

## ALTOS VALORES DE LA RESISTENCIA TÉRMICA NO ASEGURAN UN BUEN DESEMPEÑO TÉRMICO DE LA ENVOLVENTE DE UNA EDIFICACIÓN

**Guadalupe Huelsz, Raúl Rechtman y Jorge Rojas**

Centro de Investigación en Energía, Universidad Nacional Autónoma de México, A.P. 34 Temixco Centro, 62580, Temixco, Mor.  
México. Tel/fax 55+56-22-97-41, [ghl@cie.unam.mx](mailto:ghl@cie.unam.mx).

### RESUMEN

Los métodos para la evaluación del comportamiento térmico de la envolvente de una edificación o para estimar la energía requerida para el acondicionamiento de los espacios basados en un análisis de transferencia de calor en estado estacionario, como el valor  $R$  y el grado-día, son útiles en climas donde la variación diaria de la temperatura externa es pequeña comparada con la diferencia entre la temperatura externa y la temperatura a la que se desea acondicionar la edificación y donde la radiación solar es baja, como en el invierno en países nórdicos. Sin embargo, en nuestro país, estas condiciones no se cumplen para la mayor parte del territorio nacional, ni siquiera en invierno.

En este trabajo se presentan resultados de la simulación numérica usando diferencias finitas de la transferencia de calor en estado transitorio a través de la envolvente, donde se muestra claramente que, cuando la variación de temperatura diaria es importante, un valor alto de la resistencia térmica no asegura un buen desempeño térmico. Es necesario también que la envolvente tenga una alta capacidad de almacenamiento térmico.

### ABSTRACT

Methods for the evaluation of the thermal behavior of the envelope of a building or to estimate the energy requirements for the conditioning of the spaces based in a stationary heat transfer analysis, like for example the  $R$  value and the Degree-Day are useful in climates where the daily variation of the external temperature is small compared with the difference between the external temperature and the temperature at which the building will be conditioned and where the solar radiation is small, like winter in Northern countries. However, these conditions are not met in most of our country, even in winter.

In this paper results of the numerical simulation using finite differences of the heat transfer in a transitory state through the envelope are presented, where it is clearly show that, when the daily variation of temperature is important, a high value of the thermal resistance does not guarantee a good thermal behavior. It is also necessary that the envelope possesses a high thermal storage capacity.

Palabras claves: desempeño térmico, envolvente, edificación, resistencia térmica, almacenamiento térmico, transferencia de calor, dependiente del tiempo.

### ANTECEDENTES

Para evaluar el comportamiento térmico de la envolvente de una edificación o para estimar la energía requerida para el acondicionamiento de los espacios se han utilizado métodos basados en un análisis de transferencia de calor en estado estacionario, como el valor  $R$  y el grado-día. Estos métodos son útiles para estimar las necesidades de calentamiento para viviendas y edificios pequeños en países en las zonas templadas o polares. En estos lugares en invierno, la variación diaria de la temperatura externa es pequeña comparada con la diferencia entre la temperatura externa y la temperatura a la que se desea acondicionar la edificación y las ganancias de calor internas y por la energía solar no varían apreciablemente durante las 24 horas. Sin embargo para estimar los requerimientos de enfriamiento, la fuerte influencia de las cargas solares transientes limitan la utilidad de estos métodos (Kuehn *et al.* 2001).

En la mayor parte de nuestro país, la radiación solar es significativa y la oscilación de temperatura diaria es importante (Sistema Meteorológico Nacional 2009) y la mayor demanda de energía para acondicionamiento de la vivienda es de enfriamiento (Morillón-Gálvez *et al.* 2004).

Recientemente el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación puso en consulta pública la Norma NMX460 INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN – AISLAMIENTO TÉRMICO – VALOR  $R$  PARA LAS ENVOLVENTES EN VIVIENDA POR ZONA TÉRMICA PARA LA REPÚBLICA MEXICANA – ESPECIFICACIONES Y VERIFICACIÓN. Esta norma sólo pone como requisito valores de  $R$  mínimos para muros y para techos de la envolvente y no considera la capacidad de almacenamiento térmico de la envolvente.

En este trabajo se demuestra, utilizando un modelo de transferencia de calor dependiente del tiempo, que en climas con radiación solar significativa y una oscilación de temperatura diaria importante, la envolvente con una alta resistencia térmica (alto valor  $R$ ) y un bajo valor de la capacidad térmica proporciona menor confort al interior, que una envolvente con un menor valor de  $R$  pero con un alto valor de la capacidad térmica cuando no se usa aire acondicionado.

### MODELO FÍSICO

Para evaluar el comportamiento térmico de un muro o techo de la envolvente de una edificación es suficiente usar un modelo unidimensional del mismo, en adelante señalado genéricamente

como muro, es decir, se desprecian los efectos bidimensionales y tridimensionales por las uniones con otros muros o techo, o por vanos en el muro. Los efectos de convección y radiación en las superficies del muro se modelan usando coeficientes de transferencia de calor de película,  $h_o$  para la superficie exterior y  $h_i$  para la interior, ambos en  $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ . El modelo físico se esquematiza en la Figura 1, en el caso particular de un muro compuesto por dos capas. Las temperaturas exterior e interior están denotadas por  $T_o$  y  $T_i$  respectivamente.

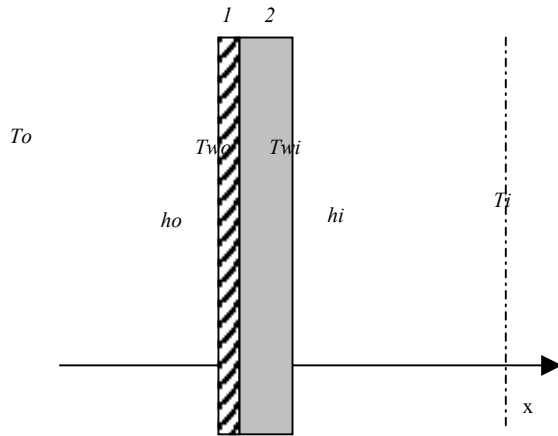


Figura 1. Modelo físico de la transferencia de calor a través de un muro de la envolvente. Caso de un muro de dos capas.

### Transferencia de calor en estado estacionario

Cuando la variación de la temperatura exterior es pequeña en relación a la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior y la radiación solar es despreciable, se puede analizar la transferencia de calor a través de un muro compuesto por  $N$  capas de materiales, empleando para cada  $j$ -ésima capa, la ecuación de conducción de calor en una dimensión independiente del tiempo (Incropera & De Witt 2002)

$$\frac{d}{dx} \left( k_j \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad (1)$$

Donde,  $k_j$  es la conductividad térmica de la  $j$ -ésima capa ( $W/m^\circ C$ ). Por conservación de energía en las uniones de las capas se debe cumplir

$$-k_j \frac{dT}{dx} \Big|_{j,j+1} = -k_{j+1} \frac{dT}{dx} \Big|_{j,j+1} \quad (2)$$

y en las superficies externa e interna

$$-k \frac{dT}{dx} \Big|_{w_o} = h_o(T_o - T_{w_o}) \quad (3)$$

$$-k \frac{dT}{dx} \Big|_{w_i} = h_i(T_{w_i} - T_i) \quad (4)$$

$T_{w_o}$  ( $^\circ C$ ) es la temperatura de la superficie externa del muro y  $T_{w_i}$  ( $^\circ C$ ) es la temperatura de la superficie interna del muro, tal como se muestra en la Figura 1.

La ley de Fourier proporciona el flujo de calor por unidad de área

$$q_x = \frac{T_o - T_{w_o}}{1/h_o} = \frac{T_{w_o} - T_{1,2}}{L_1/k_1} = \dots = \frac{T_{N-1,N} - T_{w_o}}{L_N/k_N} = \frac{T_{w_i} - T_i}{1/h_i} \quad (5)$$

Al utilizar el concepto de resistencia térmica o valor  $R$ , el flujo de calor por unidad de área se puede expresar como

$$q_x = \frac{T_o - T_i}{R} \quad (6)$$

Donde el valor  $R$  está dado por la suma de las resistencias de las superficies externa e interna,  $1/h_o$  y  $1/h_i$ , respectivamente, más las resistencias conductivas de las  $N$  capas

$$R = \frac{1}{h_o} + \frac{L_1}{k_1} + \dots + \frac{L_j}{k_j} + \dots + \frac{L_N}{k_N} + \frac{1}{h_i} \quad (7)$$

Por lo tanto, en estado estacionario, la única propiedad involucrada es la resistencia térmica del muro.

### Transferencia de calor dependiente del tiempo

Cuando la variación de la temperatura exterior no es pequeña en relación a la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior y la radiación solar es importante, se debe hacer un análisis dependiente del tiempo.

El efecto combinado de la radiación solar incidente y la temperatura del aire exterior en muros y techos exteriores se puede modelar con una temperatura de aire equivalente llamada temperatura-sol-aire (Ulgen, 2002).

$$T_{sa} = T_a + \frac{aI}{h_o} - CF \quad (8)$$

Donde,  $T_{sa}$  es la temperatura sol-aire ( $^\circ C$ ),  $T_a$  es la temperatura exterior ( $^\circ C$ ),  $I$  es la radiación solar por unidad de área sobre la superficie del muro o techo ( $W/m^2$ ), estas tres variables son función del tiempo. Los factores  $a$  y  $h_o$  son respectivamente la absorptividad de la superficie (adimensional) y el coeficiente de transferencia de calor de película exterior, debido a convección y radiación ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ ). El término  $CF$  es un factor de corrección que toma en cuenta la radiación infrarroja radiada hacia el cielo, ASHRAE recomienda asignar un valor de  $4^\circ C$  para superficies horizontales que miran hacia arriba (techos). Para un muro  $CF$  es igual a cero. En este caso en la Figura 1,  $T_o$  se sustituye por  $T_{sa}$ .

Entonces, el problema consiste en conocer la temperatura al interior  $T_i$  por efecto del muro, dada una temperatura sol-aire  $T_{sa}$ .

En general se puede decir que un muro es mejor térmicamente si tiene un mayor amortiguamiento  $A$ , es decir si amortigua más la variación de la temperatura exterior, y si el tiempo de retraso  $TR$  o desfase entre el tiempo en que la temperatura externa tiene su máximo valor y el tiempo en que la temperatura interna alcanza su máximo es cercano a 12 horas. El amortiguamiento  $A$ , que se define como uno menos la razón de la amplitud de la oscilación interna  $T_{i_{max}} - T_{i_{min}}$  entre la amplitud de la oscilación de la temperatura sol-aire  $T_{sa_{max}} - T_{sa_{min}}$ .

$$A = 1 - \frac{T_{i_{max}} - T_{i_{min}}}{T_{sa_{max}} - T_{sa_{min}}} \quad (9)$$

El amortiguamiento puede tomar valores entre 0 y 1, 0 significa que la temperatura al interior tiene la misma amplitud de oscilación que la temperatura sol-aire, 1 significa que el muro ha amortiguado totalmente la oscilación de la temperatura al interior y la temperatura al interior tiene un valor constante.

El tiempo de retraso  $TR$  de la temperatura interna con respecto a la temperatura sol-aire está dado por la diferencia del tiempo en el cual ocurre el máximo de la temperatura sol-aire y el tiempo en el cual ocurre el máximo de la temperatura interior

$$TR = t(Tsa_{max}) - t(Ti_{max}) \quad (10)$$

En la Figura 2 se esquematiza la temperatura sol-aire (azul) y la temperatura interna (rojo), durante un día. Se señalan el tiempo de retraso  $TR$  y las amplitudes de las oscilaciones, de la temperatura sol-aire  $Tsa_{max}-Tsa_{min}$  y de la temperatura interna  $Ti_{max}-Ti_{min}$

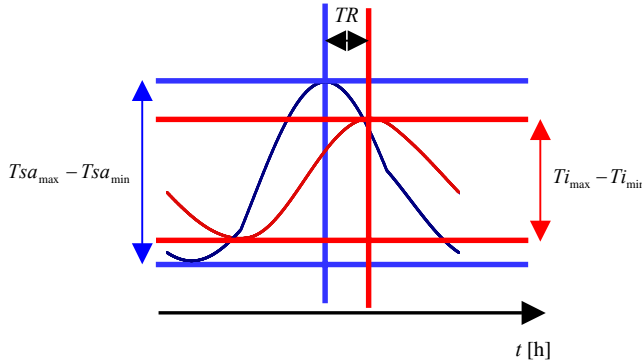


Figura 2. Temperatura sol-aire (azul) y la temperatura interna (rojo), durante un día. Tiempo de retraso  $TR$  y amortiguamiento de la oscilación de temperatura interna  $Ti$  con respecto a la oscilación de la temperatura sol-aire  $Tsa$ .

Para analizar la transferencia de calor a través de un muro compuesto por  $N$  capas de materiales, se emplea para cada  $j$ -ésima capa, la ecuación de conducción de calor en una dimensión dependiente del tiempo (Incropera & De Witt 2002)

$$\frac{\partial T_j}{\partial t} - \alpha_j \frac{\partial^2 T_j}{\partial x^2} = 0 \quad (11)$$

Esta ecuación describe la variación de la temperatura dentro de la  $j$ -ésima capa  $T_j$  como función del tiempo  $t$  y de la posición transversal al muro  $x$ . El coeficiente  $\alpha_j$  es la difusividad térmica del material de la  $j$ -ésima capa ( $m^2/s$ ) y se define como la relación entre la conductividad térmica  $k$  y la capacidad de almacenamiento térmico o capacidad calorífica del material  $C_j = \rho_j c_j$

$$\alpha_j = \frac{k_j}{C_j} = \frac{k_j}{\rho_j c_j} \quad (12)$$

Donde,  $\rho_j$  es la densidad ( $kg/m^3$ ) y  $c_j$  es el calor específico ( $J/kg^\circ C$ ). Por conservación de energía se deben cumplir las ecuaciones (2) a (4). La temperatura externa  $To$  se sustituye por la temperatura sol-aire  $Tsa$  que es función del tiempo y está dada por la ecuación (8). Se asume que la única fuente calor para modificar la temperatura interior  $Ti$  es a través del muro y que la superficie interna del muro tiene una distancia  $d$  al centro de la habitación.

Por lo tanto, en estado transitorio, el comportamiento térmico del muro no sólo depende de su resistencia térmica ( $L_j/k_j$ ), sino también de su capacidad de almacenamiento térmico ( $L_j \rho_j c_j$ ).

La ecuación (11) se resolvió por el método de diferencias finitas usando un esquema explícito (Incropera & De Witt 2002) programado en lenguaje C. Para la condición inicial se usó un procedimiento iterativo de tal manera que la temperatura en todo  $x$  en el tiempo inicial  $t=0$  tuviera el mismo valor ( $\pm 0.1^\circ C$ ) que la temperatura en  $t=24h$ .

## RESULTADOS

Para todos los resultados que se muestran a continuación se supuso una oscilación de la temperatura senoidal, con máximo a las 14h, amplitud de oscilación de  $9^\circ C$ , temperatura media  $Tm=26^\circ C$ . Radiación diurna tipo senoidal con máximo  $I_{max}=1000W$  a las 12h de (esto significa que se está simulando un techo horizontal, aunque esto no es válido para muros, como la intención es la comparación de los materiales constructivos, no tiene relevancia). Se utilizó un valor de la absorbtividad  $a=0.2$  que corresponde a una pintura blanca nueva. Se utilizaron valores de los coeficientes de transferencia de calor de película típicos para simular muros, para la superficie exterior  $ho=22W/m^2^\circ C$  y para la interior  $hi=5W/m^2^\circ C$ . Se consideró que la distancia entre el muro y el centro de la habitación  $d$  es de  $1.00m$ ,  $Ti$  es la temperatura del aire al interior. Ya que el objetivo es la comparación entre materiales con distintas propiedades térmicas, se supuso en todos los casos un espesor total del muro de  $10cm$ . Se utilizaron tres materiales de construcción: concreto normal (conc), concreto aereado (conc aereado) y poliestireno expandido (EPS). Los valores de las propiedades son los usados por el programa *E Plus* como típicos para este tipo de materiales y se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de los materiales.

Material muro	$k$ [W/m°C]	$\rho$ [kg/m³]	$c$ [J/kg°C]	$C$ [J/m³°C]	$\alpha$ [m²/s]
Concreto	1.35	1800	1000	$1.8 \times 10^6$	$7.5 \times 10^{-7}$
Concreto aereado	0.12	550	1004	$5.5 \times 10^5$	$2.2 \times 10^{-7}$
EPS	0.04	15	1400	$2.1 \times 10^4$	$1.9 \times 10^{-6}$

Como se puede observar en la Tabla 1, el EPS es el material con menor conductividad térmica  $k$  (mayor resistencia térmica), mientras que también es el valor con menor capacidad de almacenamiento térmico  $C$ , dando el mayor valor de difusividad térmica.

En la Figura 3 se muestra la gráfica de la temperatura del aire al interior  $Ti$  para muros simples de concreto normal (conc), concreto aereado (conc aereado) y poliestireno expandido (EPS). Para referencia, se incluyen también las temperaturas ambiente  $Ta$  y sol-aire  $Tsa$ . Como puede observarse, el muro de EPS, que tiene el valor  $R$  más alto, es el que amortigua menos la oscilación de temperatura y tiene un tiempo de retraso menor (ver Tabla 2). Esto muestra claramente, que un valor alto del valor  $R$  no garantiza un buen desempeño térmico del muro cuando no se utiliza aire acondicionado, es necesario que tenga también una alta capacidad de almacenamiento térmico.

Tabla 2. Valor  $R$ , amortiguamiento  $A$  y tiempo de retraso  $TR$  de los muros simples evaluados.

Material muro	Valor $R$ [m²C/W]	$A$	TR [h]
Concreto	0.27	0.28	3.71
Concreto aereado	1.03	0.48	5.49
EPS	2.70	0.12	2.22

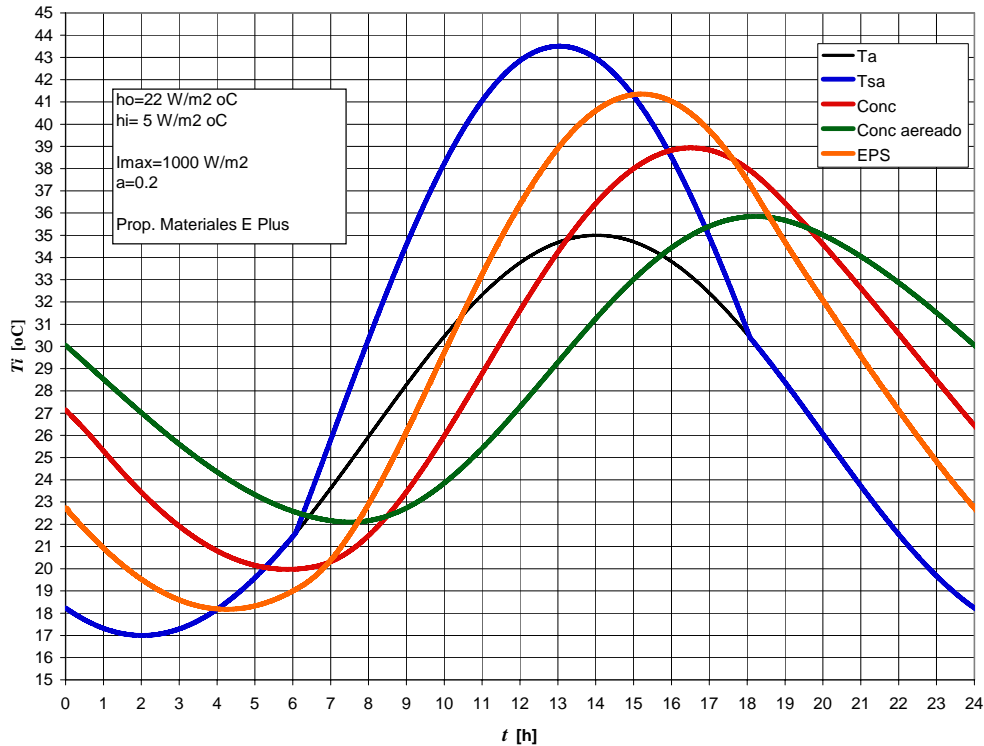


Figura 3. Gráfica de la temperatura del aire al interior  $T_i$  [ $^\circ\text{C}$ ] como función de la hora del día, para muros simples de concreto normal (conc), concreto aereado (conc aereado) y poliestireno expandido (EPS). Para referencia, se incluyen también las temperaturas ambiente  $T_a$  y sol-aire  $T_{sa}$ .

## CONCLUSIONES

Simulaciones numéricas usando diferencias finitas de la transferencia de calor en estado transitorio a través de la envolvente muestran claramente que, cuando la variación de temperatura diaria y la radiación solar son importantes, un valor alto de la resistencia térmica de un muro no asegura un buen desempeño térmico. Es necesario también que el muro tenga una alta capacidad de almacenamiento térmico. De los tres materiales evaluados: concreto, concreto aereado y poliestireno expandido, el concreto aereado es el que muestra un mejor comportamiento térmico, ya que es el muro hecho de este material es el que presenta el mayor amortiguamiento y el mayor tiempo de retraso. El poliestireno expandido, es el peor material, a pesar de que su valor  $R$  es el más alto.

## AGRADECIMIENTO

Este trabajo fue parcialmente apoyado por el proyecto CONACYT FOMIX- Estado de Morelos 93693.

## REFERENCIAS

- Incropera, F. P. and De Witt, D. P. (2002). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, p. 88-93 y 239-324, John Wiley & Sons, New York.
- Kuehn T.H., Ramsey W.W., and Threlkeld J.L. (2001). *Thermal Environmental Engineering*, p. 559-560. Prentice Hall, New Jersey.
- Morillón-Gálvez D., Saldaña-Flores R., and Tejeda-Martínez A., (2004). Human bioclimatic atlas for Mexico, Solar Energy, Vol. 76, p. 781-792.
- Sistema Meteorológico Nacional (2009). <http://smn.cna.gob.mx/productos/map-lluv/hmproduc.html>
- Ulgen, K. (2002). Experimental and theoretical investigation of effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor. *Energy and Buildings*, Vol. 34, p. 273-278.