

# SELECCION DE MATERIALES EN LA CONCEPCION ARQUITECTONICA BIOCLIMÁTICA

**Dr. Arq. Eduardo Manuel González Cruz**

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](mailto:egonzale@luz.ve)

**Título reducido**

## **MATERIALES Y DISEÑO BIOCLIMÁTICO**

**Palabras claves:** Materiales; Propiedades térmicas; Difusividad; Efusividad; Diseño bioclimático; Acondicionamiento natural; enfriamiento pasivo.

El conocimiento de los materiales de construcción y su correcta selección, desde el punto de vista térmico, resulta de gran importancia cuando se busca reducir el consumo de energía en los edificios enfriados o calentados por medios mecánicos. Ahora bien, ello resulta indispensable cuando se trata de obtener condiciones de confort térmico por medios pasivos o naturales en el interior de las edificaciones. Este es uno de los propósitos del diseño arquitectónico bioclimático que tiene como premisa dar respuesta a los requerimientos de habitabilidad del ser humano, interpretando las condiciones ambientales del lugar, aprovechando sus bondades y haciendo uso de fuentes naturales de energía. En síntesis, diseñar con el clima, y dentro de una concepción actual, diseñar con el ambiente.

El diseño de los componentes constructivos de una edificación requiere, no solo de consideraciones estéticas, estructurales o económicas, entre otras, sino también de consideraciones térmicas. Las características termo-físicas de los materiales a utilizar para el logro de condiciones de confort o para disminuir la carga térmica en climas cálidos, así como el régimen de ventilación de los locales, deben ser decididos en el contexto microclimático y en función del modo de ocupación de la edificación.

En un local, la temperatura interior resulta del equilibrio entre los aportes y las pérdidas de calor en el mismo. En ausencia de un sistema de climatización, la evolución de la temperatura interna depende, en buena medida, de los flujos de calor que por conducción son transferidos a través de los cerramientos opacos (techo, paredes y piso). La conductividad térmica y el calor específico volumétrico de los materiales, además de las características superficiales de los cerra-

mientos, determinan la ganancia de calor en el interior del recinto a través de ellos. La edificación está sometida al efecto periódico de la radiación solar incidente y de la temperatura exterior. Bajo estas condiciones exteriores variables, los materiales utilizados regulan la entrada y la salida de calor de acuerdo con dos parámetros complejos que caracterizan todo material: la difusividad térmica y la efusividad térmica. Su comprensión resulta de gran utilidad para entender el comportamiento térmico de los materiales, especialmente, bajo un enfoque bioclimático, cuando se desea obtener el máximo beneficio de esa tercera piel del ser humano, la envolvente de la edificación.

Las recomendaciones relativas a los tipos de materiales a utilizar en la construcción de edificaciones, dependiendo del tipo de clima, son a menudo expresadas en la literatura existente, en términos de tan solo una de sus características térmicas. Utilizar materiales aislantes, o materiales livianos o pesados, de gran capacidad térmica o poca capacidad térmica, son algunas de esas recomendaciones a las que se hace referencia. Tales sugerencias no deben ser únicamente basadas en tan solo una de sus propiedades térmicas, en forma independiente, pues todo material combina esas propiedades como una unidad. Un material aislante (baja conductividad térmica) tiene también determinados valores de densidad y de calor específico, que lo pueden diferenciar de otro material aislante, aun cuando su conductividad sea igual; basta que la densidad de ambos materiales sea diferente para que tengan comportamientos térmicos igualmente diferentes. Si para un valor de conductividad térmica existe una gama de materiales con diferentes valores de calor específico volumétrico, entonces, no se debe hablar de materiales partiendo tan solo de una de sus propiedades térmicas. Por esta razón, resulta necesario ser mucho más preciso al indicar las características térmicas de los materiales recomendados. Como se verá más adelante en esta sección, se propone el gráfico de correlación entre la difusividad y la efusividad térmicas como una herramienta de ayuda para la selección de materiales durante la fase de diseño.

Esta sección tiene como propósitos: definir las características térmicas elementales de los materiales, entre ellas la difusividad y la efusividad térmicas, para orientar al diseñador en la selección adecuada de los materiales de construcción; caracterizar el comportamiento térmico de materiales y componentes constructivos (paredes homogéneas y paredes compuestas de dos materiales), bajo solicitaciones dinámicas como las condiciones climáticas cálidas y húmedas de Maracaibo, Venezuela, sobre la base de resultados de simulaciones numéricas, de manera de observar la influencia de las características térmicas de los materiales sobre la variación de la temperatura del aire al interior de un recinto.

## 1. Características térmicas de los materiales.

Las características térmicas fundamentales de los materiales son: la *conductividad térmica* ( $\lambda$ ), la *densidad* ( $\rho$ ), el *calor específico* ( $Cp$ ), el *calor específico volumétrico* ( $\rho Cp$ ), la *difusividad térmica* ( $a$ ) y la *efusividad térmica* ( $b$ ).

El proceso de conducción de calor se produce de manera espontánea desde los cuerpos más calientes hacia los cuerpos más fríos, cuando estos entran en contacto, o desde la parte más caliente hacia la parte más fría dentro de un mismo cuerpo.

La relación fundamental que describe el fenómeno de la conducción fue propuesta por Joseph Fourier y se le conoce como ley de Fourier. Su enunciado expresa que, “en cualquier lugar de un medio isótropo, la densidad del flujo térmico instantáneo es proporcional a la conductividad térmica del material ( $\lambda$ ) y a su gradiente de temperatura. (Sacadura, 1982):

$$\varphi = -\lambda \text{ grad } T$$

La *conductividad térmica* ( $\lambda$ ) expresa la capacidad del material para conducir el calor, y es por definición, el cociente de la densidad del flujo térmico y del gradiente de temperatura (W/mK). El rango de los valores de conductividad en los materiales es muy amplio. Entre los menos conductores o aislantes, como la espuma de poliuretano (0.026 W/mK), y los más conductores, como el cobre (389 W/mK), existe una relación de 1 a 15000. Sin embargo, para los llamados materiales de construcción, incluidos los aislantes, esta relación es de solo 1 a 135. Véase la tabla 1 que presenta un resumen de 28 materiales con sus propiedades térmicas, entre los cuales se encuentran la gran mayoría de los materiales que tradicionalmente se utilizan en la construcción de edificaciones.

La *densidad* ( $\rho$ ), o masa volumétrica de un material, define el cociente entre la cantidad de masa (kg) que caracteriza el material y el volumen unitario ( $m^3$ ). Su valor se mide en  $kg/m^3$ . En este caso el rango de valores, si se incluyen los metales, guarda una relación de 1 a 600, bastante menor que en la conductividad; estos varían desde 5 a 30  $kg/m^3$  en los aislantes hasta 8900  $kg/m^3$  en el cobre. En cambio, la relación es de 1 a 170 si se consideran solamente los materiales de construcción, relación muy cercana a la observada en la conductividad.

El *calor específico* ( $C_p$ ) es la característica del material que expresa la cantidad de calor necesario (J) para aumentar un grado (1K) la temperatura de una unidad de masa (kg); se mide en J/kgK. El calor específico caracteriza la capacidad de un material para acumular calor. Su valor, que depende naturalmente del material, tiene un rango de variación bastante pequeño para la mayoría de los materiales de construcción (1 a 4); el rango está comprendido entre 500 y 2000 J/kgK y pocos materiales salen de este rango. Un caso especial es el del agua, cuyo calor específico es particularmente elevado (4187 J/kgK). Debido a esto, el agua es utilizada como medio de almacenamiento térmico en múltiples aplicaciones.

Tabla 1. Lista de materiales y sus propiedades térmicas a temperatura ambiente.

	Material	$\lambda$	$\rho$	$C_p$	$a$	$b$
		W/mK	kg/m <sup>3</sup>	J/kgK	m <sup>2</sup> /s	J/m <sup>2</sup> K s
1	Poliuretano	0,026	30	1400	6,19E-7	3,30E+1
2	Aire	0,026	1,223	1063	2,02E-5	5,85E+0
3	Poliestireno	0,035	50	1675	4,18E-7	5,41E+1
4	Espuma fenólica	0,038	30	1400	9,05E-7	3,99E+1
5	Lana de vidrio	0,041	200	656	3,13E-7	7,33E+1
6	Corcho comprimido	0,085	540	2000	7,87E-8	3,03E+2
7	Mortero de cemento	0,090	1920	669	7,01E-8	3,40E+2
8	Madera de construcción	0,130	630	1360	1,52E-7	3,34E+2
9	Madera de pino	0,148	640	2512	9,19E-8	4,87E+2
10	Madera pesada	0,200	700	1250	2,29E-7	4,18E+2
11	Concreto celular	0,220	600	880	4,17E-7	3,41E+2
12	Tierra con paja	0,300	400	900	8,33E-7	3,29E+2
13	Concreto celular	0,330	800	880	4,69E-7	4,82E+2
14	Yeso	0,488	1440	837	4,05E-7	7,67E+2
15	Mortero cemento/arena	0,530	1570	1000	3,38E-7	9,12E+2
16	Agua	0,582	1000	4187	1,39E-7	1,56E+3
17	Ladrillos de arcilla	0,814	1800	921	4,91E-7	1,16E+3
18	Tierra muro portante	0,850	2000	900	4,72E-7	1,24E+3
19	Vidrio plano	1,160	2490	830	5,61E-7	1,55E+3
20	Arcilla	1,279	1460	879	9,97E-7	1,28E+3
21	Piedra arenisca	1,300	2000	712	9,13E-7	1,36E+3
22	Concreto pesado	1,750	2300	920	8,27E-7	1,92E+3
23	Piedra	1,861	2250	712	1,16E-6	1,73E+3
24	Mármol	2,900	2590	800	1,40E-6	2,45E+3
25	Granito	3,500	2500	754	1,86E-6	2,57E+3
26	Acero	50	7800	512	1,25E-5	1,41E+4
27	Aluminio	160	2800	896	6,38E-5	2,00E+4
28	Cobre	389	8900	385	1,13E-4	3,65E+4
	<b>Máx</b>	389,000	8900	4187	1,13E-4	3,65E+4
	<b>Mín</b>	0,026	1	385	7,01E-8	5,85E+0
	<b>Rango</b>	388,974	8899	3802	1,13E-4	3,65E+4

Estas tres propiedades enunciadas son las características elementales de cualquier material desde el punto de vista térmico. El estudio del comportamiento de los materiales en régimen dinámico obliga la introducción de otras características complejas de los mismos (combinación de las características elementales) que permiten su caracterización cuando están sometidos a los cambios cíclicos del clima de un lugar.

La primera de ellas es el producto del calor específico por la densidad, conocida como el *calor específico volumétrico* ( $\rho C_p$ ). Este caracteriza la “capacidad de almacenamiento de calor” o “capacidad térmica volumétrica de un material”. Dado que el calor específico varía muy poco entre los materiales, la capacidad de almacenamiento de calor depende estrechamente de la densidad de los mismos. Por esta razón se hace referencia a los muros de piedra, concreto o ladrillo, como de alta capacidad de almacenamiento de calor, a diferencia de los tabiques ligeros, de materiales aislantes o compuestos.

Otras dos características de los materiales deben ser definidas y comprendidas para entender su comportamiento dinámico. Estos son la *difusividad térmica* ( $a$ ) y la *efusividad térmica* ( $b$ ). “Si la *difusividad* ( $a$ ) y la *efusividad* ( $b$ ) son parámetros complejos donde los valores dependen de la

combinación  $a = \lambda/\rho Cp$  y  $b = (\lambda\rho Cp)^{1/2}$  de los parámetros simples  $\lambda$  y  $Cp$ , bien definidos y expresando cada uno una propiedad física de los materiales, ellos expresan también propiedades físicas de los materiales:

$a = \lambda/\rho Cp$  expresa la capacidad de un material para transmitir una variación de temperatura y  $b = (\lambda\rho Cp)^{1/2}$  expresa la capacidad de un material para absorber o restituir un flujo de calor o potencia térmica” (Lavigne, 1994).

A diferencia de  $\rho$  y  $\rho Cp$ , que expresan la capacidad de almacenamiento de calor de un material, la difusividad térmica expresa la noción de “velocidad de difusión”, noción que tiene que ver con la difusión de una temperatura en un material. Sometido a un cambio de temperatura, un material verá su temperatura variar más rápidamente en la medida que mayor sea su difusividad térmica. Para un intervalo de temperatura suficientemente pequeño, se puede considerar que  $\lambda$  es constante, entonces la ecuación de conservación de la energía, en conducción pura, puede escribirse como:

$$\begin{aligned}\rho Cp(dT/dt) &= \lambda \Delta T \\ dT/dt &= a \Delta T\end{aligned}$$

donde el coeficiente  $a = \lambda/\rho Cp$  es llamado *difusividad térmica* y su dimensión es: m<sup>2</sup>/s. Es evidente que la difusividad térmica crecerá con el aumento de la conductividad y con la disminución del calor específico volumétrico. El rango de variación de la difusividad es, salvo algunos casos especiales, de aproximadamente 1 a 12 para los materiales de construcción, incluidos los aislantes. Es interesante comprobar, como puede verse en la tabla 1 y en la figura 5, que materiales tan diferentes como el granito y el poliestireno expandido tengan valores de difusividad semejantes y, en consecuencia, el mismo comportamiento en relación con la variación de la temperatura interna al ser sometidos a un cambio de temperatura igual en ambos.

La otra característica tiene que ver con la efusión de una potencia térmica dentro de un material, es decir el flujo de calor que el material absorbe de acuerdo a su estado térmico. Consideremos un material de dimensión semi-infinita a una temperatura uniforme  $T_0$ . La superficie del material es llevada bruscamente a una temperatura  $T_1$ . El cálculo de la densidad de flujo que pasa a través de la superficie puede hacerse a partir de la Ley de Fourier (Sacadura 1982):

$$\varphi_0 = -\lambda(dT/dt)_{x=0} = (T_1 - T_0)(\lambda\rho Cp/\pi t)^{1/2} = b (T_1 - T_0/(\pi t)^{1/2})$$

donde  $b = (\lambda\rho Cp)^{1/2}$  es la *efusividad térmica* del material en (J/m<sup>2</sup>Ks<sup>1/2</sup>). La densidad de flujo (flujo térmico por unidad de área, W/m<sup>2</sup>) que penetra en el material es proporcional a su efusividad.

Estas dos características fundamentales de todo material, la difusividad y la efusividad, son motivo de interesante explicación mediante analogías hidráulicas por Lavigne (1994).

Con la intención de familiarizarse con las propiedades de los materiales y la relación entre ellas, se han preparado tres gráficos que corresponden a las correlaciones entre:  $\lambda$ ,  $\rho$  y  $Cp$  (Fig. 1, 2 y 3) a partir de una base de datos de 104 materiales.

En la figura 1, donde se relacionan la conductividad térmica y el calor específico, puede observarse un alto grado de correlación entre ambas variables. Existe una tendencia de crecimiento exponencial en la conductividad a medida que la densidad del material aumenta. Esto es explicado por algunos autores como el efecto del contenido de aire dentro de los materiales. La mayor o menor cantidad de aire dentro de un material determina su conductividad. El aire es un mal conductor térmico, por ello, cuanto más aire contiene un material mas dificultad presenta a la transmisión de calor y menor es su conductividad.

El gráfico de correlación entre la conductividad térmica y el calor específico (Fig. 2) permite observar la poca variación de este último frente a la conductividad. También se observa que los

materiales más conductivos presentan los menores valores de calor específico y los materiales más livianos y aislantes, los mayores valores de calor específico. El agua, como ya ha sido comentado con anterioridad, se destaca a la derecha del gráfico debido a su alto valor de  $Cp$ .

Al relacionar los valores de calor específico con los de densidad de los materiales (Fig. 3) se observa el mismo tipo de correlación que entre  $\lambda$  y  $Cp$  pero con un ligero aumento de la dispersión entre ambas variables. Esto se debe a que los rangos de valores de la conductividad y la densidad de los materiales de construcción son bastante cercanos, 1 a 135 y 1 a 170 respectivamente, mientras que el rango de  $Cp$  es de 1 a 4, constante en las dos correlaciones.

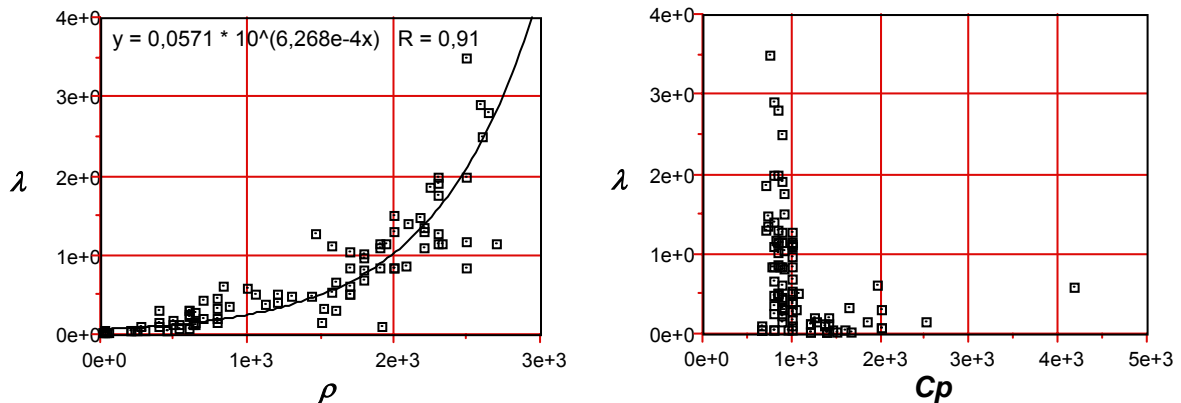


Fig.1. Correlación entre la conductividad térmica ( $\lambda$ ) y la densidad ( $\rho$ ) de los materiales.

Fig.2. Correlación entre la conductividad térmica ( $\lambda$ ) y el calor específico ( $Cp$ ) de los materiales.

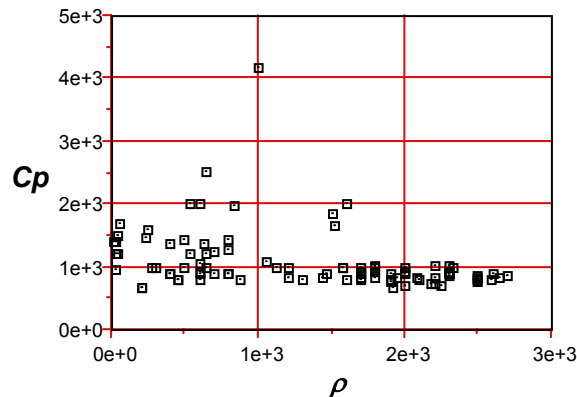


Fig.3. Correlación entre el calor específico ( $Cp$ ) y la densidad ( $\rho$ ) de los materiales.

Se han preparado dos gráficos de correlación entre los valores de difusividad y los de efusividad de 104 materiales (González 1997), con la finalidad de contar con una herramienta gráfica que permita orientar al diseñador en la tarea de seleccionar los materiales de construcción dentro de una óptica bioclimática. Además, podría servir para visualizar las zonas de correlación (combinaciones de  $a$  y  $b$ ) que podrían ser susceptibles de interés para el desarrollo de nuevos materiales, conocida la influencia de estos dos parámetros sobre el comportamiento de los materiales, dependiendo de las solicitaciones térmicas.

En la figura 4, el primer gráfico de correlación entre la difusividad y la efusividad térmicas a escala logarítmica permite observar la relación existente entre los dos parámetros para diferentes materiales. En este gráfico se incluyen: el aire, los materiales aislantes, los materiales comunes en

la construcción y algunos metales. En general, se puede decir que, para valores bajos de efusividad ( $0 < b < 300$ ), a medida que esta aumenta la difusividad disminuye exponencialmente, y que, para valores altos de efusividad ( $b > 1000$ ) la difusividad crece exponencialmente. En cambio, la correlación con la difusividad es muy dispersa para valores intermedios de efusividad ( $300 > b > 1000$ ).

En el segundo gráfico de correlación (Fig. 5) se presentan los materiales aislantes y los de construcción. Esta última correlación permite comprender de manera mucho más rápida la relación entre los diferentes materiales. Cualquier otro material puede ser introducido en este gráfico a partir de sus valores de  $a$  y  $b$ .

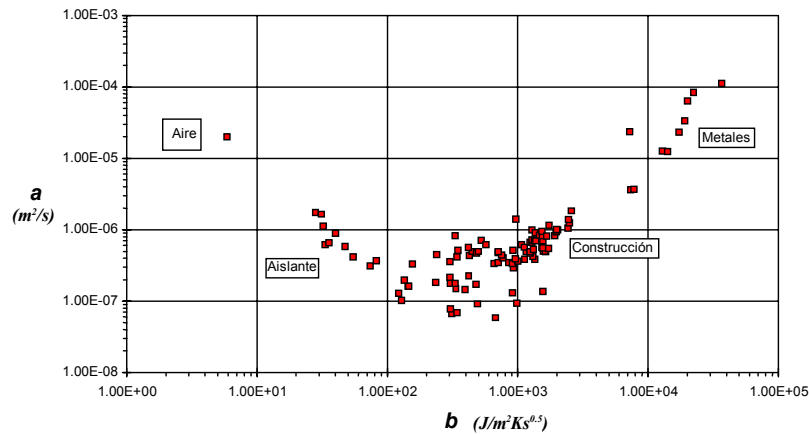


Fig.4. Correlación entre difusividad y efusividad térmica de los materiales.

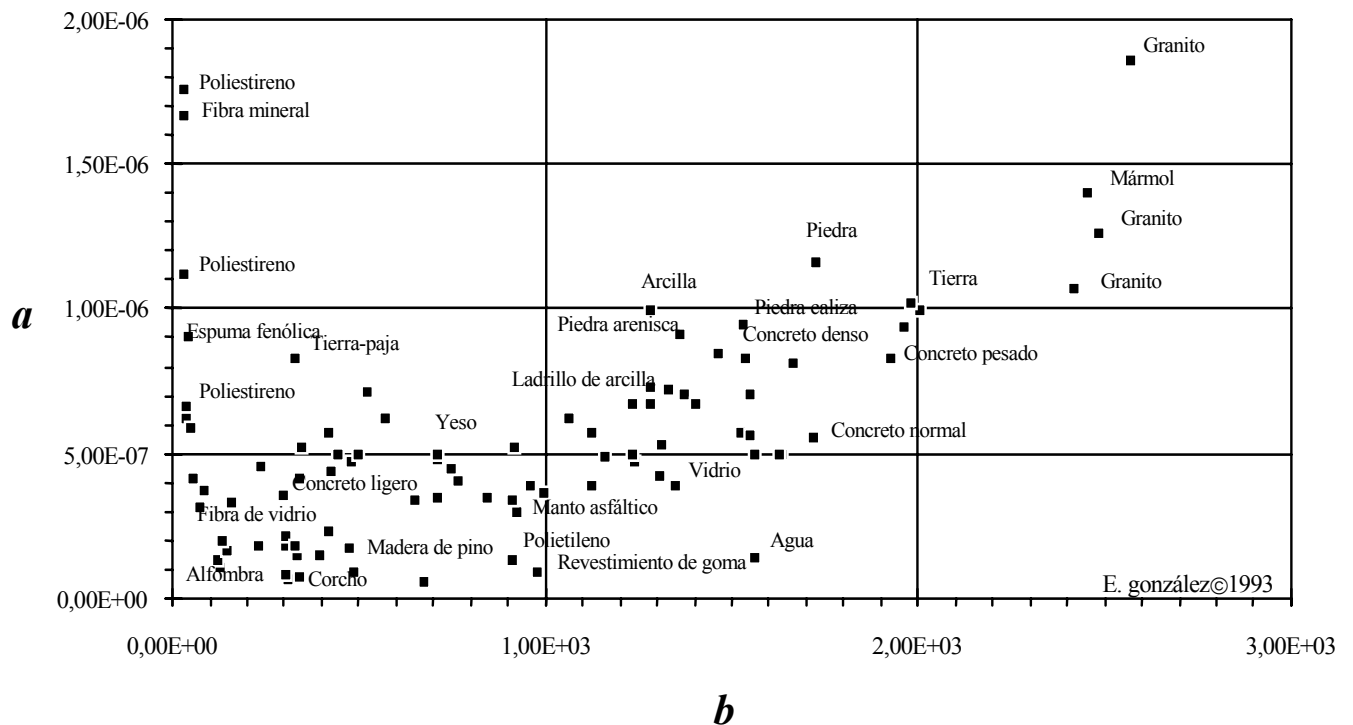


Fig. 5.- Correlación entre difusividad y efusividad térmica para diferentes tipos de materiales de construcción.

## 2. Comportamiento térmico de los materiales en régimen dinámico

Para estudiar el efecto de las características térmicas de los materiales sobre las temperaturas superficiales internas y sobre la temperatura del aire interior, se ha optado en este trabajo por la simulación computacional de los sistemas. Los casos simulados corresponden: el primero, a una pared de material homogéneo sometido a solicitaciones de tipo periódico, el segundo, a una construcción de una zona habitable, con cerramientos de material homogéneo, sometidos a solicitaciones de tipo periódico y con régimen de ventilación interior variable, y el tercero, a una construcción de una zona habitable, con cerramientos de dos capas de material homogéneo, sometido a solicitaciones de tipo periódico y con régimen de ventilación interior variable.

### 2.1. Comportamiento térmico de una pared de material homogéneo

Se trata de una pared opaca, de material homogéneo, sometida en su cara exterior a una sollicitación de temperatura de tipo sinusoidal diaria, y en su cara interior a un volumen de aire unitario, donde la temperatura varía en función del flujo convectivo de la pared. La pared fue discretizada espacialmente en cinco secciones isotermas y la transferencia de calor se supone unidireccional. Se procedió a realizar las simulaciones par evaluar el efecto combinado de la difusividad y de la efusividad, sobre el factor decremental ( $\mu$ ) (coeficiente de reducción de la amplitud) y sobre el desfase ( $\theta$ ) (desplazamiento horario de los valores máximos y mínimos interiores en relación a los valores exteriores).

En una primera serie de simulaciones, fue evaluado el efecto de la efusividad (10 valores entre 50 y 2700) sobre el factor decremental y el desfase para tres valores diferentes de difusividad ( $1.5 \cdot 10^{-7}$ ,  $5.0 \cdot 10^{-7}$ ,  $8.3 \cdot 10^{-7}$ ). Los resultados (Fig.6) permiten hacer las siguientes observaciones:

- El valor de la efusividad afecta sensiblemente el factor decremental. A los valores más grandes de efusividad corresponden los más grandes factores decrementales.
- El efecto de la efusividad sobre el factor decremental crece con la difusividad. En los casos estudiados, esta variación esta comprendida entre 10% y 23%.

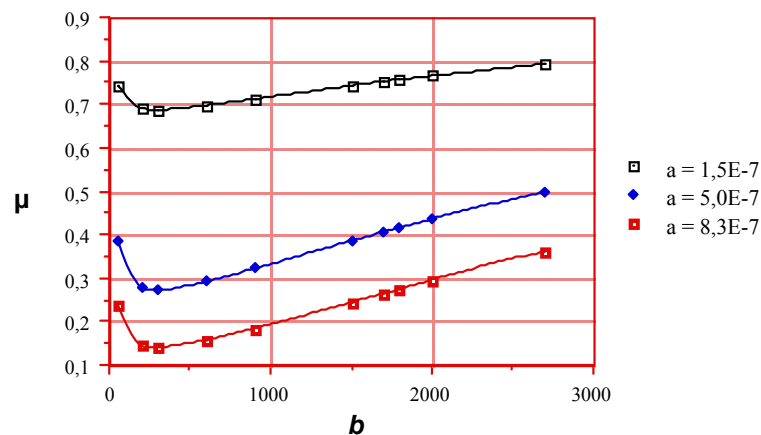


Fig. 6. Efecto de la efusividad sobre el factor decremental para diferentes valores de difusividad.

Para evaluar el efecto de la difusividad térmica sobre  $\mu$ , se ha realizado una serie de simulaciones en paredes con la misma configuración geométrica.

Fueron seleccionados treinta materiales para esta serie de simulaciones. Ellos corresponden a la combinación de tres valores de efusividad (300, 1500 y 2700) y diez valores de difusividad (desde  $8.3 \cdot 10^{-8}$  hasta  $2.0 \cdot 10^{-6}$ ). Este grupo de materiales, como el seleccionado para la primera serie de simulaciones, comprende la mayor parte de los materiales de construcción.

Pueden hacerse las siguientes observaciones a partir del análisis de la figura 7:

- La influencia de la difusividad sobre el factor decremental es mucho más importante que el de la efusividad (para valores iguales de  $b$ ,  $\mu$  puede variar en 80%, mientras que el efecto de  $b$  no sobrepasa el 23% para valores iguales de  $a$ ).
- El factor decremental aumenta de manera exponencial con la disminución de la difusividad.

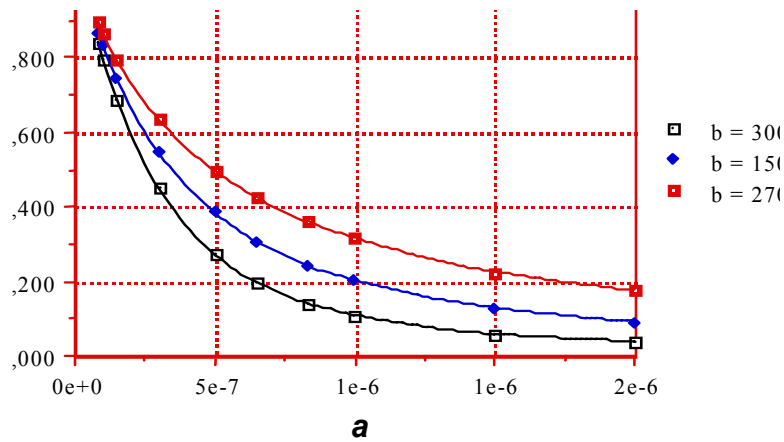


Fig. 7. Efecto de la difusividad sobre el factor decremental ( $\mu$ ) para diferentes valores de efusividad.

## 2.2. Comportamiento térmico de una habitación con cerramientos homogéneos.

Bajo condiciones de clima cálido y húmedo, la ventilación es quizás el factor del cual más depende la sensación de confort que tratamos de obtener por medio de la climatización natural. En este sentido nos preguntamos: ¿cómo reaccionan los materiales cuando se les somete a solicitaciones de tipo periódico y a tasas variables de renovación del aire? ¿Cuales son las mejores combinaciones de material y de ventilación para obtener las temperaturas superficiales y del aire interior más confortables?

Para el estudio se ha simulado una habitación de 3m x 3m x 3m, con solicitaciones de temperatura y flujo impuesto por sus caras exteriores y en contacto con un volumen de aire interno limitado por seis paredes. Las superficies interiores realizan entre ellas intercambios de calor por radiación y por convección con el aire interior. El cálculo de los intercambios radiantes en el interior de la habitación reposa sobre el método de las radiosidades: el aire interior es considerado un medio transparente.

Se han seleccionado 8 tipos de materiales que corresponden a la combinación de dos valores de difusividad ( $1.5 \cdot 10^{-7}$  y  $8.3 \cdot 10^{-7}$ ) con cuatro valores de efusividad (50, 300, 1500, 2000). Las características descritas corresponden aproximadamente a los materiales siguientes: poliestireno, tierra con paja, concreto denso y concreto pesado para los valores más elevados de difusividad. Fibra de vidrio, madera, agua, así como un material ficticio, para el valor más pequeño de difusividad. Los coeficientes de conductancia superficial exterior e interior ( $h_e=16.6$ ;  $h_i=5.1$ ), la absor-

tividad de la superficie exterior ( $a=0.5$ ), así como el resto de los parámetros excepto  $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $C_p$ , y  $N$ . se mantuvieron constantes durante todas las series de simulaciones.

Este estudio fue realizado para un solo espesor de pared:  $e=0.10$  m, y para tres tasas de renovación de aire: 1 vol/h, 10 vol/h y 1-20 vol/h. La tercera corresponde a una ventilación de 1 vol/h si la temperatura interior es inferior a la exterior, y de 20 vol/h mientras ocurre lo contrario. Un resumen de los resultados numéricos ( $T_{max}$  y  $T_{min}$ ) se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Resumen de los valores de temperatura resultado de las simulaciones.

$a$	$b$								$N$ vol/h
	50		300		1500		2000		
	max	min	max	min	max	min	max	min	
1.5E-7	31.92	25.32	31.60	26.41	30.17	27.63	29.98	27.83	1
	31.99	23.69	31.22	24.94	30.00	26.46	29.91	26.66	10
	31.23	23.43	30.74	24.37	29.72	25.70	29.53	25.89	1-20
8.3E-7	36.14	24.07	35.92	24.43	33.03	25.66	32.31	26.10	1
	33.66	23.49	34.52	23.96	32.59	24.99	32.00	25.34	10
	32.95	23.33	33.79	23.72	32.36	24.57	31.88	24.86	1-20

### Análisis de la amplitud de la temperatura interior

Los valores de amplitud más bajos corresponden a los materiales donde se combinan baja difusividad y alta efusividad térmicas. En general el aumento de la tasa de renovación del aire implica también un aumento en la amplitud de la temperatura salvo en el caso de materiales de alta difusividad y baja efusividad, donde el fenómeno se invierte.

El aumento de la amplitud es muy sensible a la variación de la efusividad. En un material de baja difusividad, una variación de la efusividad de 50 a 1500 puede hacer aumentar la amplitud de la temperatura de 3.25°C a 8.3°C (Fig. 8)

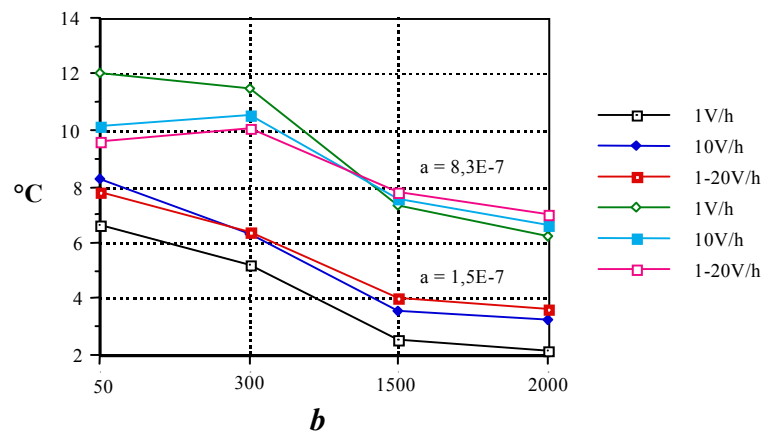


Fig. 8. Efecto de la efusividad, difusividad y régimen de ventilación sobre la amplitud de la temperatura interior.

## Análisis de la temperatura media

Los valores más bajos de temperatura media se han obtenido usando materiales de baja difusividad y baja efusividad, con ventilación nocturna (Fig. 9).

El efecto de la ventilación sobre la temperatura media es muy importante. Proporcionalmente, este efecto es más importante que el de la difusividad.

El efecto de la efusividad sobre la temperatura media no es muy importante (una variación de  $b = 50$  a 2000 tiene como consecuencia un aumento de aproximadamente  $0.4^{\circ}\text{C}$ ).

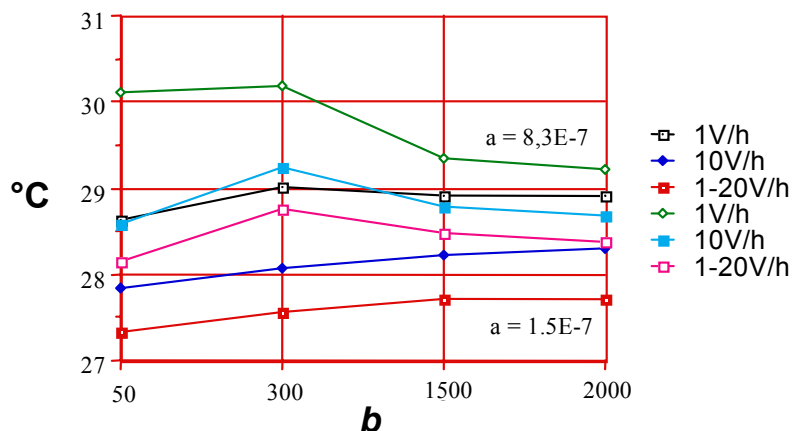


Fig. 9. Efecto del régimen de ventilación, efusividad y difusividad sobre la temperatura media .

## Materiales, ventilación y temperatura media radiante

La temperatura superficial media de las paredes o temperatura media radiante ( $T_{rm}$ ), es uno de los parámetros que afecta el confort térmico del cuerpo humano. Se recomienda, en países cálidos, evitar el calentamiento de las superficies interiores de las habitaciones y de tal modo, reducir el efecto negativo de una temperatura radiante elevada.

Particularmente interesa conocer, qué tipo de materiales y condiciones de ventilación permiten alcanzar las temperaturas medias radiantes más favorables para el confort térmico.

El análisis de los resultados de simulaciones realizadas a partir de valores de temperatura media radiante, de la temperatura del aire de la habitación y de la temperatura exterior, nos permite arribar a dos grupos de conclusiones relativas a la influencia de las características térmicas de los materiales sobre la temperatura media radiante.

El primer grupo de conclusiones corresponde a la habitación sometida a una tasa de renovación de aire muy pequeña (1 vol/h) y que se ha denominado "módulo sin ventilación". El segundo grupo de conclusiones corresponde a la habitación que se ha denominado "módulo con ventilación nocturna" donde se utiliza una tasa variable de renovación de aire (1-20 vol/h).

Cuando la tasa de renovación de aire es baja, las temperaturas  $T_a$  y  $T_{rm}$  son prácticamente idénticas para un material dado (Fig. 10). Así, el efecto de la difusividad y de la efusividad sobre  $T_{rm}$  es entonces similar al efecto sobre  $T_a$  (aumento de  $\mu$  y de  $\varnothing$  cuando la difusividad disminuye y la efusividad aumenta). Durante el día, en presencia de materiales de baja difusividad térmica la  $T_{rm}$  permanece inferior que cuando se utilizan materiales de alta difusividad térmica. La situación contraria sucede durante la noche.

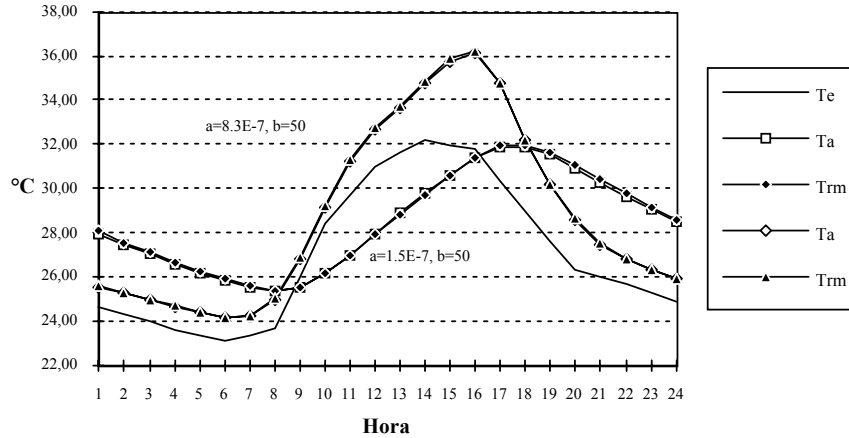


Fig. 10. Temperatura exterior ( $T_e$ ), interior ( $T_a$ ) y media radiante ( $T_{rm}$ ), con dos tipos de materiales de similar efusividad ( $b=50$ ) y diferente difusividad ( $a=1.5 \cdot 10^{-7}$ ,  $8.3 \cdot 10^{-7}$ ) sin ventilación.

Cuando se utiliza la ventilación nocturna el principal efecto que se obtiene es una reducción tanto de la temperatura del aire como de la temperatura media radiante (Fig. 11). La diferencia entre las  $T_{rm}$  (módulo ventilado y sin ventilar) crece al disminuir la efusividad. Esto significa que, para un espacio de uso nocturno, es recomendable utilizar materiales de baja efusividad térmica.

Con tasas elevadas de renovación de aire, la temperatura interior se acerca a la temperatura exterior. Se produce un enfriamiento de la masa térmica que se traduce en una  $T_{rm}$  constantemente más pequeña que aquella obtenida con el mismo material sin ventilación.

Se observa también una diferencia entre  $T_a$  y  $T_{rm}$  que crece con la efusividad. Esta diferencia representa cerca del 40% de la diferencia que existe entre  $T_e$  y  $T_{rm}$ . Cuanto mayor es la difusividad, mayor la diferencia entre  $T_{rm}$  y  $T_e$ .

El efecto de la ventilación nocturna sobre  $T_{rm}$  (disminución de  $T_{rm}$  en comparación al modelo sin ventilación) disminuye con el aumento de la difusividad y de la efusividad.

La amplitud de la temperatura media radiante depende principalmente de la difusividad térmica de los materiales: a menor difusividad corresponde una menor amplitud. En menor grado, la amplitud también depende del régimen de ventilación y de la efusividad.

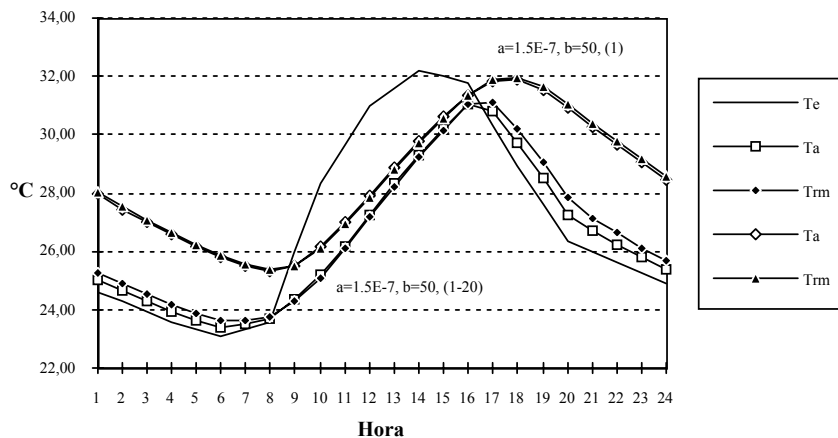


Fig. 11. Temperatura exterior ( $T_e$ ), interior ( $T_a$ ) y media radiante ( $T_{rm}$ ), con el mismo tipo de material ( $a=1.5 \cdot 10^{-7}$ ,  $b=50$ ) y dos tasas de renovación de aire (1 vol/h y 1-20 vol/h).

### Materiales, ventilación y modos de uso

De acuerdo con el análisis de los valores de  $T_m$  y  $\Delta T$ , se determinó que, los materiales a seleccionarse para las condiciones estudiadas deben tener baja difusividad y alta efusividad térmicas. Sin embargo, el análisis detallado de los valores horarios de temperatura del aire de la habitación ante tres tipos de usos diferentes (diurno, nocturno y mixto), permite concluir que los materiales deben ser seleccionados especialmente bajo la óptica del uso previsto para tales espacios.

Independientemente del modo de utilización del espacio, se obtienen los mejores resultados haciendo uso de la ventilación nocturna. En este caso, se observa en la Tabla 3 que:

- Para uso diurno de 7h hasta 19h, se obtienen los valores menores de  $\Delta T(T_a - T_e)$  con materiales de baja difusividad y baja efusividad.
- Para uso nocturno, es esencial escoger materiales de baja efusividad térmica. En este caso la difusividad es un parámetro indiferente.
- Cuando se considera el uso mixto, durante las veinticuatro horas del día, es recomendable el uso de materiales de baja difusividad y baja efusividad.

Tabla 3. Valores de  $\Delta T(T_a - T_e)$  de 7h a 19h (uso diurno-D-), desde 19h a 7h (uso nocturno-N-) y desde 1h a 24h (uso mixto-M-) en grados-hora/día ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h/d}$ ) para cada tipo de material y tasa de renovación de aire.

	<b>a</b>	<b>b</b>				<b>N vol/h</b>
		<b>50</b>	<b>300</b>	<b>1500</b>	<b>2000</b>	
<b>D</b>	<b>1.5E-7</b>	-3	-2	-3	-3	<b>1</b>
		-18	-17	-14	-13	<b>1-20</b>
	<b>8.3E-7</b>	30	28	9	6	<b>1</b>
		7	7	-5	-7	<b>1-20</b>
<b>N</b>	<b>1.5E-7</b>	38	49	51	50	<b>1</b>
		5	18	27	28	<b>1-20</b>
	<b>8.3E-7</b>	13	20	39	42	<b>1</b>
		3	14	27	29	<b>1-20</b>
<b>M</b>	<b>1.5E-7</b>	35	46	47	47	<b>1</b>
		-13	1	14	15	<b>1-20</b>
	<b>8.3E-7</b>	42	48	48	48	<b>1</b>
		9	21	22	21	<b>1-20</b>

Para el caso particular del clima cálido y húmedo, en la tabla 4 se presenta un resumen de las recomendaciones para la selección de materiales, de acuerdo al tipo de uso y forma de climatización de la edificación. Como ejemplo, en el caso de utilizar la climatización natural se observa que independientemente del tipo de edificación es recomendable usar materiales de baja difusividad y baja efusividad, como pueden ser, todos los tipos de madera, ciertos materiales aislantes, concretos aligerados, etc. (Fig. 5 y tabla 1).

Tabla 4. Resumen de recomendaciones para la selección de materiales en climas cálidos y húmedos de acuerdo al modo de utilización del espacio y método de acondicionamiento de aire.

Uso	Climatización mecánica		Climatización Natural
	N =1vol/h	N =1-20vol/h	N =1-20vol/h
<b>Diurno</b> 7h-19h	a = baja b = indife- rente	a = baja b = indife- rente (baja)	a = baja b = indife- rente (baja)
<b>nocturno</b>  19h-7h	a = alta  b = baja		a = indife- rente (alta) b = baja
<b>Mixto</b> 24h/24	a = baja b = baja		a = baja b = baja

### 2.3. Comportamiento térmico de una habitación con cerramientos compuestos.

En la construcción actual los cerramientos exteriores están constituidos por combinaciones de materiales que tienen varias funciones. Es común encontrar, en países templados o fríos, muros portantes de albañilería o de concreto (función estructural) revestidos al interior o al exterior de láminas de material aislante (función térmica), para reducir las pérdidas de calor durante el invierno. En estos países, la búsqueda de mejores soluciones constructivas y térmicas, adaptadas a las necesidades actuales de calidad térmica y eficiencia energética, ha hecho que se utilicen paredes multicapas, es decir, compuestas de diferentes capas de materiales.

En Venezuela, como en la mayoría de los países tropicales, no existe una cultura del aislamiento térmico y las paredes son tradicionalmente construidas con bloques de arcilla de alfarería (con cavidades), revestidos por ambas caras con mortero de arena y cemento. Desde los puntos de vista económico y constructivo es evidentemente una buena solución, de allí su utilización masiva. Desde el punto de vista térmico, especialmente cuando se encuentran expuestas al sol (caso general), su comportamiento no puede ser recomendado. Los aportes de calor a través de este tipo de paredes no son despreciables en estas cálidas condiciones climáticas, tanto en edificaciones con sistemas mecánicos de climatización, como en aquellas donde el confort térmico se desea lograr mediante el acondicionamiento natural.

Todo enfriamiento pasivo debe comenzar con acciones para evitar el sobrecalentamiento. Por ello, mejorar el comportamiento térmico de los cerramientos es un objetivo fundamental en la filosofía que nos anima. Partiendo de esta base, el estudio tiene como propósito general, buscar configuraciones de paredes donde el comportamiento térmico favorezca las condiciones de confort y reduzca el consumo de energía.

La selección y combinación correcta de materiales debe permitir, no solamente obtener condiciones internas confortables, cuando los sistemas de climatización no son utilizados, sino también, reducir, tanto como se pueda, el consumo de energía convencional, en caso de su utilización.

Así pues, se pretende: determinar cuáles son las características de los materiales, en paredes compuestas de dos capas de materiales diferentes, y la cantidad de ventilación, que permiten obtener las temperaturas características ( $T_{max}$ ,  $T_{min}$ ,  $T_m$  y  $\Delta T$ ) más bajas; observar la influencia de la difusividad y la efusividad de los materiales, así como el régimen de ventilación, sobre tales temperaturas; determinar la localización más favorable de un material poco efusivo cuando se combina con un material estructural o de alta efusividad, e identificar las combinaciones de materiales más apropiadas para el mejor aprovechamiento del enfriamiento convectivo nocturno.

Para alcanzar estos propósitos han sido realizadas una serie de simulaciones numéricas de una construcción de una sola habitación, sometida a condiciones de temperatura, asoleamiento, viento y humedad reales de un mes de enero ( $T_{max} = 32.2^\circ\text{C}$ ,  $T_{min} = 23.1^\circ\text{C}$ , radiación global diaria ( $I_g$ ) =  $5978 \text{ Wh/m}^2$ , velocidad del viento =  $2\text{-}3 \text{ m/s}$  y  $\text{HR} = 60\text{-}90\%$ ) en la ciudad de Maracaibo (Lat:  $10.5\text{N}$ ; Log:  $71.5\text{W}$ ), Venezuela. La herramienta de modelización y simulación ha sido el programa computacional CASAMO-CLIM; código de cálculo orientado a la simulación térmica de edificaciones en régimen dinámico. Ha sido seleccionado, para el estudio, un grupo de materiales, con características térmicas de difusividad y efusividad que permiten la observación del efecto de estos parámetros sobre el comportamiento térmico de las paredes del local. En la figura 12, sobre el gráfico de correlación de  $a$  y  $b$ , pueden observarse los ocho materiales identificados por sus parejas de valores de  $a$  y  $b$ . Se han combinado dos valores de difusividad ( $1.5 \cdot 10^{-7}$  (A1) y  $8.3 \cdot 10^{-7}$  (A2)) con cuatro valores de efusividad (50 (B1), 300 (B2), 1500 (B3) y 2000 (B4)) donde, por ejemplo, el material A1B3 corresponde aproximadamente a las características del agua y el A2B3 a las del concreto normal.

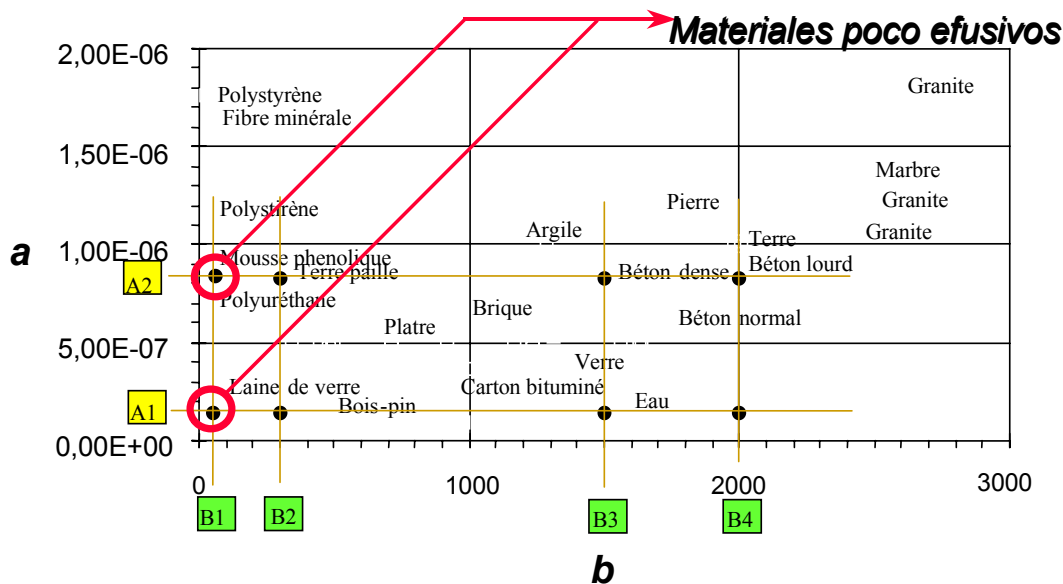


Fig. 12. Materiales utilizados en el estudio identificados por la combinación de sus valores de difusividad y efusividad.

Se han seleccionado dos tipos de configuraciones para la pared compuesta (Fig. 13). En la primera, la pared esta constituida por una capa de 5 cm, de material de baja efusividad (aislante térmico), localizado en la cara exterior del cerramiento, y por una capa de 10 cm, de material de alta efusividad, sobre la cara interior. En la segunda configuración, la ubicación de estas dos capas se invierte, así, el material poco efusivo se encuentra cara al interior del espacio y el mas efusivo hacia el exterior. Dos tipos de material poco efusivos, en la capa de menor espesor, y seis mayor efusividad, en la capa de 10 cm de espesor, se evalúan en cada configuración. En este estudio, el tipo de cerramiento evaluado en cada simulación es aplicado tanto a las paredes como al techo y el piso.

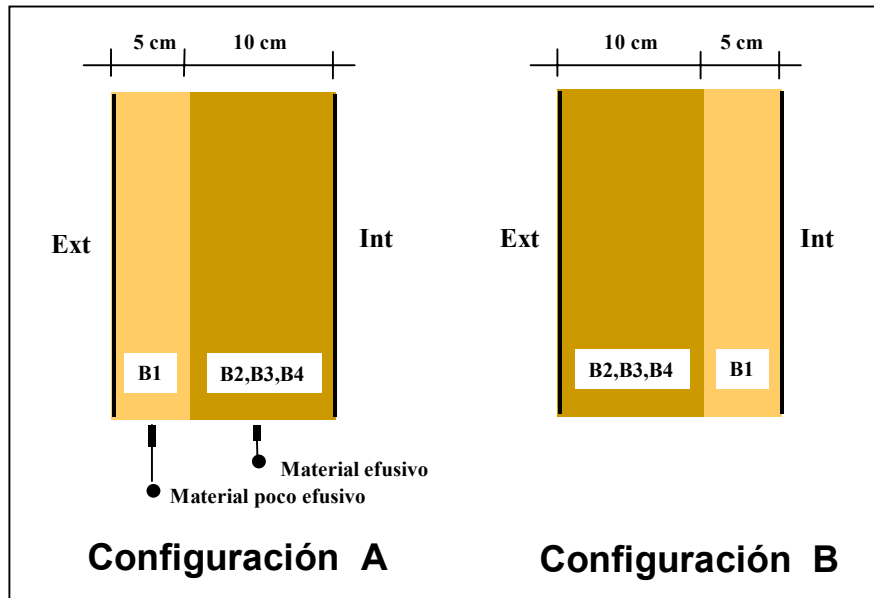


Fig. 13. Configuraciones de los cerramientos evaluados.

El análisis de los resultados de las simulaciones se hace partiendo de la hipótesis de un uso continuo del local, como es el caso en el sector residencial, donde conviene alcanzar las temperaturas características interiores mínimas, considerando el tipo de clima caliente y húmedo exterior. En relación con el régimen de ventilación ( $N$ = cambios del volumen aire de la habitación/hora) del local, tres situaciones particulares han sido evaluadas: cuando no es ventilado ( $N=1$  vol/h); cuando es ventilado en forma continua las 24h del día ( $N=10$  vol/h) y cuando se cuenta con una ventilación que favorece el enfriamiento nocturno ( $N=1-20$  vol/h). En este último caso, si la temperatura exterior es superior a la interior, entonces  $N=1$  vol/h y si la Temperatura exterior es inferior a la interior, entonces  $N=20$  vol/h.

### Análisis de la temperatura media y la amplitud

En un local de utilización continua la temperatura media y la amplitud son los dos parámetros más importantes. A la luz de los resultados de las 72 simulaciones realizadas se observa que, en general, los valores medios inferiores se encuentran en las configuraciones con material poco efusivo (A1B1 y A2B1) en la cara exterior, con un régimen de ventilación de 1-20 vol/h. La difusividad de esta capa exterior tiene poca influencia. Particularmente se alcanza la mínima temperatura media cuando se combinan los materiales A1B1 (Efusividad y difusividad bajas) en la cara

exterior con A2B3 (Difusividad y Efusividad altas) en la cara interior. En este caso, con ventilación nocturna ( $N=1-20$  vol/h), la temperatura media interior resulta  $1.64^{\circ}\text{C}$  inferior a la temperatura media exterior.

Los resultados de las simulaciones muestran que las amplitudes más pequeñas se obtienen en la configuración con material muy efusivo sobre la cara interior con régimen bajo de ventilación. Es evidente que el régimen de ventilación tiene una influencia capital sobre  $\Delta T$ , especialmente en este tipo de configuración. Sin ventilación, el local alcanza amplitudes inferiores a  $1^{\circ}\text{C}$ , pero es suficiente una ventilación continua de  $10$  vol/h para ella alcance valores de entre  $4$  y  $6^{\circ}\text{C}$ . La ventilación nocturna de  $20$  vol/h aumenta  $\Delta T$  de manera moderada, encontrándose sus valores entre  $2.5$  y  $4^{\circ}\text{C}$ . Independientemente del régimen de ventilación,  $\Delta T$  disminuye al aumentar la efusividad en la cara interna de la pared y al aumentar su difusividad.

### **Análisis de las temperaturas máximas y mínimas**

De la misma manera que para la temperatura media, las menores temperaturas máximas corresponden a la combinación del material A1B1 (difusividad y efusividad bajas), en la cara exterior, con material A2B3 (difusividad y efusividad altas), en la cara interior, con un régimen de ventilación de  $1-20$  vol/h. Las temperaturas máximas superiores ( $T_{\text{max}} > 30^{\circ}\text{C}$ ) resultan en la configuración donde el material efusivo se encuentra en la cara exterior, en especial, cuando estos materiales tienen una alta difusividad térmica.

A diferencia de la  $T_m$ ,  $\Delta T$  y  $T_{\text{max}}$ , las temperaturas mínimas menores corresponden a la configuración B, donde el material aislante o poco efusivo se encuentra en la cara interior, en especial cuando el material efusivo, en la cara exterior, presenta valores elevados de difusividad. Las temperaturas mínimas nocturnas que dependen de la utilización del aire fresco nocturno corresponden a las configuraciones con baja efusividad en las capas internas y con el mayor flujo de aire nocturno. Por otro lado las mayores temperaturas mínimas corresponden a la utilización de materiales efusivos en la cara interior, sin ventilación o con ventilación continua. Sin embargo, si son sometidos a una ventilación selectiva ( $1-20$  vol/h) las  $T_{\text{min}}$  alcanzan valores cercanos a la temperatura del ambiente.

### **Influencia de la posición de la capa de material poco efusivo**

Si bien el tema ha sido abordado al analizar cada una de las temperaturas características, la comparación de estos dos tipos de configuraciones pone en evidencia que resulta muy importante la localización de un material poco efusivo (aislante) en una pared bi-capa. Con excepción de las temperaturas mínimas, los valores inferiores de temperaturas características del local ( $T_m$ ,  $\Delta T$  y  $T_{\text{max}}$ ) siempre corresponden a la configuración A (material poco efusivo al exterior). Hay que resaltar, sin embargo, que en esta configuración, si se dispone de ventilación nocturna las temperaturas mínimas resultantes son muy cercanas a la de la configuración B y a la temperatura del ambiente. Se ha mostrado que la configuración A ofrece un mayor potencial para el empleo de la ventilación nocturna y enfriamiento pasivo.

### **Conclusión**

A fin de dar respuesta a las interrogantes iniciales, se presenta una síntesis evaluativa del comportamiento de cada una de las configuraciones y combinaciones de materiales, cuyo resumen se presenta en la figura 14. Este resumen es el resultado de la suma algebraica de la ponderación otorgada a cada una de las categorías identificadas en el análisis de las temperaturas características del local, otorgándole idéntica importancia a cada una de las variables. Se trata de notas de evaluación donde los valores menores corresponden al mejor comportamiento térmico.

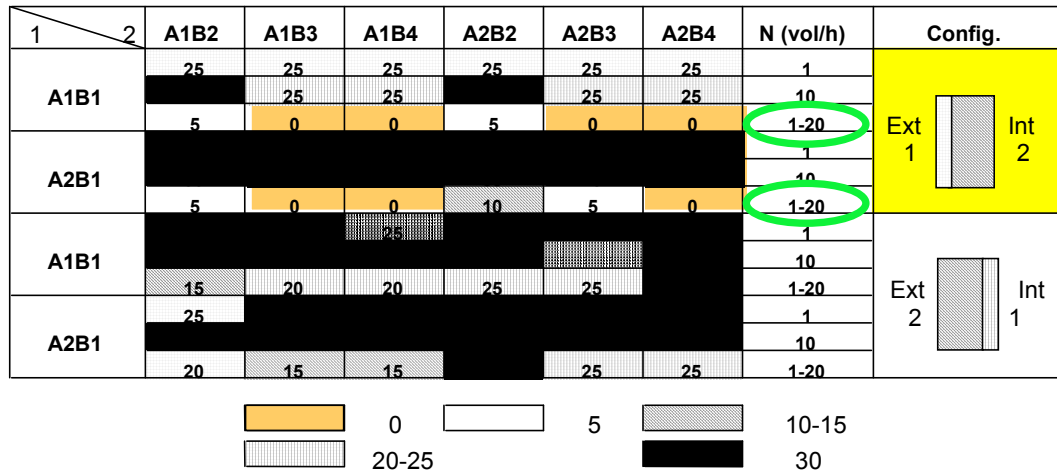


Fig. 14. Resumen general de evaluación de los casos estudiados.

Puede concluirse, haciendo referencia a esta síntesis evaluativa que, el comportamiento global de los cerramientos, en relación con la temperatura interior, depende de manera significativa del régimen de ventilación impuesto. Es con la configuración A (material poco efusivo en la cara exterior), en combinación con un material de alta efusividad en el interior y con ventilación selectiva de 1-20 vol/h, como se logra el mejor comportamiento térmico, es decir, la mejor combinación de temperaturas características, como es el caso de la combinación del material A1B1 (aislamiento de fibra de madera) con el material A2B3 (concreto denso), donde:  $T_m = 26^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{max}} = 26.9^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{min}} = 24.3^\circ\text{C}$  y  $\Delta T = 2.6^\circ\text{C}$  (Fig. 15), frente a las condiciones exteriores de  $T_{\text{max}} = 32.2^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{min}} = 23.1^\circ\text{C}$ . Estos resultados permiten afirmar que, es con este tipo de combinación de materiales que el potencial de enfriamiento convectivo nocturno puede ser utilizado al máximo.

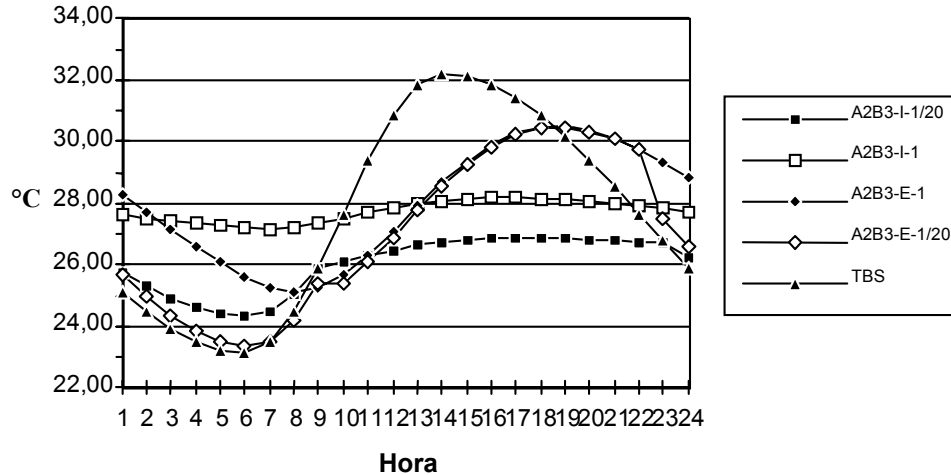


Fig. 15. Evolución de temperatura en las configuraciones A y B con materiales: poco efusivo A1B1, efusivo A2B3 y dos regímenes de ventilación (1 vol/h y 1-20 vol/h).

Las normativas térmicas vigentes en algunos países no consideran el efecto benefactor que, sobre el confort y la economía de energía, pueden tener determinados tipos de materiales sobre otros, aplicados a las caras interiores o exteriores. Ellas promueven el uso de materiales “aislantes”, sin hacer ninguna diferencia entre ellos, solamente considerando su conductividad térmica. A lo largo de este trabajo se ha podido observar la diferencia de comportamiento de cada una de las configuraciones, debido a las relaciones de la difusividad y de la efusividad de cada material. Con el objetivo de optimizar el comportamiento térmico de los edificios, estas dos características térmicas fundamentales deben ser consideradas al momento de la selección de los materiales, en el proceso de diseño.

Las conclusiones a las que se pueda llegar, partiendo de una forma diferente de utilización del espacio, podrían no ser las mismas que las indicadas aquí, esto debido a que la importancia que se le otorgue a los valores de temperatura interior depende del régimen de utilización de dicho espacio. Por ejemplo, si los dormitorios de una vivienda son dispuestos en un segundo piso y su uso se considera esencialmente nocturno, la temperatura mínima resulta ser la de mas importancia. En estas condiciones no conviene utilizar materiales de alta efusividad sino al contrario.

Si los espacios de una edificación van a ser climatizados mecánicamente, en forma continua o intermitente, es aconsejable recurrir a la simulación de esos casos a fin de optimizar la eficiencia energética de la integración entre el sistema de climatización y el edificio.

### 3. Comentario final

Las recomendaciones en el uso de materiales, cuando se trata de acondicionamiento natural o pasivo de edificaciones, deben estar siempre referidas al conjunto de características térmicas de los materiales, a las solicitaciones térmicas externas y a las condiciones límites internas, es decir al modo de utilización del espacio. Para atender indicaciones en cuanto a la conveniencia térmica de determinado tipo de materiales, con un enfoque bioclimático y de eficiencia energética, estas deberán estar formuladas de preferencia en términos de parámetros tales como la difusividad y la

efusividad. En caso contrario, ser referidas a la combinación de la conductividad y del calor específico volumétrico.

Con este fin, se ha propuesto el uso de la correlación entre la difusividad y la efusividad térmicas (Fig. 5), para poder caracterizar cada material usando solamente estos dos parámetros. Este gráfico de correlación puede servir igualmente para orientar el desarrollo de nuevos materiales, de acuerdo a las características que deben tener, en respuesta a las condiciones climáticas, al tipo de uso del espacio y la estrategia de climatización prevista.

#### 4. Referencias y Bibliografía

1. Achard, P., Gicquel, R., European Passive Solar Handbook, Preliminar edition CCE, DG XII., Imprimeries Bosco, Cannes 1987.
2. Aide-Mémoire du Thermicien A<sup>3</sup>. E<sup>2</sup>. Th, Editions Européennes Thermique et Industrie (E.E.T.I). Cosar, P., (President Comité de rédaction 8 édition)“, 1982 .
3. Bardon, J.P., Transferts de Chaleur Cycliques par Conduction Reunion Societé Française des Thermiciens. "Environnement microclimatique et habitat" Reims Mai 1979.
4. Depecker P., Maitrise des ambiances habitées et repérage de la qualité thermique. Annales de l'Institute Technique du Bâtiment et des Traveaux Publics, N° 443. 1986.
5. Givoni, B., Man, Climate and Architecture. Applied Science publishers L.T.D., London 1976
6. González, E., '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. France. (1997).
7. Lavigne, P., Fernandez, P., Bréjon, P., Architecture Climatique. Une contribution au développement durable, Tome 1, Bases et approche physique. France. 1994.
8. Mitja, A. European Passive Solar Handbook Natural Cooling, CCE, DG XII.
9. Sacadura, J. F., Initiation aux transferts thermiques, Technique et Documentation (Lavoisier), 1982