

ESTUDIO NUMÉRICO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE PAREDES CON BLOQUES MULTICELDA DE CEMENTO ALIGERADO

Eduardo González; Nastia Almao

Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura y Diseño (IFAD)

Universidad del Zulia, 4011-A-526 Maracaibo. Venezuela

Tel-Fax: (+58) 261.7598503

e-mail: egonzale@luz.ve

RESUMEN

Alcanzar condiciones de confort y adecuado comportamiento térmico de las edificaciones en climas calientes y húmedos, especialmente cuando se trata del acondicionamiento natural de viviendas, requiere, entre otras cosas, una apropiada selección de materiales en la construcción de las paredes. Una de las estrategias para limitar la ganancia de calor a través de estos cerramientos es utilizar componentes constructivos con múltiples cámaras de aire, debido a su propiedad aislante. En este sentido, el trabajo presenta un estudio comparativo de las características y del comportamiento térmico de tres tipos de bloques multiceldas; dos bloques con 3 y 6 cavidades respectivamente, fabricados con cemento y agregado liviano de arcilla expandida tipo ALIVEN y el bloque de arcilla tradicional de 9 cavidades. La simulación numérica, a partir del código EVITA 2D, basado en CFD, se ha utilizado para caracterizar el comportamiento térmico de cada componente constructivo. Ha sido analizado el efecto del acabado exterior y del régimen de ventilación, sobre las temperaturas características de cada configuración. Se ha demostrado la importante influencia de dichas variables sobre la evolución de las temperaturas superficiales e internas y, se ha confirmado la conveniencia, desde el punto de vista térmico, de incrementar el número de cavidades de 3 a 6 en el bloque ALIVEN.

ABSTRACT

To reach comfort conditions and appropriate thermal behavior of buildings in hot and humid climates, especially when it is the case of naturally ventilated housings, it requires, among other things, a suitable materials selection for the walls. One of the strategies to limit the heat gain through these walls is to use constructive components with multiple air spaces, due to their insulating property. In this sense, the work presents a comparative study of the characteristics and of the thermal behavior of three types of multicells blocks; two blocks with 3 and 6 cavities respectively, manufactured with cement and expanded clay, and the traditional clay block of 9 cavities. The EVITA 2D, a CFD based code, was used for numeric simulations to characterize the thermal behavior of each constructive component. The effect of the absorptance and the ventilation rate on the characteristic temperatures of each one of the configurations has been analyzed. It was demonstrated the important influence of those variables on the temperatures. The thermal convenience of increasing the number of cavities from 3 to 6 in the ALIVEN block has been confirmed.

1. INTRODUCCIÓN

El rol aislante de las cámaras de aire en los componentes constructivos de las edificaciones ha sido ampliamente investigado y documentado en literatura especializada. Disponer de cámaras de aire en

paredes, techos o pisos ha demostrado ser una buena mediada para reducir el flujo de calor a través de estos elementos. Muchos estudios han reportado las ventajas, desde el punto de vista térmico, de disponer de espacios de aire que representan un “freno” al flujo de calor por conducción; estos espacios obligan el intercambio térmico radiante y convectivo entre las superficies que rodean las cámaras de aire, disminuyendo la velocidad de propagación de la energía, producto de las diferencias de temperatura. Es por esta razón que, se ha propuesto estudiar las ventajas comparativas que podría tener la utilización de bloques fabricados con cemento y agregado liviano de arcilla expandida con dos filas de cámaras de aire, en vez del bloque tradicional del mismo material fabricado en Venezuela que presenta una sola fila de cámaras de aire en el sentido transversal de la pared. En este mismo estudio se comparan las características termofísicas y la performance térmica de los dos tipos de bloques mencionados con el bloque de arcilla de 15 cm de espesor y 9 cavidades, ampliamente utilizado en la industria de la construcción en el país.

Así pues, el propósito general del presente estudio es caracterizar, mediante la simulación numérica, el comportamiento térmico de cerramientos verticales exteriores contruidos con bloques multicelda de cemento y agregado liviano de arcilla expandida (ALIVEN). La simulación numérica ha sido realizada mediante el código computacional EVITA 2D (Almao y otros, 1998). Los objetivos específicos manejados han sido:

- Determinar analíticamente el valor de la transmitancia (U) por unidad de área de una pared construida con “Bloque Multicelda ALIVEN” (seis celdas), otra con “Bloque tradicional de Pared ALIVEN” (tres celdas) y otra con “Bloque tradicional de Arcilla” (nueve celdas), basado en coeficientes convectivos superficiales (h_e y h_i) seleccionados para el estudio.
- Establecer las diferencias de comportamiento térmico entre las paredes en estudio. En cada uno de estos tipos de paredes se estudia, además, el efecto, sobre la temperatura superficial y del aire interior, de colocar un revestimiento de arena y cemento en las superficies exterior e interior.
- Determinar las temperaturas características (ΔT_i , T_{max} , T_{min} , T_m , T_{st}) de los bloques estudiados, bajo tres condiciones de ventilación: 1- con infiltración de 0.5 vol/h; 2- con infiltración de 30 vol/h y con infiltración de 0.5 vol/h durante el día combinado con 30 vol/h durante la noche.

2. METODOLOGÍA

El estudio ha seguido un proceso metodológico que ha consistido en primer lugar en establecer los valores de conductividad equivalente (λ_e) y de transmitancia equivalente (U_e) de los dos bloques tipo ALIVEN y del bloque tradicional de arcilla, todos de 15 cm de espesor. Estos han sido considerados como parte de paredes, donde un conjunto de bloques semejantes se encuentran unidos entre si en la forma en que tradicionalmente se construye en el país. En esta primera parte han sido calculados igualmente la resistencia (R) y la capacidad térmica (CT) de cada tipo de pared. En segundo lugar, han sido simulados numéricamente tres sistemas (secciones de tres construcciones), todas con un techo muy aislado ($U=0.14 \text{ W/m}^2\text{K}$) y piso de concreto. Cada uno de estos sistemas, correspondiente a cada una de las paredes en estudio, ha sido simulado haciendo variar sus condiciones de acabado interior y exterior, así como, las condiciones de ventilación interior. Como herramienta de simulación se ha utilizado el programa computacional EVITA 2D. Se trata de un modelo bidimensional, basado en el método de los volúmenes de control, que permite resolver las ecuaciones de Continuidad, Cantidad de Movimiento y Energía, bajo régimen transitorio. Se consideran condiciones transitorias de contorno que incluyen la temperatura del ambiente, humedad relativa, radiación solar global sobre las superficies para el período de asoleamiento, intercambio radiativo de onda larga entre las superficies externas y el cielo, temperatura del suelo y la velocidad del viento. Posteriormente han sido analizados y discutidos los resultados para llegar a las conclusiones que se expresan finalmente.

2.1 Descripción de los Casos de Estudio

A continuación se describen las características de los tres tipos de bloques estudiados. Estos son: el bloque tradicional ALIVEN de tres cavidades (una sola fila de cámaras de aire), el bloque ALIVEN de seis cavidades (dos filas de cámaras de aire) y el bloque tradicional de arcilla de nueve cavidades (tres filas de cámaras de aire). Todos ellos con un espesor común de 0.15 m. En las figuras 1, 2, y 3, respectivamente, se observan los elementos constructivos motivo de este estudio. Estos bloques han

sido motivo de estudio en su estado original, es decir sin friso, y en segundo término revestidos de friso (arena y cemento) con un espesor de 15mm por cada lado y pintados de color blanco. Estas configuraciones han sido evaluadas bajo tres condiciones de intercambio de aire entre el interior del sistema y el ambiente: con 0.5 cambios de aire por hora ($N=0.5$), 30 cambios de aire por hora ($N=30$) y 0.5-30 cambios de aire por hora ($N=0.5-30$). En este último caso se aplican 0.5 cambios de aire por hora durante el día si la temperatura interior es inferior a la del ambiente, en caso contrario, se aplican 30 cambios por hora.

Bloque ALIVEN de 3 cavidades: Este tipo de bloque de cemento fabricado con agregado liviano tipo ALIVEN, presenta tres cavidades (Fig. 1). Estas se encuentran distribuidas en una fila abiertas en el sentido vertical. Sus dimensiones exteriores son: 0.15m de ancho, 0.20m de alto y 0.40m de largo. Las paredes exteriores tienen un espesor de 20mm y las interiores de 15mm. Por no contar con el valor propio de la absorptividad (α) del acabado exterior de este bloque, cuando se utiliza sin friso, esta ha sido establecida, a los fines de la simulación numérica, en un valor de 0.70 por representar un valor medio de los datos obtenidos de diferentes referencias bibliográficas (ASHRAE, 1993; González, 1997). Las características termofísicas del material con que se fabrica se pueden observar en la tabla 3.

Bloque ALIVEN de 6 cavidades: Este tipo de bloque no se fabrica en el país. Se ha tomado como punto de partida el bloque ALIVEN de tres cavidades al cual se le ha colocado una pared interna en el sentido longitudinal a los fines de crear una doble fila de cámaras de aire con tres cámaras cada una en el sentido vertical; el resultado es el bloque ALIVEN de seis cavidades (Fig. 2). El bloque se considera fabricado con el mismo material y las mismas dimensiones exteriores y de tabiques que el de tres cavidades. El valor de la absorptividad se considera igual al de tres cavidades.

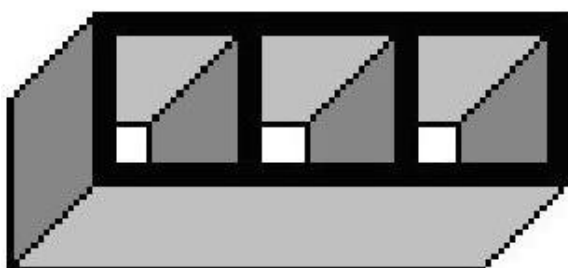


Fig. 1. Bloque ALIVEN de tres cavidades.

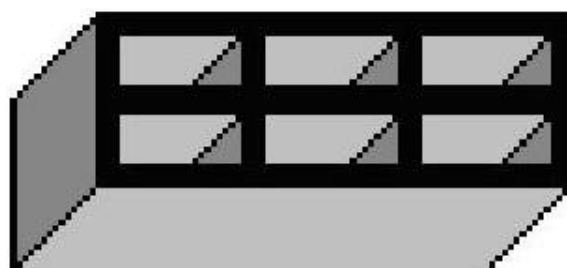


Fig. 2. Bloque ALIVEN de seis cavidades.



Fig. 3. Bloque tradicional de arcilla de nueve cavidades.

Bloque tradicional de arcilla de 9 cavidades: Este bloque de arcilla (figura 3), presenta nueve cavidades. Estas se encuentran distribuidas en tres filas, en el sentido transversal de la pared, con tres cámaras cada una de ellas. Sus dimensiones exteriores son: 0.15m de ancho, 0.20m de alto y 0.30m de largo. Los tabiques verticales tienen un espesor de 8mm y las horizontales de 6mm. Debido a no contar con el valor propio de la absorptividad (α) del acabado exterior de este bloque, cuando se utiliza sin friso, esta ha sido establecida, a los fines de la simulación numérica, en un valor de 0.78 por ser este un valor medio de los datos obtenidos de diferentes referencias bibliográficas.

2.2 Cálculo de Conductividades y Transmitancias Equivalentes

La determinación de los valores de las conductividades equivalentes de cada bloque se realizó considerando la convección natural dentro de las cavidades y la radiación intercambiada entre las superficies interiores, lo cual permitió determinar las resistencias correspondientes. Una vez definidas las resistencias individuales se calculó la resistencia total por el método de trayectorias en serie y en paralelo de transferencia de calor bajo régimen estacionario (ASHRAE, 1993). El resumen de los resultados de estos cálculos se presenta en la tabla 4.

2.3 Propiedades Termofísicas de los Materiales

A continuación se presentan las tablas con las características termofísicas de los materiales utilizados en la modelización de cada uno de los sistemas analizados. En ellas, el orden de los materiales va del interior hacia el exterior.

Tabla 1. TECHO del sistema de referencia

MATERIALES	ESPEJOR (m)	CONDUCTIVIDAD (w/mK)	CALOR ESPECÍF. (J/KgK)	DENSIDAD (Kg/m ³)
Plycem	0.012	0.360 (a)	1000 (a)	1050 (a)
Poliestireno	0.250	0.036 (a)	1500 (a)	41 (a)
Capa cemento	0.060	1.750 (a)	920 (a)	2300 (a)
Impermeabilización	0.003	1.150 (a)	1000 (a)	2325 (a)

Tabla 2. PISO del sistema de referencia

MATERIALES	ESPEJOR (m)	CONDUCTIVIDAD (w/mK)	CALOR ESPECÍF. (J/KgK)	DENSIDAD (Kg/m ³)
Cemento + arena	0.050	0.530 (a)	1000 (a)	1570 (a)
Concreto	0.100	1.750 (a)	920 (a)	2300 (a)
Suelo	1.000	0.200 (a)	850 (a)	2300 (a)

Tabla 3. PAREDES

MATERIALES	ESPEJOR (m)	CONDUCTIVIDAD (w/mK)	CALOR ESPECÍF. (J/KgK)	DENSIDAD (Kg/m ³)
Friso interior	0.015	0.698 (a)	975 (a)	1600 (a)
Bloques Aliven 3 cav.	0.150	0.499 (b)	$\rho C_p = 3.272 \cdot 10^6$ (b)	
Bloques Aliven 6 cav.	0.150	0.330 (b)	$\rho C_p = 3.952 \cdot 10^6$ (b)	
Bloques Arcilla 9 cav.	0.150	0.395 (b)	$\rho C_p = 5.427 \cdot 10^6$ (b)	
Friso exterior	0.015	0.698 (a)	975 (a)	1600 (a)
Cemento-Aliven		0.610 (c)	960 (d)	860 (e)
Arcilla		1.279 (a)	879 (a)	1460 (a)
Aire		0.034 (a)	1600 (a)	1.2 (a)

Fuentes: a) González (1997), b) Calculado, c) Facultad de Ingeniería UCV
d) CIHE, UBA. e) Premax C.A.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

Dos tipos de resultados hay que diferenciar: aquellos provenientes del cálculo de los valores de conductividad, resistencia, transmitancia y capacidad térmica equivalentes de cada tipo de bloque y pared estudiado, y los provenientes de la simulación del comportamiento térmico en régimen dinámico de los tres tipos de configuraciones de paredes estudiadas.

El primer grupo de resultados se presenta, en forma resumida, en la tabla 4 y en la figura 4. Al respecto, pueden hacerse los siguientes comentarios. Tomando como referencia la λ_e del bloque

ALIVEN 3C (0.4992 w/mK), el bloque ALIVEN 6C (0.3302 w/mK) tiene una conductividad térmica equivalente 34% inferior. Esto se traduce en términos de su transmitancia equivalente en un 25% y 23% inferior al bloque 3C sin friso y con friso respectivamente. Cuando comparamos estos valores con los del bloque de arcilla 9C, observamos que, el bloque ALIVEN 3C tiene una λ_e y una U_e 26% y 17% respectivamente superior al de arcilla, en cambio el Bloque ALIVEN 6C resulta 8% y 9% respectivamente inferior al bloque de arcilla en los valores de λ_e y U_e .

Otro aspecto a resaltar es la capacidad térmica (CT) de las paredes con estos tres tipos de bloques. Aquí vemos (Tabla 4) que la pared de bloques de arcilla tiene una CT 66% y 37% superior a las paredes de bloques ALIVEN 3C y 6C respectivamente. Si bien el bloque ALIVEN 3C representa un volumen de material de $0.062 \text{ m}^3/\text{m}^2$, es decir 34% superior al del bloque de arcilla que es de $0.046 \text{ m}^3/\text{m}^2$, su CT es inferior debido a que la CT del concreto aligerado es aproximadamente la mitad que la de la arcilla. Estas diferencias en la capacidad térmica de las paredes representa igualmente diferencias en términos del “aislamiento capacitivo” que influye en el flujo de calor a través de los elementos constructivos sometidos a cambios periódicos de las solicitaciones térmicas.

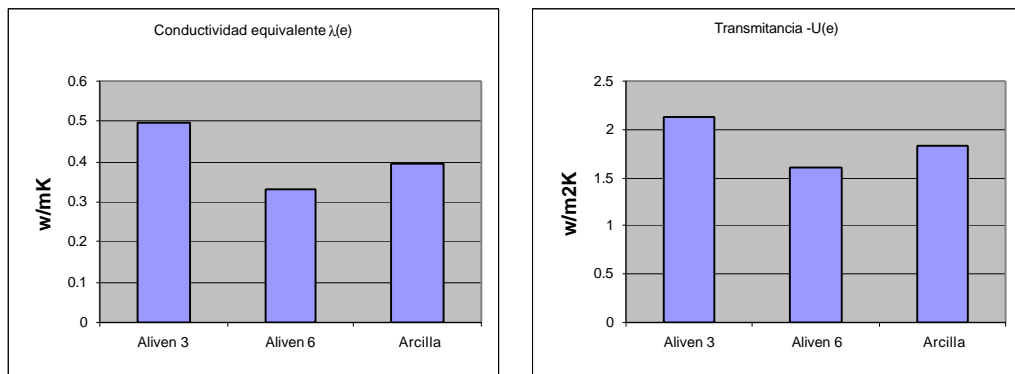


Fig.4.- Conductividad y transmitancia equivalente calculados para los tres tipos de bloques.

Tabla 4. Resumen de resultados de cálculos y de simulación numérica.

Caso	l (e)	R(e)	U(e)	CT	Tmax	Tmin	Tm	ΔT	N	Acabado Exterior
1	0.4992	0.3004	2.1258	49.03	36.9	29.9	33.6	7.0	0.5	S/F
					34.4	28.0	31.1	6.4	30	
					34.4	28.0	31.1	6.4	0.5-30	
	0.3432	1.9485	49.03	32.7	30.0	31.4	2.7	0.5	C/F	
				33.1	28.1	30.4	5.0	30		
				32.0	27.9	30.2	4.1	0.5-30		
2	0.3302	0.4542	1.6018	59.2	36.5	30.4	33.7	6.1	0.5	S/F
					34.1	28.2	31.1	5.9	30	
					34.1	28.2	31.1	5.9	0.5-30	
	0.4970	1.4992	59.2	32.5	30.2	31.5	2.3	0.5	C/F	
				33.2	28.1	30.4	5.1	30		
				31.8	28.3	30.2	3.5	0.5-30		
3	0.3955	0.3792	1.8208	81.4	37.1	30.9	34.1	6.2	0.5	S/F
					34.1	28.4	31.2	5.7	30	
					34.1	28.4	31.2	5.7	0.5-30	
	0.4220	1.6889	81.4	32.5	30.5	31.5	2.0	0.5	C/F	
				33.2	28.3	30.4	4.9	30		
				31.8	28.2	30.2	3.6	0.5-30		

La tabla 4 presenta el resumen de resultados de las temperaturas características (T_{max} , T_{min} , T_m y ΔT) relativas a las simulaciones numéricas realizadas para estudiar el comportamiento térmico de cada tipo de pared bajo régimen dinámico. En esta tabla resumen se indican, para cada pared, los resultados correspondientes a cada régimen de ventilación, diferenciados de acuerdo al acabado exterior.

Las valores más elevadas de T_{max} , T_{min} y T_m se observan en el caso de la pared de bloque de arcilla sin friso y sin ventilación ($N=0.5$), mientras que la máxima ΔT se observa en la pared tipo ALIVEN

3C, sin friso y sin ventilación. Sin embargo, las diferencias entre estos valores máximos y las de las otras dos paredes, no son significativas en los mismos casos. En las figuras 5-7 se presentan las gráficas de la evolución horaria de la temperatura interna de algunos de los casos simulados. Del análisis de estos resultados se evidencia la importante influencia del régimen de ventilación y del acabado de la superficie exterior de las paredes sobre la dicha temperatura.

Al comparar el comportamiento de las paredes con bloques ALIVEN de 3C con las de 6C, frisadas y pintadas de blanco (Fig. 5), vemos que, ambas tienen temperaturas similares y cercanas a la temperatura del ambiente, cuando el espacio interno está sometido a una ventilación continua de 30 vol/h. En cambio, cuando el espacio no es ventilado la amplitud de la temperatura interna se reduce aproximadamente a la mitad de la exterior, siendo en el caso de 6C ligeramente inferior al caso de 3C.

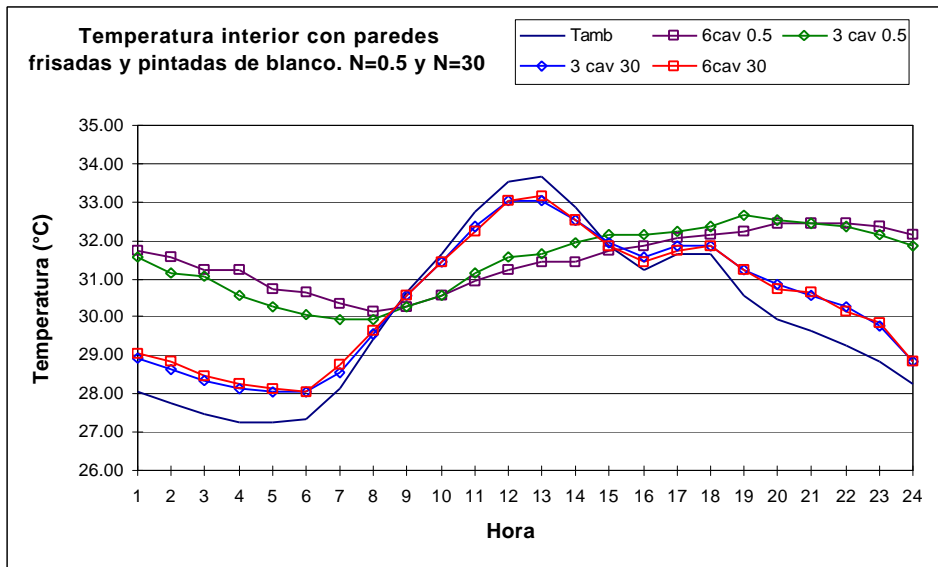


Fig. 5. Temperaturas del Ambiente e interiores con paredes con bloques de ALIVEN 3C y ALIVEN 6C, frisadas y pintadas de color blanco, con N= 0.5 c/h y 30 c/h.

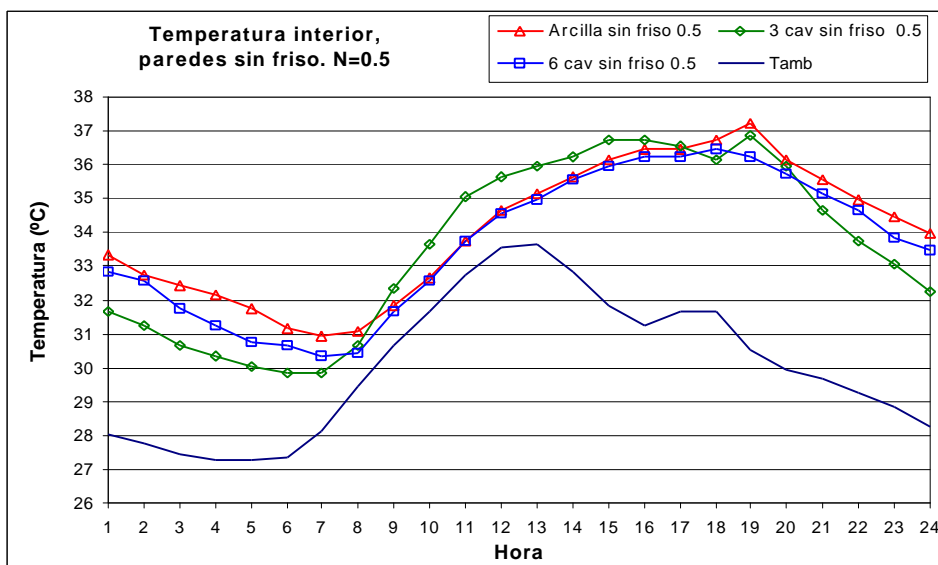


Fig. 6. Temperaturas simuladas en los tres casos sin friso y N= 0.5 v/h.

Se confirma que, las diferencias en las propiedades térmicas de los tres tipos de bloques, no representan diferencias de comportamiento de la temperatura interna, cuando el espacio es ventilado continuamente y si las paredes son frisadas y pintadas de blanco; los tres tipos de bloques tienen una

influencia similar sobre la temperatura interior. Bajo estas condiciones el intercambio de masa interior tiene el mayor peso sobre la temperatura resultante.

Cuando las paredes no son frisadas y especialmente en los casos de muy poca ventilación o sin ventilación, como en la figura 6, las diferencias de temperaturas entre los tres tipos de paredes se manifiestan de forma más clara. En este caso se observan diferencias de hasta 2°C durante la noche, cuando el bloque de arcilla, de mayor ganancia de calor y capacidad térmica se mantiene por encima de los casos de 3C y 6C. En este caso, el bloque de 6C es siempre, ligeramente inferior al bloque de arcilla, e inferior al bloque ALIVEN 3C durante las horas de día (8am-8pm). Estas diferencias casi desaparecen cuando estos ambientes son ventilados en forma continua (Fig. 7).

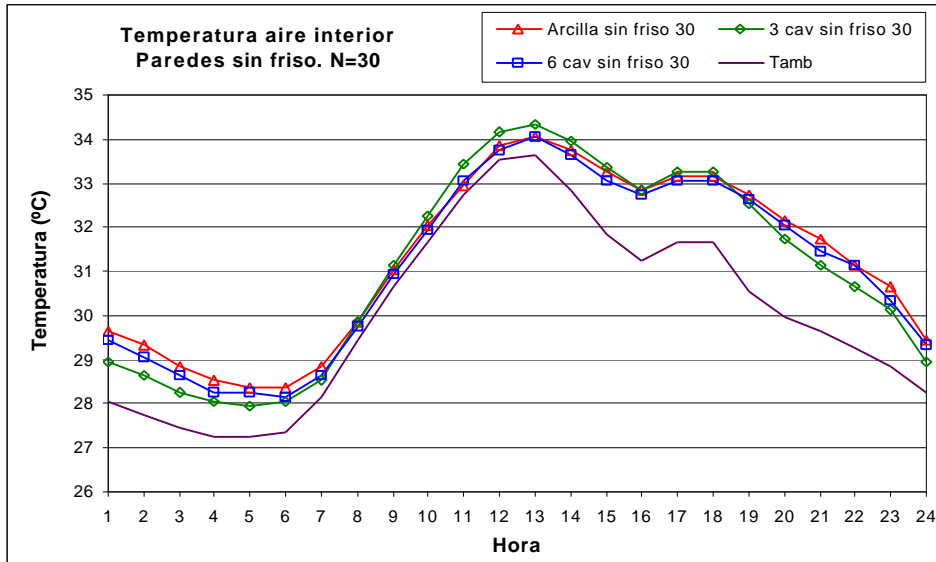


Fig. 7. Temperaturas simuladas en los tres casos sin friso y N= 30 v/h.

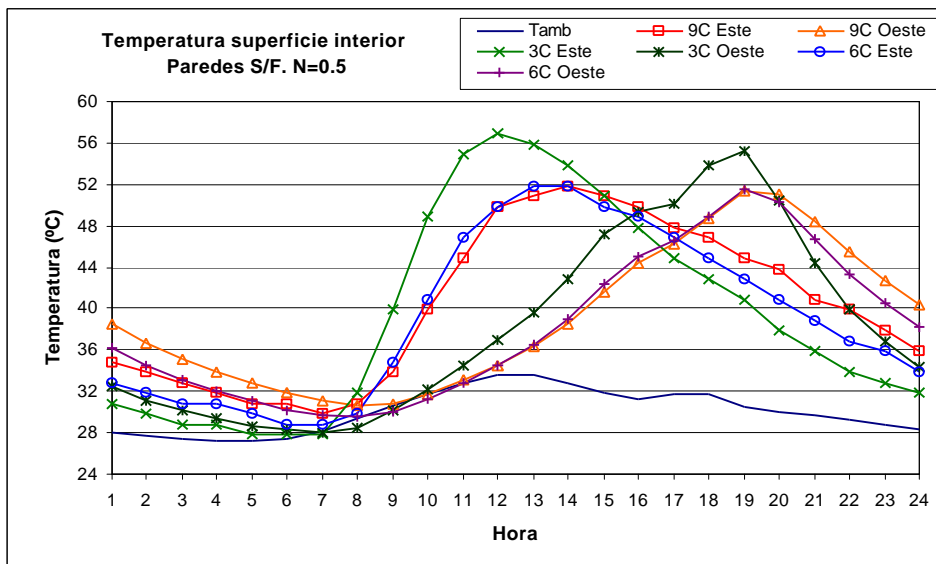


Fig. 8. Temperaturas superficiales interiores en fachadas este y oeste, sin friso y N= 0.5 v/h.

Otro aspecto muy importante de revisar, es el relativo a la temperatura superficial interior de las paredes. Cuando se comparan, en la figura 8, dichas temperaturas en las orientaciones este y oeste, con paredes sin friso y sin ventilación, se observan diferencias significativas que llegan a alcanzar en ciertos momentos del día hasta 10°C, como es el caso a las 11am, entre el bloque ALIVEN 3C y el bloque de arcilla. Los tres casos de paredes, sin friso, sin ventilación y expuestos al sol, como han sido estudiados, alcanzan temperaturas durante la mayor parte del día y la mayor parte de las horas de la noche indeseables desde el punto de vista del confort en las edificaciones. En el mismo caso puede

observarse que, es en las paredes de la fachada este, y especialmente con el bloque ALIVEN 3C, donde se alcanzan las temperaturas mínimas superficiales en horas nocturnas (desde las 17h hasta las 7h). Esta situación se invierte en las horas diurnas donde los bloques más aislantes, en la fachada oeste, presentan las menores temperaturas superficiales.

4. CONCLUSIONES

Se ha comprobado, al comparar los resultados de los cálculos de la conductividad, resistencia y transmitancia equivalentes, que resulta ventajoso incrementar el número de cavidades del bloque ALIVEN de 3 a 6 cavidades, por cuanto la resistencia del bloque aumenta de $0.30 \text{ m}^2\text{K/W}$ a $0.45 \text{ m}^2\text{K/W}$, es decir un 51%, lo que representa una disminución del 34% en su conductividad equivalente y del 25% en su transmitancia equivalente.

En relación con el bloque de arcilla de 9 cavidades, el bloque ALIVEN 6C tiene ventajas comparativas al ser su Re aproximadamente 20% superior y por presentar valores de conductividad y transmitancia equivalentes inferiores en 8% y 9% respectivamente. Los valores de λ_e y U_e del bloque ALIVEN 6C son inferiores a los de los otros bloques estudiados y, como consecuencia, los valores de Re son superiores a los mismos.

Se ha observado que las diferencias en las propiedades térmicas de los tres tipos de bloques, conducen a pequeñas diferencias en la temperatura interna, tan solo cuando el espacio no es ventilado. En este caso, la diferencia de temperatura es mayor si las paredes presentan su acabado original y se hace menor si son frisadas y pintadas de blanco; consecuencia lógica de las diferencias de la absorptividad. De este modo, queda demostrada la importante influencia del régimen de ventilación y del acabado de la superficie exterior de las paredes sobre la temperatura interior. Los valores más elevados de T_{max} , T_{min} y T_m se observan en el caso de la pared de bloque de arcilla sin friso y sin ventilación ($N=0.5$), mientras que la máxima ΔT se observa en la pared tipo ALIVEN 3C, igualmente sin friso y sin ventilación.

La temperatura superficial interior de las paredes ha sido revisada y analizada. Los resultados son coherentes con las propiedades térmicas de los materiales. Se concluye sobre la conveniencia de utilizar acabados de baja absorptividad en la superficie exterior de los tres tipos de bloques, si estos van a estar expuestos al sol, debido a las altas temperaturas alcanzadas cuando se utilizan en su condición original. En este sentido, el Bloque ALIVEN 6C, con un comportamiento ligeramente superior al bloque de arcilla, resulta muy superior al bloque ALIVEN 3C.

5. AGRADECIMIENTO

Este trabajo fue realizado con el financiamiento de la empresa venezolana Agregados Livianos C.A. (ALIVEN); expresamos nuestro agradecimiento a esta institución.

6. REFERENCIAS

- Agregados Livianos C.A., ALIVEN (1999) Catálogos informativos de productos y sus características.
- Almao, N., Rincón J. and González E. (1998) EVITA: Computational model for evaluating buildings thermal efficiency. Revista Técnica Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, 21, 1, 74-84.
- ASHRAE (1993) ASHRAE Handbook of Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta.
- Bejan, A, (1993) Heat Transfert. John wiley & Sons, Inc. N.Y.
- CSTB, (1987) Documento técnico unificado –Reglas Th-K77-, Reglas de cálculo de las características térmicas útiles de paredes de construcción, CSTB, Paris.
- González, E. (1997) Étude de matériaux et de techniques de refroidissement passif pour la conception architecturale bioclimatique en climat chaud et humide, Thèse de doctorat en Energétique de l'Ecole des Mines de Paris.
- PREMAX C.A., (1999) Plafácil de PREMAX. Catalogo de Productos y características físicas.