

6.b. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE MURROS DE BTC APLICADO A PROGRAMAS DE VIVIENDA SOCIAL Y SOSTENIBLE

Félix Jové Sandoval, Dr. Arquitecto

Universidad de Valladolid. UVA. España.

1. ANTECEDENTES. CONSTRUCCIÓN CON TIERRA EN VIVIENDA SOCIAL SOSTENIBLE

La tierra como material de construcción parece tener cualidades idóneas para formar parte de la llamada arquitectura sostenible, con un marcado carácter social dado su bajo coste y la facilidad de obtención del material. El interés de la construcción con tierra reside en las características propias del material, con buenas propiedades térmicas, acústicas y mecánicas, en la facilidad de su puesta en uso y en el sencillo proceso de fabricación de los materiales sin consumo de energía contaminante.

Al adobe o a la tapia tradicional, se le unen ahora otros nuevos productos en base tierra como el BTC; Bloque de Tierra Comprimida. El BTC es un bloque macizo de tierra compactado mecánicamente, sus dimensiones son algo mayores que las del ladrillo tradicional, generalmente 30x15x10cm. El compactado se realiza mediante prensa manual aunque en la actualidad, unido a una mayor demanda del material, empiezan a incorporarse procesos industriales de prensado. La mezcla de tierra que se utiliza tiene una dosificación cualificada con abundancia de arena y no requiere ningún tipo de estabilizante, aunque en ocasiones se estabiliza con una pequeña proporción de cemento o cal, siendo preferible el estabilizado con cal. La mejora ambiental sustancial del BTC frente al ladrillo cerámico común es que el material no necesita cocción a altas temperaturas, es decir: no necesita quemar combustible para su fabricación. Este aspecto es fundamental en países como Ecuador en que la tala incontrolada de sus bosques y el consumo de madera atenta contra su equilibrio ecológico y contra la estabilidad y seguridad de sus suelos.

Por otra parte, Ecuador tiene una gran tradición constructiva con adobe y tapia. Tal es el caso del casco histórico de Quito, declarado Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO, donde gran parte de su patrimonio Monumental está construido con este tipo de materiales, de manera que las técnicas y los sistemas constructivos le son propios. Uno de los principales objetivos del presente Proyecto de Cooperación Internacional es el intercambio de conocimientos científico-técnicos entre la Universidad de Valladolid (UVa-España) y la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (ULEAM-Ecuador) para lograr un mayor fortalecimiento de la investigación

de manera que permita su aplicación práctica en el desarrollo de prototipos de vivienda social para la población más desfavorecida de Manta y, por extensión, de la región de Manabí. En ese sentido, se hace fundamental compartir el conocimiento relativo a la construcción con BTC como punto de partida para seguir avanzando en la investigación del material con el objeto de conseguir resultados realmente aplicables en los países receptores.

Podemos afirmar que la construcción con Bloque de Tierra Comprimida aporta aspectos propios de la arquitectura ecológica y sostenible, pero este concepto va mas allá de la utilización de materiales naturales o poco industrializados en los edificios.

Los materiales que forman parte de esta arquitectura han de ser capaces de participar en las estrategias bioclimáticas del proyecto para reducir la demanda energética de los edificios en la fase de uso.

En este sentido, los bloques de tierra comprimida tienen la cualidad de incorporar muy poca energía en su fabricación, pero a la hora de evaluar su transferencia de calor existe en la bibliografía científica -tanto española cómo ecuatoriana- una gran dispersión de datos acerca de sus características térmicas. Para poder valorar la influencia que en el consumo energético tiene este material en la fase de uso de las viviendas construidas con BTC se ha desarrollado una investigación en la Universidad de Valladolid cuyos resultados tendrán aplicación en la construcción de viviendas para la mejora de la calidad de vida de la población marginal en Ecuador.

El Trabajo de Investigación se ha desarrollado como parte del trabajo de fin de master del arquitecto David Caverro Rodríguez, dentro del Master de Investigación en Arquitectura de la ETS de Arquitectura (UVa-España), con el título: "La tierra, material para la sostenibilidad, análisis del comportamiento energético de muros de tierra", dirigido por el profesor Dr. D. Félix Jové Sandoval.

Los procedimientos y el protocolo de la investigación forman también parte de los objetivos del Proyecto de la Agencia Española de Cooperación Internacional al Desarrollo AECID.

Efectivamente, dentro del presupuesto económico del Proyecto PCI se encuentra la inversión para la construcción y dotación completa de un Laboratorio de Construcción en la ULEAM-Ecuador, con el objetivo de potenciar su capacidad investigadora y la posibilidad de realizar ensayos de materiales locales. Siendo así, a continuación se explica detalladamente la investigación realizada, que deberá tener su continuidad futura en la ULEAM-Ecuador.

La investigación se ha estructurado en tres fases:

-Fase 1: Construcción y calibrado de caja térmica. Ensayos en el Laboratorio.

-Fase 2: Simulación informática del comportamiento térmico del BTC, UVA-España.

-Fase 3: Simulación informática del comportamiento térmico del BTC, ULEAM-Ecuador.

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 a la norma internacional ISO-8990:1994.

En la segunda fase, con los datos obtenidos, se trata de realizar simulaciones informáticas del comportamiento termodinámico de una "caja gris" situada en cada una de las zonas climáticas en que la normativa divide a la geografía española. Finalmente, en la tercera fase, la simulación informática deberá extenderse a las diferentes zonas climáticas de Ecuador.

La comparación del comportamiento térmico del muro de BTC con otras soluciones constructivas ligeras nos da una idea de la importancia que la inercia térmica tiene en función del clima, y permite comprender la adaptación de la construcción con tierra a los climas en los que ésta tiene una mayor incidencia.

2. 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 del material.

Si buscamos los valores térmicos de los bloques de tierra comprimida en la norma que regula sus características, la UNE-41410, esta se remite a una norma internacional UNE-EN 1745. Esta norma es aplicable tanto a piezas de albañilería cerámica como de hormigón, y piedra natural, pero no se encuentra referencia explícita en ella 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 (Código Técnico de la Edificación - España), 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 diferentes. El valor dado para la conductividad de todos estos materiales es de $1,1 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$. Por otra parte, el valor del calor específico, que es el que define la capacidad de acumulación de calor de estos materiales, no se proporciona en este documento, aunque sí aparece 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 asignan una capacidad calorífica igual para todos los materiales de tierra cruda de $1.000 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$. Capacidad que es idéntica a la supuesta para piezas de características bien distintas, como las 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 $1,2 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$ 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 A, de mayor resistencia mecánica y una conductividad entre $0,46$ y $0,81 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$; y los tipo B, de menos resistencia y con una conductividad entre $0,81$ y $0,93 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$. Estos valores nos hacen pensar en que existe una relación entre la resistencia mecánica de los bloques y su comportamiento térmico, tal vez función de su densidad.

La necesidad de disponer de unos valores concretos de conductividad, calor específico y densidad, ha propiciado una búsqueda experimental de los mismos sobre muestras de bloques caracterizados en el Laboratorio de Construcciones Arquitectónicas de la ETS de Arquitectura, UVA-España. A continuación se describirá el procedimiento y los resultados de los experimentos realizados sobre estos BTC.

2.1. Caracterización del material a ensayar

El muro que se va a ensayar estará formado por bloques de tierra comprimida naturales, 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 partida de bloques aquí descritos, mostrada en la Fig.1, fue utilizada en otra serie de ensayos para estudiar la erosión hídrica ensayándose en ese momento la granulometría de las tierras usadas en la producción de los BTC así como las características geométricas, gravimétricas y la resistencia característica a compresión, los resultados se muestran la tabla 1.

Soga	Tizón	Grueso	Volumen	Masa	Densidad	Resistencia fo
30,5 cm	15,6 cm	10,2 cm	4,842 cm ³	9,9 Kg	2,044 Kg/m ³	7,19 N/mm ²
Granulometría		%				
Arena		64,48				
Limo		9,28				
Arcilla		26,24				
Mat. orgánica oxidable		0,59				
Textura		Arcillo arenoso				

Tabla 01. Características BTC.



Figura 01. Bloques BTC.

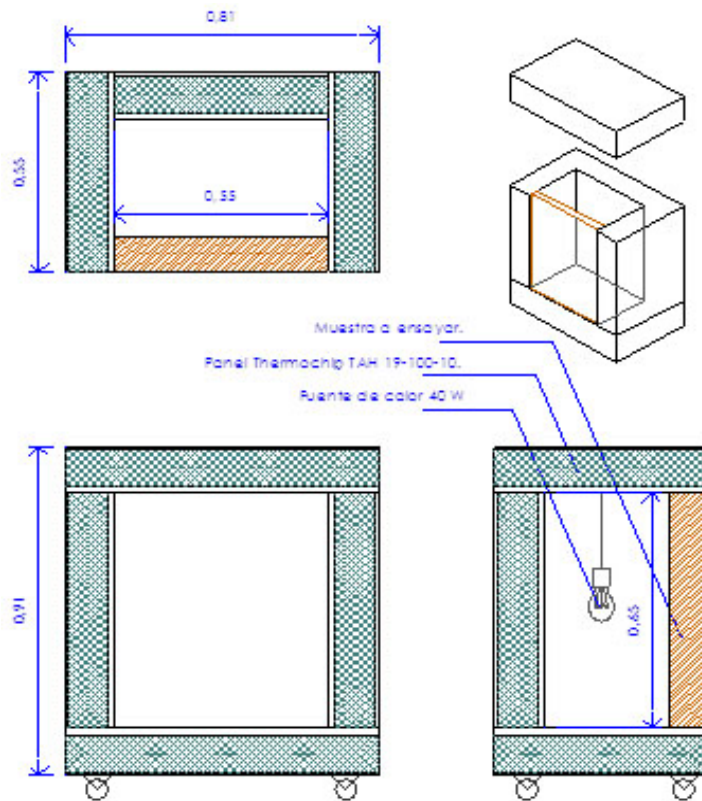


Figura 02. Diseño para la construcción de la caja de ensayos.

2.2. 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 conocida de 0,325 W/m²·°C (Ua).

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

Una vez montada la caja y dispuesta en el Laboratorio se procede al primer ensayo para hallar el factor de pérdidas del sistema Qc. Se cierra la caja con un panel sándwich idéntico a los de construcción de la misma y se posicionan dos termopares - marca Ahlborn- en cada cara del panel, conectados a una central de registro de datos ALMENO 2390-5. El registro de datos se programa cada 10 minutos. Como fuente de calor se utilizó una bombilla de potencia conocida. Una vez sellada la caja, se deja en funcionamiento para que alcance el flujo estacionario de calor, alcanzado en dos días durante el último fin de semana de Julio. También se toman datos de temperatura y humedad ambiental del local en el momento del ensayo.

El paso siguiente consistió en la medición de los valores en un muro de BTC. La construcción del muro se realizó directamente en el interior de la caja, recibiendo los bloques con un mortero de barro de la misma composición que los propios bloques. El muro se construyó aparejado, colmatando las juntas verticales y horizontales con mortero de barro, dejando apenas unos pocos milímetros entre las piezas.

Una vez terminado se dejó secar durante 24 horas para limitar la cantidad de agua del mortero que hubiera podido absorber el muro en su construcción. No obstante, hay que ser conscientes de que el tiempo para obtener un completo secado del muro debiera haber sido algo mayor, por lo que los valores obtenidos tendrán que ser corregidos. Transcurrido ese plazo, el muro se instrumentalizó con la misma configuración y el mismo registrador de datos del primer ensayo. Se dispusieron además 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 en el caso anterior, durante tres días.

2.3. Resultados del ensayo

La primera fase del ensayo, correspondiente a la calibración de la caja, produjo una diferencia de temperaturas superficiales muy notable. Estas diferencias una vez alcanzado el estado estacionario de transmisión de calor llegaron a ser de más de 40°C. Se observó también que mientras que la temperatura superficial exterior permanece prácticamente constante en 25±1°C durante todo el periodo de observación, la temperatura superficial interior va ascendiendo hasta alcanzar el estado estacionario a partir del segundo día, manteniéndose a una temperatura media de 73,8°C. La diferencia de temperaturas en este periodo donde se ha alcanzado el régimen estacionario es de 48,6°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.

$$Q_c = Q_w - U_a^* (t_{S1a} - t_{S2a}) S_a$$

$$Q_c = 0 \text{ W} - 0,325 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 8,6^\circ\text{C} \cdot 1,4158 \text{ m}^2 = -1,8 \text{ W}$$



Figura 03. Encolado y ensamblaje de los paneles



Figura 04. La caja con el muro instrumentalizado.

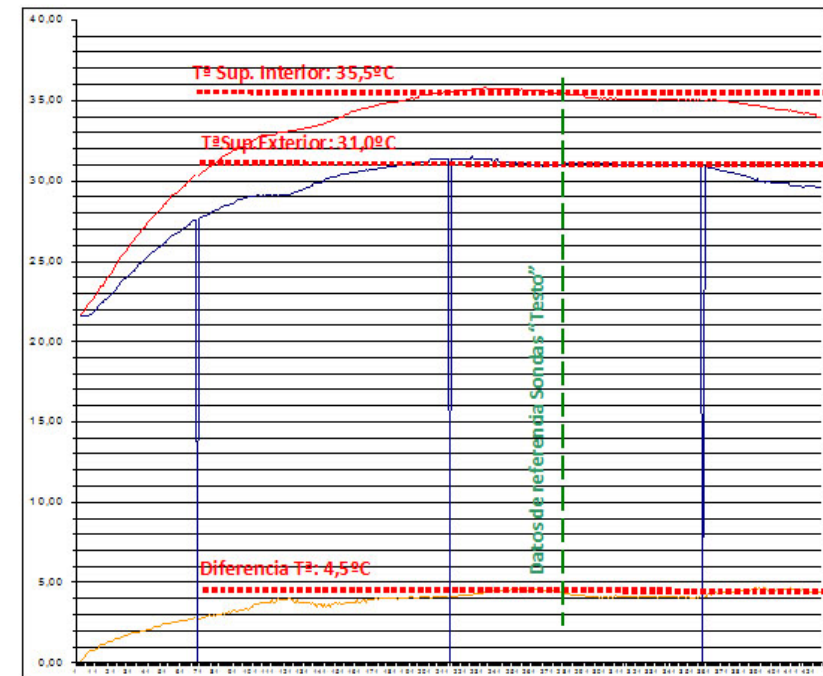


Grafico 01. valores obtenidos por las sondas de temperatura superficial situadas en ambas caras del muro de BTC

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 deberá considerarse en los ensayos posteriores que se efectúen.

Una vez obtenido el factor de pérdida del sistema Q_c , se procede a ensayar el muro de BTC. En esta fase del ensayo, los valores obtenidos por las sondas de temperatura superficial situadas en ambas caras del muro de BTC mostraron una diferencia de temperatura de 4,5°C (gráfico 1) mientras que la diferencia de temperatura en las caras del Thermochip fue de 20,7°C.

De los datos recogidos por las sondas TESTO también conocemos la humedad relativa, destacando la humedad que presenta la superficie interior del BTC. El tiempo de secado del que se dispuso antes del comienzo del experimento 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 quedando esta 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

$$\lambda_b = \frac{e_b}{(t_{s1b} - t_{s2b}) S_b} (Q_w - U_a^* (t_{s1a} - t_{s2a}) S_a - Q_c)$$

$$\lambda_b = \frac{0,1m}{4,5^\circ C \cdot 0,3575m^2} (0 W - 0,325 W / m^2 \cdot 0,7^\circ C \cdot 1,1279m^2 - 1,6 W)$$

$$\lambda_b = 0,9188 W / m^\circ C$$

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 que se utilizó 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 norma UNE-EN ISO 10456, nos da una conductividad corregida según E-3.

$$\lambda'_b = \lambda_b \cdot e^{f(u_2 - u_1)} = 0,9188 W / m^\circ C \cdot 0,9569 = 0,8792 W / m^\circ C$$

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 han utilizado con el fin de determinar los valores de demanda energética anuales asociados a diferentes tipos de cerramientos para las diferentes 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, programa que 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 hemos centrado en la influencia de las variables de Transmitancia ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) y Capacidad calorífica ($KJ/m^2 \cdot ^\circ C$).

Se opta por estudiar exclusivamente los cerramientos verticales opacos, situados perimetralmente a un espacio cuadrado de 10 x 10 m y de 3,5 m de altura que llamaremos “caja gris”. Los muros se orientan cada uno a uno de los puntos cardinales, 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.

3.1. Características de los muros de cerramiento estudiados

Se han estudiado cuatro tipos de muros de cerramientos con diferente composición. Los cerramientos analizados tienen como objetivo comparar la influencia de los valores térmicos de cada una de las tipologías en función del clima. Es por ello que 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 analiza en primer lugar un cerramiento construido a partir de los BTC ensayado en el laboratorio, compuesto a base de bloques de tierra comprimida recibidos con mortero de barro, con un espesor total de 40 cm. Para este cerramiento se obtuvieron en el laboratorio 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 40 cm de espesor es de 1,6 W/m²°C y su Capacidad calorífica 419 KJ/m²°C.

En segundo lugar se incluye un cerramiento construido a partir de 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 su baja conductividad, 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.

En tercer lugar se ha analizado un cerramiento de solución ligera con el que se construye en España. Está compuesto de un aplacado exterior de junta abierta, una cámara de aire muy ventilada, tablero impermeable de partículas con cemento de 1 cm de espesor, aislamiento térmico de 6 cm de espesor de conductividad 0,04 W/m°C, y una placa de yeso laminado al interior de 1 cm de espesor. Con los valores térmicos de las diferentes capas tomados del catálogo de elementos constructivos del CTE (España), el programa calcula un valor de transmitancia de 0,57 W/m²°C y una Capacidad calorífica de 8,25 KJ/m²°C.

	Espesor	Transmitancia U		Capacidad calorífica	
	m	W/m²°C	%	KJ/m²°C	%
BTC_Lab	0,40	1,600	100,00	419,00	100,00
BTC_Solo_U	0,40	1,600	100,00	-	-
BTC_Cañamo	0,30	0,572	35,75	122,43	29,22
Ligero	0,15	0,572	35,75	8,25	1,97
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		

(Tabla 2)

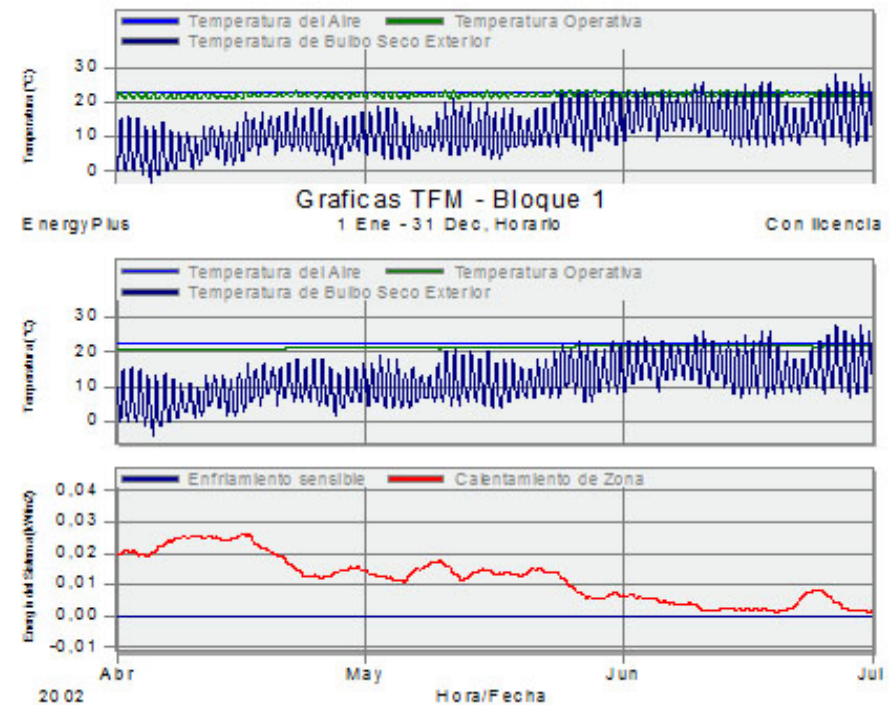


Gráfico 02. Variación de la demanda para muro de BTC_Lab, abajo y fachada ligera arriba.

Demanda Calefacción	BTC_Lab		Ligero		Convencional		BTC_Cañamo		U limite	
	kWh/m2	%	kWh/m2	%	kWh/m2	%	kWh/m2	%	kWh/m2	%
E1 (León)	146,20		68,39	46,8	60,85	41,6	59,94	41,0	69,35	47,4
D3 (Madrid)	106,25		50,46	47,5	44,11	41,5	43,68	41,1	58,85	55,4
D2 (Valladolid)	131,38		63,00	48,0	54,69	41,6	53,87	41,0	73,26	55,8
D1 (Palencia)	132,28		62,40	47,2	55,09	41,6	54,33	41,1	72,49	54,8
C4 (Cáceres)	81,90		41,89	51,1	34,70	42,4	34,07	41,6	53,79	65,7
C3 (Granada)	90,24		48,41	53,6	38,39	42,5	37,58	41,6	62,28	69,0
C2 (Barcelona)	80,74	100,0	41,68	51,6	34,34	42,5	33,65	41,7	53,61	66,4
C1 (A Coruña)	94,38		46,74	49,5	40,56	43,0	39,54	41,9	59,65	63,2
B4 (Sevilla)	51,94		31,76	61,1	22,50	43,3	21,94	42,2	45,87	88,3
B3 (Valencia)	62,99		35,67	56,6	27,20	43,2	26,55	42,1	51,24	81,3
A4 (Almería)	40,18		26,91	67,0	18,22	45,3	17,36	43,2	44,04	109,6
A3 (Tenerife)	2,93		13,59	463,8	2,88	98,3	1,56	53,2	24,36	831,4
A3 (Cádiz)	84,29		36,96	43,8	35,22	41,8	34,98	41,5	59,51	70,6

Tabla 03. Demandas de calefacción

Demanda Refrigeración	BTC_Lab		Ligero		Convencional		BTC_Cañamo		U limite	
	kWh/m2	%	kWh/m2	%	kWh/m2	%	kWh/m2	%	kWh/m2	%
E1 (León)	4,23		10,06	237,8	2,76	65,2	1,88	44,4	10,76	254,4
D3 (Madrid)	19,47		15,44	79,3	8,83	45,4	8,26	42,4	18,49	95,0
D2 (Valladolid)	9,99		13,62	136,3	5,29	53,0	4,35	43,5	16,49	165,1
D1 (Palencia)	7,35		11,31	153,9	4,03	54,8	3,26	44,4	13,75	187,1
C4 (Cáceres)	31,43		21,23	67,5	13,74	43,7	13,09	41,6	27,61	87,8
C3 (Granada)	22,52		20,21	89,7	10,23	45,4	9,41	41,8	26,64	118,3
C2 (Barcelona)	15,35	100,0	14,73	96,0	7,25	47,2	6,57	42,8	19,52	127,2
C1 (A Coruña)	1,19		7,72	648,7	1,61	135,3	0,75	63,0	10,51	883,2
B4 (Sevilla)	40,87		27,14	66,4	17,56	43,0	16,86	41,3	39,20	95,9
B3 (Valencia)	22,70		18,94	83,4	10,30	45,4	9,62	42,4	27,69	122,0
A4 (Almería)	34,33		24,19	70,5	15,20	44,3	14,39	41,9	39,53	115,1
A3 (Tenerife)	45,10		32,10	71,2	20,43	45,3	18,86	41,8	53,44	118,5
A3 (Cádiz)	13,14		7,37	56,1	5,53	42,1	5,54	42,2	13,30	101,2

Tabla 4: Demandas de refrigeración

Demanda Total	BTC_Lab		Ligero		Convencional		BTC_Cañamo		U limite	
	kWh/m2	%	kWh/m2	%	kWh/m2	%	kWh/m2	%	kWh/m2	%
E1 (León)	150,43		78,45	52,2	63,61	42,3	61,82	41,1	80,11	53,3
D3 (Madrid)	125,72		65,90	52,4	52,94	42,1	51,94	41,3	77,34	61,5
D2 (Valladolid)	141,37		76,62	54,2	59,98	42,4	58,22	41,2	89,75	63,5
D1 (Palencia)	139,63		73,71	52,8	59,12	42,3	57,59	41,2	86,24	61,8
C4 (Cáceres)	113,33		63,12	55,7	48,44	42,7	47,16	41,6	81,40	71,8
C3 (Granada)	112,76		68,62	60,9	48,62	43,1	46,99	41,7	88,92	78,9
C2 (Barcelona)	96,09	100,0	56,41	58,7	41,59	43,3	40,22	41,9	73,13	76,1
C1 (A Coruña)	95,57		54,46	57,0	42,17	44,1	40,29	42,2	70,16	73,4
B4 (Sevilla)	92,81		58,90	63,5	40,08	43,2	38,80	41,8	85,07	91,7
B3 (Valencia)	85,69		54,61	63,7	37,50	43,8	36,17	42,2	78,93	92,1
A4 (Almería)	74,51		51,10	68,6	33,42	44,9	31,75	42,6	83,57	112,2
A3 (Tenerife)	48,03		45,69	95,1	23,31	48,5	20,42	42,5	77,80	162,0
A3 (Cádiz)	97,43		44,33	45,5	40,75	41,8	40,52	41,6	72,81	74,7

Tabla 05. Demanda energética total anual.

En cuarto lugar se ha analizado una fachada convencional de dos hojas de ladrillo con cámara. Se define mediante una hoja exterior de ½ pie de ladrillo perforado caravista, aislamiento térmico de conductividad 0,04 W/m°C y 4,8 cm de espesor, tabicón de ladrillo hueco doble de 7 cm y enlucido de yeso de 1,5 cm al interior. La transmitancia de este cerramiento es 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 CTE (España) . 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. Sus valores se encuentran recogidos en la tabla 2.

3.2. 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 todos los climas la diferencia de perfiles de demanda entre las soluciones con mayor masa térmica y 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 la demanda de calefacción de el muro de BTC de laboratorio con respecto a cualquiera de las otras soluciones de fachada (tabla 3), la demanda energética que genera este muro es siempre muy superior a la de cualquier otra solución independientemente de la zona climática en la que se encuentre, excepto en el caso de Tenerife (clima cálido), 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 sin estabilizar 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 HE1 para la zona climática A.

En el caso de las demandas de refrigeración (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 sin estabilizar 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 del HE-1.

Si miramos la demanda energética total anual, suma de las demandas de refrigeración y calefacción (tabla 5), podemos observar que los ahorros energéticos obtenidos en refrigeración son pequeños con respecto a las demandas de calefacción. No obstante, si comparamos la demanda debida al muro de BTC sin estabilizar y las demandas con las transmitancias límite del HE-1, observamos que estas tienden a acercarse en las zonas cálidas y a alejarse en las zonas frías, de manera que en 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 límites 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 estabilizado con cáñamo 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.

4. 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 si solo suficiente para asegurar demandas energéticas menores a las de referencia, salvo en climas muy puntuales como el caso de Tenerife (clima cálido), donde el muro de BTC asegura unas demandas mas bajas.

Podemos asegurar que las soluciones en tierra se adaptan mejor a los climas de la zona A3, correspondientes a los de veranos más calurosos e inviernos menos fríos. El muro de BTC mezclado con cáñamo es el que mejor resultados ha presentado en todas las simulaciones gracias a su baja conductividad y gran capacidad calorífica.

Concluimos por tanto que el BTC es un material con grandes cualidades estructurales y tectónicas, cuyas propiedades térmicas pueden ser mejoradas a costa de su resistencia, para su uso como muro estructural y de cerramiento de una sola hoja. Se ha demostrado que en combinación con ciertos aditivos, estabilizantes, o incluso en simbiosis directa con un material aislante, puede mejorar sensiblemente las demandas asociadas al cerramiento y las condiciones de confort interior, al funcionar como amortiguador de los cambios bruscos de temperatura.

Se considera de gran interés para la arquitectura de alta eficiencia energética la mejora en las condiciones de aislamiento térmico de materiales de construcción en base tierra mediante la investigación de la adición de nuevos componentes.

El procedimiento aquí expuesto podrá seguirse para el estudio de tipos de muros de cerramientos habituales en Ecuador. Los muros de BTC, aunque no aparecen directamente recogidos en la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC, sin son asimilables a la norma NEC-11, Capítulo 6.- Mampostería Estructural, editada por el MIDUVI, Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, Ecuador.

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, pp. 5-20.

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, pp.117-126. doi: 10.3989/ic.10.024 JOVÉ SANDOVAL, F., MUÑOZ DE LA CALLE, D., PAHINO RODRÍGUEZ, L. (2010). *Ensayos de Erosión hídrica sobre muros de tierra (fábrica de BTC). Método, resultados y discusión*. Construcción con Tierra, Tecnología y Arquitectura. Valladolid 2011, pp. 193-204.

JOVÉ SANDOVAL, F., CAVERO RODRÍGUEZ, D. (2012). *Comportamiento termodinámico de muros de BTC en función del clima*. Actas del Congreso de Arquitectura de Tierra Tradición e Innovación, CIATTI 2012, Cuenca de Campos, Valladolid.

JUSTO, G.N., (2010). *¿Sostenibilidad? O Simplemente Sensatez*. Informes de la construcción, 62 (517), p. 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, pp. 27-37.

VAZQUEZ 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.

VV.AA., (2010). *Comportamiento térmico de construcciones en alvenaría de adobe: Ensayos experimentales sobre tres células de Teste a escala 1:4*. Valladolid. Actas de los congresos de arquitectura de tierra en Cuenca de Campos 2010/2011. La arquitectura construida en tierra: tradición e innovación.

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.

Norma EN 1745:2002. *Masonry and masonry products. Methods for determining design thermal values*.

Norma ISO 8990:1994. *Thermal insulation - Determination of steady-state thermal transmission properties - Calibrated and guarded hot box*

Norma UNE 41410:2008. *Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo*.

Norma UNE-EN ISO 10456:2001. *Materiales y productos para la edificación. Procedimientos para la determinación de los valores térmicos declarado*.