superficial exterior permaneció prácticamente constante en $25 \pm 1^\circ\text{C}$ durante todo el periodo de observación, la temperatura superficial interior ascendió hasta alcanzar el estado estacionario a partir del segundo día, manteniéndose a una temperatura media de $73,8^\circ\text{C}$. La diferencia de temperaturas en este periodo donde se alcanzó el régimen estacionario fue de $48,6^\circ\text{C}$ de media. Conociendo así la diferencia de temperaturas entre ambas superficies podemos aplicar la Fórmula E-1 para conocer las pérdidas de calor por factores ajenos a la conducción térmica unidimensional a través de las caras de la caja.



(Gráfico 1)

Siendo Q_w la potencia de la fuente de calor, en este caso una bombilla de 40 W; ($t_{s1}-t_{s2}$), la diferencia de las temperaturas superficiales, exterior e interior; y S_a la superficie interior de la caja. El factor de pérdidas se considera una constante en la caja y se deberá considerar en los ensayos consecutivos que se efectúen.

En la siguiente fase del ensayo, los valores obtenidos por las sondas de temperatura superficiales del registrador Almeno situadas en ambas superficies del muro de BTC, mostraron una diferencia de temperatura de 4,5°C, como puede verse en el gráfico 1.

En cuanto a los datos recogidos por las sondas Testo, nos dan una diferencia de temperatura en las caras del Thermochip de 20,7°C. De estas sondas también conocemos la humedad relativa, destacando la humedad que presenta la superficie interior del BTC. Como ya se ha indicado, el tiempo de secado del que se dispuso antes del comienzo del ensayo no fue suficiente para conseguir el equilibrio higrométrico con el ambiente, por lo que al elevar la temperatura del muro se aceleró el proceso de intercambio de humedad con el ambiente, quedando esta

humedad atrapada en el interior de la caja, y más acusadamente en el entorno de las sondas fijadas al muro con cinta impermeable.

Con estos datos aplicamos la fórmula E-2 para obtener la conductividad del BTC

Deberemos corregir este valor en función del contenido de humedad de la muestra. Podemos aproximar la cantidad de agua que absorbió el muro durante su fase de construcción conociendo el volumen de agua que se usó para realizar el mortero de barro utilizado en el recibo de las piezas y enfoscado exterior. Este volumen fue de 0,8 litros, por lo que el incremento de humedad en el muro con respecto a su humedad de equilibrio es de 0,011 Kg/Kg. Aplicando las tablas y las fórmulas contenidas en la UNE-EN ISO 10456 nos da una conductividad corregida según E-3.

Estudio energético de muros de tierra

Los consumos energéticos de los edificios en la fase de uso de los mismos dependen de múltiples factores. El uso de modernas herramientas informáticas para predecir el comportamiento térmico de los edificios permite poner en relación multitud de variables tanto propias del edificio como exteriores al mismo. En este estudio se utilizarán con el fin de determinar los valores de demanda energética anuales asociados a diferentes tipos de cerramientos para todas las zonas climáticas en las que la normativa divide la geografía española.

El motor de cálculo escogido para la realización de este estudio es el Energy-Plus, el cual tiene la mayor difusión de este tipo de programas en la actualidad. Con el objetivo de estudiar el consumo energético asociado a los cerramientos, nos centraremos en la influencia de las variables de transmitancia y capacidad calorífica.

Se opta por estudiar exclusivamente los cerramientos verticales opacos, situados perimetralmente a un espacio cuadrado de 10x10m y de 3,5m de altura que llamaremos "caja gris". Los muros se orientan cada uno a un punto cardinal, de manera que al tener la misma superficie, la influencia energética conjunta de los cuatro muros se pueda considerar un valor medio independiente de la orientación. El resto de variables del programa se establecen para que no tengan ninguna influencia en la transferencia térmica de los muros. La temperatura de consigna se fija en 22,5°C todo el año.

Características de los cerramientos estudiados

Los cerramientos analizados en el estudio tienen como objetivo comparar la influencia de los valores térmicos de cada una de las tipologías en función del clima, y por ello se han escogido tanto cerramientos de uso habitual en edificios como soluciones de características ficticias en orden a estudiar los extremos de las variables de conductividad y calor específico. Se ha estudiado cuatro tipos.

Tipo 1. Partimos del estudio del cerramiento ensayado en el laboratorio, compuesto a base de bloques de tierra comprimida recibidos con mortero de barro de 40cm de espesor. Para este cerramiento se obtuvieron en el laborato-

rio unos valores de conductividad de 0,879 W/m°C el calor específico se estima a partir de una serie de ensayos en calorímetro adiabático en 2.050 J/kg°C. Bajo estas premisas la transmitancia del muro de 40cm de espesor es de 1,6 W/m²°C y su capacidad calorífica 419 KJ/m²°C.

Tipo 2. Se incluye en este estudio también una solución comercial de bloques de tierra comprimida estabilizados a base de cal y fibras de cáñamo, denominado Cannabric, cuya ventaja fundamental con respecto a los bloques ensayados en el laboratorio es la baja conductividad que presenta, de tan solo 0,19 W/m°C. El calor específico es de 1.113 J/Kg°C y la densidad de 1.100 Kg/m³. Estos valores permiten que con un muro de tan solo 30 cm de espesor se obtengan valores de transmitancia de 0,572 W/m²°C y una capacidad calorífica de 122,43 KJ/m²°C.

Tipo 3. El cerramiento que se ha tomado como ejemplo de soluciones ligeras se compone de un aplacado exterior de junta abierta, una cámara de aire muy ventilada, tablero impermeable de partículas con cemento de 1cm, 6 cm de aislamiento de conductividad 0,04 W/m°C, y una placa de yeso laminado de 1cm al interior. Con los valores térmicos de las capas tomados del catálogo de elementos constructivos del CTE, el programa calcula un valor de transmitancia de 0,57 W/m²°C y una capacidad calorífica de 8,25 KJ/m²°C.

Tipo 4. Como fachada convencional se define una formada de exterior a interior por ½ pie de ladrillo perforado caravista, aislamiento de conductividad 0,04 W/m°C y 4,8cm de espesor, tabicón de ladrillo hueco doble de 7cm y enlucido de yeso de 1,5cm al interior. La transmitancia de este cerramiento es igualmente de 0,572 W/m²°C mientras que la capacidad calorífica es 82,35 KJ/m²°C.

Por último se definen cinco cerramientos ficticios, uno por cada una de las zonas climáticas de invierno recogidas en el documento de limitación de la demanda energética del código técnico de la edificación. Estos cerramientos tienen la misma transmitancia que la límite establecida para cada una de las citadas zonas en el referido documento, y ninguna característica de inercia térmica. Estos valores se encuentran recogidos en la tabla 2.

TABLA 2

	Espesor	Transmitancia U		Capacidad calorífica	
	m	W/m ² °C	%	9,9 Kg	%
1. BTC_Lab	0,40	1,600	100,00	419,00	100,00
BTC_Solo_U	0,40	1,600	100,00	-	-
2. BTC Cañamo	0,30	0,572	35,75	122,43	29,22
3. Ligero	0,15	0,572	35,75	8,25	1,97
4. Convencional	0,25	0,572	35,75	82,35	19,65
U limite Zona E		0,570	35,63		
U limite Zona D		0,660	41,25		
U limite Zona C		0,730	45,63		
U limite Zona B		0,820	51,25		
U limite Zona A		0,940	58,75		

Resultados de las simulaciones informáticas

Se realizan un total de 65 simulaciones obteniéndose datos tanto de demandas anuales, mensuales, diarias e incluso horarias para calefacción y refrigeración. Destaca, de las gráficas de resultados para todas las zonas climas la diferencia de perfiles de demanda entre las soluciones con mayor masa térmica frente a las que no disponen de esta capacidad de acumulación de calor, llegando estas últimas a tener demandas de refrigeración y calefacción en el mismo día durante grandes temporadas estivales, extremo que no se produce nunca en los muros de tierra de gran inercia térmica. En el gráfico 2 se puede observar para un mismo periodo de tiempo la variación horaria en la demanda de calefacción y refrigeración que sufren las soluciones ligeras, mientras que el muro de BTC no presenta variaciones significativas de la demanda de calefacción, y en ningún caso existen demandas de calefacción y refrigeración en un mismo día.

Si observamos en la tabla 3 la demanda de calefacción del muro de BTC de laboratorio con respecto a cualquiera de las otras soluciones de fachada, la demanda energética que genera este muro es siempre muy superior a la de cualquier otra solución independientemente de

la zona climática, excepto en el caso de Tenerife, donde la escasa demanda de calefacción puede reducirse a valores casi nulos aprovechando la energía que los muros acumulan de la radiación solar. Observamos también que la diferencia porcentual entre la solución de BTC y las soluciones ligeras se hace menos pronunciada cuanto mas suaves son los inviernos, y llega a aproximarse e incluso logra reducir la demanda de la solución con valores de transmitancia iguales a los que marca el CTE HE1 para la zona climática A.

En el caso de las demandas de refrigeración mostradas en la tabla 4, la influencia de la capacidad calorífica del muro frente a las características de transmitancia se hace más patente. En las zonas climáticas con veranos más suaves, la solución de BTC de laboratorio consigue mejores resultados que las soluciones ligeras, y en casi todas las zonas reduce la demanda de la solución del edificio de referencia, con los valores límites de transmitancia de CTE HE-1.

Si miramos la demanda energética total anual de la tabla 5, suma de las demandas de refrigeración y calefacción, podemos observar que los ahorros energéticos obtenidos en refrigeración son pequeños con respecto a las demandas de calefacción. No obstante, si compara-

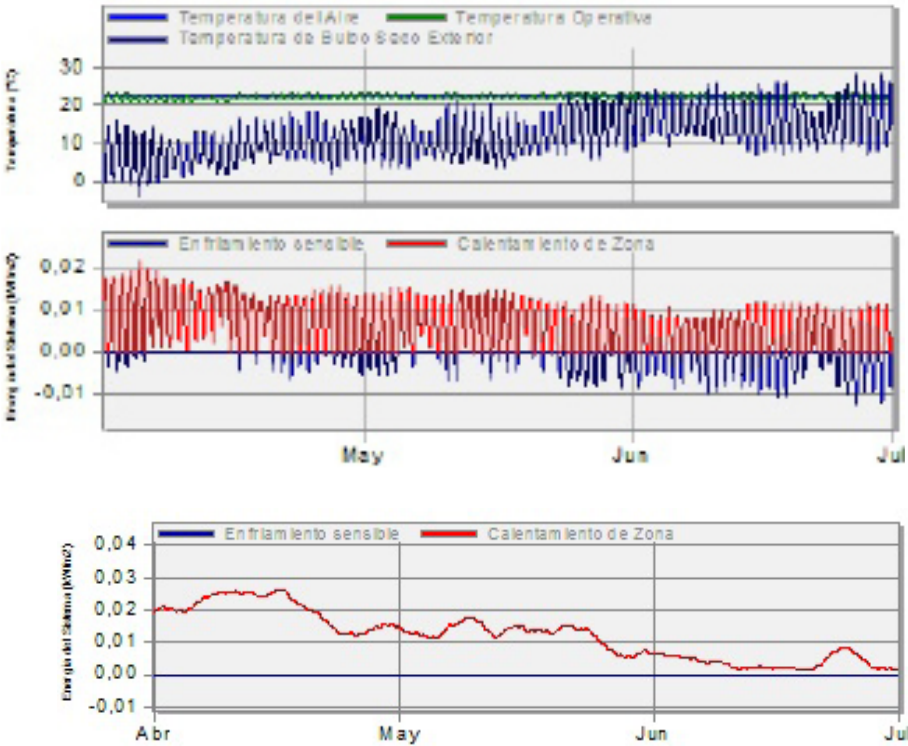
CONSTRUCCIÓN CON TIERRA.

mos la demanda debida al muro de BTC de laboratorio y las demandas con las transmitancias limite de CTE HE-1, observamos que estas tienden a acercarse en las zonas cálidas y a alejarse en las zonas frías, de manera que tanto en Tenerife como en Almería la construcción con BTC reduciría las demandas energéticas anuales por debajo de los requerimientos de la normativa, a pesar de no cumplir este tipo de muros las condiciones limites marcadas.

Igualmente pero de manera más limitada, las demandas debidas a otras soluciones, comparadas con las debidas al muro de BTC van reduciendo su distancia en los climas mas cálidos. Las diferencias llegan a reducirse un 23,1% con respecto a la solución ligera, apenas un 6,3% con respecto a la solución convencional y solo un 1,5% con respecto al muro

de BTC con fibras de cáñamo, manteniéndose la diferencia con entorno al 42 %.

Cabe indicar también, que el muro de BTC con cáñamo (Cannabric) es el que mejor comportamiento térmico tiene en cualquiera de los climas, y los valores de demandas se encuentran siempre muy por debajo de los valores de los cerramientos con transmitancia tomada de los valores límite de la normativa. Esto nos indica la posibilidad de que un material pueda encontrarse por debajo de los requerimientos de reducción de la demanda de la norma, sin cumplir con los valores límite de transmitancias. Podríamos diseñar un material a base de tierra comprimida que, gracias a la capacidad calorífica del material mantenga los niveles de demanda de la norma a pesar del valor de la transmitancia.



(Gráfico 2). Variación de la demanda para muro de BTC_Lab, abajo y fachada ligera arriba.)

PASADO, PRESENTE Y FUTURO

Demanda calefacción	BTC Lab		Ligero		Conven.		B T C		U limite	
	kWh/m ²	%	kWh/m ²	%	kWh/m ²	%	kWh/m ²	%	kWh/m ²	%
E1 (León)	146,20	100	68,39	46,8	60,85	41,6	59,94	41,0	69,35	47,4
D3 (Madrid)	106,25	100	50,46	47,5	44,11	41,5	43,68	41,1	58,85	55,4
D2 (Valladolid)	131,38	100	63,00	48,0	54,69	41,6	53,87	41,0	73,26	55,8
D1 (Palencia)	132,28	100	62,40	47,2	55,09	41,6	54,33	41,1	72,49	54,8
C4 (Cáceres)	81,90	100	41,89	51,1	34,70	42,4	34,07	41,6	53,79	65,7
C3 (Granada)	90,24	100	48,41	53,6	38,39	42,5	37,58	41,6	62,28	69,0
C2 (Barcelona)	80,74	100	41,68	51,6	34,34	42,5	33,65	41,7	53,61	66,4
C1 (A Coruña)	94,38	100	46,74	49,5	40,56	43,0	39,54	41,9	59,65	63,2
B4 (Sevilla)	51,94	100	31,76	61,1	22,50	43,3	21,94	42,2	45,87	88,3
B3 (Valencia)	62,99	100	35,67	56,6	27,20	43,2	26,55	42,1	51,24	81,3
A4 (Almaeria)	40,18	100	26,91	67,0	18,22	45,3	17,36	43,2	44,04	-
A3 (Tenerife)	2,93	100	13,59	-	2,88	98,3	1,56	53,2	24,36	-
A3 (Cadiz)	84,29	100	36,96	43,8	35,22	41,8	34,98	55,1	59,51	70,6

Demanda refrigerac.	BTC Lab		Ligero		Conven.		B T C		U limite	
	kWh/m ²	%	kWh/m ²	%	kWh/m ²	%	kWh/m ²	%	kWh/m ²	%
E1 (León)	146,20	100	68,39	46,8	60,85	41,6	59,94	41,0	69,35	47,4
D3 (Madrid)	106,25	100	50,46	47,5	44,11	41,5	43,68	41,1	58,85	55,4
D2 (Valladolid)	131,38	100	63,00	48,0	54,69	41,6	53,87	41,0	73,26	55,8
D1 (Palencia)	132,28	100	62,40	47,2	55,09	41,6	54,33	41,1	72,49	54,8
C4 (Cáceres)	81,90	100	41,89	51,1	34,70	42,4	34,07	41,6	53,79	65,7
C3 (Granada)	90,24	100	48,41	53,6	38,39	42,5	37,58	41,6	62,28	69,0
C2 (Barcelona)	80,74	100	41,68	51,6	34,34	42,5	33,65	41,7	53,61	66,4
C1 (A Coruña)	94,38	100	46,74	49,5	40,56	43,0	39,54	41,9	59,65	63,2
B4 (Sevilla)	51,94	100	31,76	61,1	22,50	43,3	21,94	42,2	45,87	88,3
B3 (Valencia)	62,99	100	35,67	56,6	27,20	43,2	26,55	42,1	51,24	81,3
A4 (Almaeria)	40,18	100	26,91	67,0	18,22	45,3	17,36	43,2	44,04	-
A3 (Tenerife)	2,93	100	13,59	-	2,88	98,3	1,56	53,2	24,36	-
A3 (Cadiz)	84,29	100	36,96	43,8	35,22	41,8	34,98	55,1	59,51	70,6

CONSTRUCCIÓN CON TIERRA.

Demanda total	BTC Lab		Ligero		Conven.		B T C		U limite	
	kWh/m2	%	kWh/m2	%	kWh/m2	%	kWh/m2	%	kWh/m2	%
E1 (León)	146,20	100	68,39	46,8	60,85	41,6	59,94	41,0	69,35	47,4
D3 (Madrid)	106,25	100	50,46	47,5	44,11	41,5	43,68	41,1	58,85	55,4
D2 (Valladolid)	131,38	100	63,00	48,0	54,69	41,6	53,87	41,0	73,26	55,8
D1 (Palencia)	132,28	100	62,40	47,2	55,09	41,6	54,33	41,1	72,49	54,8
C4 (Cáceres)	81,90	100	41,89	51,1	34,70	42,4	34,07	41,6	53,79	65,7
C3 (Granada)	90,24	100	48,41	53,6	38,39	42,5	37,58	41,6	62,28	69,0
C2 (Barcelona)	80,74	100	41,68	51,6	34,34	42,5	33,65	41,7	53,61	66,4
C1 (A Coruña)	94,38	100	46,74	49,5	40,56	43,0	39,54	41,9	59,65	63,2
B4 (Sevilla)	51,94	100	31,76	61,1	22,50	43,3	21,94	42,2	45,87	88,3
B3 (Valencia)	62,99	100	35,67	56,6	27,20	43,2	26,55	42,1	51,24	81,3
A4 (Almaeria)	40,18	100	26,91	67,0	18,22	45,3	17,36	43,2	44,04	-
A3 (Tenerife)	2,93	100	13,59	-	2,88	98,3	1,56	53,2	24,36	-
A3 (Cadiz)	84,29	100	36,96	43,8	35,22	41,8	34,98	55,1	59,51	70,6



Figura 5. Replanteo del muro de BTC a ensayar



Figura 6. Monitorización y sondeo del muro de BTC antes del ensayo

Conclusiones

- El comportamiento termodinámico de la edificación es siempre complejo, pero para su estudio hace falta partir de variables precisas y definidas. En el caso de la tierra, no podemos hacer uso de valores fiables para estudiar su comportamiento, y tampoco existe en la actualidad una relación entre las variables térmicas de este material y otras variables físicas más accesibles tales como la densidad o la composición.
- De los resultados de las simulaciones podemos concluir que el muro de BTC, pese a tener una capacidad calorífica muy superior al resto de cerramientos, no es por sí sola suficiente para asegurar demandas energéticas menores a las de referencia, salvo en climas muy puntuales como el caso de Tenerife, donde el muro de BTC asegura unas demandas mas bajas, y por tanto podemos asegurar que las soluciones en tierra se adaptan mejor a los climas de la zona A3, correspondientes a los de veranos mas calurosos e inviernos menos fríos.
- El muro de BTC con cáñamo (Cannabris) es el que mejor resultados presenta en todas las simulaciones, gracias a su baja conductividad y gran capacidad calorífica.
- Concluimos por tanto de los bloques de tierra BTC que, si bien es un material con grandes cualidades estructurales y tectónicas, tiene unas propiedades térmicas que le ponen en desventaja para competir en este aspecto con otro tipo de soluciones más extendidas. Sin embargo, en combinación con ciertos aditivos como el cáñamo o fibras vegetales, o incluso en simbiosis directa con un material aislante, puede mejorar sensiblemente no solo las demandas asociadas al propio cerramiento, sino también las condiciones de confort interior, al funcionar como amortiguador de los cambios bruscos en las condiciones de temperatura. Por tanto, se considera de gran interés para la arquitectura de alta eficiencia energética la Investigación en la mejora de las condiciones de aislamiento térmico de los materiales de construcción basados en tierra.

Bibliografía

- Barbeta Solà, G., 2002. *Mejora de la tierra estabilizada en el desarrollo de una arquitectura sostenible hacia el siglo XXI*. Barcelona: UPC. Tesis Doctoral.
- Bestraten, S., et al., 2011. *Construcción con tierra en el siglo XXI*. Informes de la construcción Vol. 63, 523, 5-20.
- Jové, F.; Muñoz, D.; Pahino, L. 2010. "Ensayos de erosión hídrica sobre muros de tierra (fábrica de BTC). Método, resultados y discusión". *Construcción con tierra, tecnología y arquitectura*. Coord. Jové, F.; Sáinz, J.L. Valladolid, 2011.
- Hall, M., Allison, D., 2009. *Assessing the effects of soil grading on the moisture content-dependent thermal conductivity of stabilised rammed earth materials*. *Applied thermal Engineering* N° 29. pags. 740-747.
- Heathcote, K., 2011. *The Thermal Performance of Earth Buildings*. Informes de la construcción Vol. 63, 523, 117-126. doi: 10.3989/ic. 10.024
- Justo, G.N., 2010. *¿Sostenibilidad? ...O Simplemente Sensatez*. Informes de la construcción, 62(517), pág.4.
- Maldonado Ramos L. Castilla Pascual, F., Vela Cossio, F., 2001. *Rendimiento y coste energético en la construcción de cerramientos de fábrica de adobe y bloque de tierra comprimida*. Informes de la construcción. Vol: 53, nº 473, pags. 27-37.
- Vázquez Espi, M. 2001. *Construcción e impacto sobre el ambiente: el caso de la tierra y otros materiales*. Madrid: Instituto Juan de Herrera. *Ciudades para un futuro más Sostenible*.
- Meneses, T.; Vicente, R.; Costa, A. y otros, 2010. "Comportamento térmico de construções em alvenaria de adobe: Ensaio experimentais sobre tres células de teste a escala 1:4". *Construcción con tierra, tecnología y arquitectura*. Coord. Jové, F.; Sáinz, J.L. Valladolid, 2011.
- Wadel Raina, G., 2010. *La sostenibilidad en la arquitectura industrializada: la construcción modular ligera aplicada a la vivienda*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña. Tesis Doctoral.
- EN 1745:2002. *Masonry and masonry products. Methods for determining design thermal values*.
- ISO 8990:1994. *Thermal insulation - Determination of steady-state thermal transmission properties - Calibrated and guarded hot box*
- UNE 41410:2008. *Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo*.
- UNE-EN ISO 10456:2001. *Materiales y productos para la edificación. Procedimientos para la determinación de los valores térmicos declarado*

Notas

* David Cavero, Arquitecto. Master en Investigación en Arquitectura MIA, Universidad de Valladolid. La presente ponencia recoge parte de los resultados del Trabajo de Fin de Master, año 2012.

* Félix Jové, Dr. Arquitecto, profesor Titular de Construcciones Arquitectónicas ETS Arquitectura, Universidad de Valladolid. Director del GrupoTIERRA-Uva, Grupo de Investigación en Tecnología de la Construcción con Tierra.

* Peso: el peso del muro es de 73,07 Kg y se calcula en función de su volumen (0,03575 m³) y su densidad (2.044 Kg/m³)

* Transmitancia: las transmitancias límite recogidas en HE-1, son las utilizadas en la definición del edificio de referencia de la opción general de justificación, y son las mismas transmitancias de referencia que aparecen el reciente borrador de CTE HE-1. En esta investigación se consideraran las demandas asociados a los cerramientos definidos a través de la transmitancia límite, como "demandas de referencia", al igual que hacen los programas de cálculo en la generación del edificio de referencia.