

RESPUESTA DINÁMICA DE LOS MUROS DE LA ENVOLVENTE EDILICIA A VARIACIONES DIURNAS DE LA TEMPERATURA EXTERIOR

DYNAMIC RESPONSE OF THE BUILDING ENVELOPE WALLS DUE TO DIURNAL VARIATIONS OF THE OUTSIDE TEMPERATURE

G.E. Thomas, N. Muñoz, B.M. Marino, L.P. Thomas*

Grupo Flujos Geofísicos y Ambientales - Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro Provincia de Buenos Aires (CIFICEN), CONICET – Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA)
Pinto 399 – (7000) Tandil – Argentina

Recibido: 30/10/17; aceptado: 28/02/18

Se presentan resultados de la simulación numérica que resuelve la ecuación del calor dependiente del tiempo, que permiten evaluar el comportamiento térmico de muros multi-capas de construcciones típicas del centro bonaerense ante las variaciones diurnas de la temperatura exterior. Se cuantifica el intercambio energético por conducción y se encuentran los respectivos factores de decremento y tiempos de retraso, los que son comparados con los valores obtenidos aplicando el método de la admitancia, encontrándose un buen acuerdo. La simulación numérica permite describir detalladamente la evolución del flujo de energía en el interior de las paredes, contribuyendo a mejorar la comprensión de situaciones físicas complejas asociadas con envolventes multi-capas (y por ende, con la introducción de interfaces térmicas) y a determinar la influencia de las condiciones de contorno elegidas sobre los resultados. Así es posible mostrar los efectos generados en cada capa de material que suelen quedar encubiertos cuando se aplican métodos analíticos generales, destacándose la importancia de la selección de los materiales y su disposición en el interior del muro.

Palabras clave: flujo de calor, régimen no-estacionario, muros multi-capas, solución numérica.

In this paper results of numerical simulations that solve the non-steady heat equation are presented, thus providing the thermal assessment of typical walls composed of multiple layers of homogeneous materials and subjected to a diurnal variation of the outdoor temperature. The heat flux by conduction is quantified while the decrement factor and the time lag are estimated and compared to the admittance method results, finding a good agreement. Numerical results provide detailed information on the heat flux evolution within the walls, which helps to improve the understanding of complex physical situations associated with multilayer envelopes (and hence, with the insertion of thermal interfaces), and to determine the boundary conditions effects on the results. The effects on layers, which use to remain undercover when general analytical methods are applied, are now showed thus highlighting the importance of the proper choice of material and its localization inside the wall.

Keywords: heat flux, non-steady state, multi-layered wall, numerical solution.

I. INTRODUCCIÓN

Desde hace algunas décadas los proyectos arquitectónicos vienen incorporando en forma creciente, además de los factores urbanísticos, requerimientos asociados con las variaciones de los parámetros ambientales externos (e.g. temperatura, radiación solar incidente, dirección preferencial del viento local) y las propiedades térmicas de los materiales de construcción. Mientras que en la etapa de diseño el intercambio de calor entre el exterior e interior se evalúa considerando valores “base” propuestos por normas técnicas estándares como las IRAM, ISO o ASHRAE¹⁻⁴, el diseño y la evaluación de edificios en condiciones reales de uso se basan además en los resultados de modelos

teóricos y/o numéricos^{5,6}. De este modo, es posible analizar el impacto de estrategias (e.g. ventilación natural) o sistemas alternativos (e.g. paneles solares) de climatización⁷⁻⁹ con el fin de mejorar la calidad del aire, optimizar el confort higro-térmico y disminuir el consumo energético. También importa la detección de zonas frías y/o calientes asociados con las pérdidas y/o ganancias de calor, respectivamente, y la condensación de la humedad del aire. Los cálculos completos no son sencillos ya que deben considerarse múltiples factores internos y externos como la radiación solar, el viento, la orientación, la localización, la actividad de los ocupantes y, esencialmente, la conducción del calor a través de la envolvente edilicia.

* luispthomas@gmail.com

Cuando se trata de caracterizar térmicamente una construcción, muchos procedimientos todavía consideran flujos de calor en régimen estacionario. En este caso la transferencia calórica depende de la transmitancia térmica y del área de los diferentes componentes de la envolvente, por lo que el uso de planillas de cálculo facilita la tarea. Sin embargo, estos modelos no siempre reflejan el comportamiento térmico real de la construcción¹⁰⁻¹¹. Particularmente, cuando las variaciones diurnas de temperatura son importantes, la resolución del problema estacionario utilizando únicamente la conductividad térmica como parámetro puede conducir a resultados erróneos cuando se desea evaluar el comportamiento térmico de muros multi-capas. Por su parte, las variaciones diurnas de la temperatura exterior producen dos efectos importantes: la atenuación del flujo de energía con el espesor del muro que compone la envolvente edilicia, y un retraso entre los tiempos en que se producen los máximos de la variación de temperatura y de los flujos de calor a ambos lados del muro. En este caso, la respuesta del material se determina mediante su transmitancia dinámica, la cual depende de su conductividad, densidad y calor específico.

El cálculo del flujo de calor a través de la envolvente en condiciones no estacionarias puede realizarse aplicando el método de la admitancia desarrollado por Davis¹² que introduce matrices de números complejos, o mediante códigos numéricos que resuelven las ecuaciones diferenciales resultantes^{9,13-14}. Los métodos para encontrar una solución numérica de las ecuaciones diferenciales asociadas con la transferencia de calor a través de los componentes de la envolvente son múltiples: diferencias finitas por esquemas explícitos¹⁵ o implícitos¹⁶, elementos finitos¹⁷, volúmenes finitos implícito¹⁸ o explícito¹⁹, espectrales²⁰, circuitos térmicos²¹ y funciones de transferencia²².

En este trabajo se resuelve numéricamente la forma no tradicional de la ecuación del calor dependiente del tiempo por diferencias finitas para estimar el flujo de calor a través de un medio no homogéneo, el factor de decremento, el tiempo de retraso, la transmitancia dinámica y la admitancia. Las condiciones de contorno se eligen de modo de incorporar la transferencia de calor en las capas límites superficiales de aire. La simulación numérica posibilita evaluar el comportamiento térmico de muros multi-capas de construcciones típicas del centro bonaerense ante variaciones diurnas de la temperatura exterior. Finalmente los resultados se comparan con los obtenidos usando el método analítico estándar de la admitancia²³.

II. FUNDAMENTOS

Flujo de calor unidimensional en un medio no homogéneo

Sea un material no homogéneo de densidad $\rho(x)$, calor específico $C_p(x)$ y conductividad térmica $\lambda(x)$ en cuyo interior existe una distribución de temperatura

$T(x,t)$. El flujo de calor por unidad de área perpendicular al eje x es dado por la ley de Fourier en una dimensión

$$q(x,t) = -\lambda(x) \frac{\partial T(x,t)}{\partial x}. \quad (1)$$

La cantidad de calor que entra, por unidad de área y tiempo, a una capa ubicada entre x y $x+dx$ es:

$$dq(x,t) = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx. \quad (2)$$

Por otra parte, la energía por unidad de volumen, y a presión constante es:

$$e(x,t) = C_p \rho(x) T(x,t). \quad (3)$$

El factor ρC_p ($\text{Jm}^{-3}\text{C}^{-1}$) multiplicado por el volumen analizado es la capacidad calorífica del material conocida también como *masa o inercia térmica*. Si no hay fuentes o sumideros de energía en el material, la conservación de la energía implica que

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0. \quad (4)$$

Analizando variaciones temporales y espaciales suaves de energía, q no puede sufrir cambios bruscos en las diferentes partes del material. Por el contrario, el gradiente de temperatura cambia bruscamente si lo hace la conductividad (ec. 1) como ocurre, por ejemplo, en una interface. Introduciendo las ecs. (2) y (3) en ec. (4), resulta

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0. \quad (5)$$

Para el caso de un material homogéneo, se obtiene la conocida ecuación de difusión del calor:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - D \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0, \quad (6)$$

donde $D = \lambda/\rho C_p$ es la difusividad térmica (m^2/s). Notar que, en el estado estacionario, q depende solo de la conductividad (ec. 1), mientras que si hay variaciones temporales q depende además de la densidad y el calor específico del material.

En el caso de un muro, es importante considerar adecuadamente las condiciones de contorno (CC) ya que conviene establecer las temperaturas externas T_e e interna T_i y considerar las resistencias térmicas superficiales externa R_{se} e interna R_{si} . El efecto de la radiación solar sobre la superficie del muro puede considerarse también mediante el empleo de la temperatura "equivalente sol-aire", T_{sa} . Es decir, la temperatura del aire exterior para la cual, en ausencia de radiación, el ambiente externo produce el mismo flujo de calor entrante a través de la superficie del muro²⁴. A los fines prácticos, mantendremos el símbolo T_e para la temperatura externa, ya sea que incluya o no a los efectos radiativos. Luego, el flujo de calor q_e que atraviesa la capa límite de aire localizada entre el exterior a temperatura $T_e(t)$ y la superficie externa del muro con temperatura $T_1(t)$ es

$$q_e(t) = \frac{1}{R_{se}} [T_e(t) - T_1(t)] \quad (7)$$

mientras que el flujo de calor q_i que atraviesa la capa de aire localizada entre el ambiente interior a temperatura $T_i(t)$ y la superficie interna del muro con temperatura $T_{N+1}(t)$ es

$$q_i(t) = \frac{1}{R_{si}} [T_{N+1}(t) - T_i(t)] \quad (8)$$

Las ecs. (5) y (6) son parabólicas y deben resolverse en forma simultánea en todo el dominio espacial (i.e., en todo el interior del muro) y en todo el intervalo temporal $0 < t < t_{fin}$, sujetas a las CC (7) y (8) ²⁵. Las condiciones iniciales (CI) afectan la solución en todo el intervalo de cálculo. En el caso de variaciones temporales periódicas, la influencia de una CI arbitraria sobre la solución puede despreciarse si se analizan los resultados luego de transcurridos algunos días de la CI establecida, como se hace en este trabajo. Una vez obtenida la solución $T(x,t)$ en un cierto dominio mediante la ec. (5), $q(x,t)$ se calcula con la ec. (1). Conocidas las variables T y q , es posible estimar los parámetros característicos del muro que se definen a continuación considerando T_i constante y T_e variando sinusoidalmente a lo largo del día. La admitancia (o capacidad de intercambio de calor con el medio ambiente con $T_i = \text{const}$) que se define como:

$$Y = \frac{\max(q_e)}{\max(\Delta T_e)} \cos(\varphi_Y) \quad (9)$$

donde ΔT_e es la amplitud de la variación de la temperatura externa, y φ_Y es el retraso entre la evolución de la temperatura y la del flujo de calor sobre la cara exterior. De forma análoga, la transmitancia dinámica se define como

$$u = \frac{\max(q_i)}{\max(\Delta T_e)} \cos(\varphi) \quad (10)$$

donde φ es el retraso entre q_i y T_e . Por otra parte, el factor de decremento

$$f = \frac{u}{K} = \frac{q_i}{q_{ss}} \quad (11)$$

proporciona un valor indicativo de la amortiguación de las variaciones periódicas del flujo de calor respecto del calculado con la transmitancia térmica $K = 1/R_t$ del muro cuando se calcula el flujo de calor q_{ss} por unidad de área en régimen estacionario.

III. MÉTODOS

Existen varias formas de resolver numéricamente la ecuación de difusión del calor (6), siendo el método de diferencias finitas el tradicionalmente empleado ²⁵. Para aplicarlo a la ec. (5), consideremos un muro de espesor x_0 dividido en N capas de espesor Δx como ilustra la Fig. 1. Definimos las temperaturas T_j en las $N+1$ interfaces entre capas sucesivas, y las propiedades del material λ_j , C_{pj} y ρ_j en el centro de cada capa. En diferencias finitas, la derivada espacial de la ec. (2) centrada en la interface j con $2 \leq j \leq N$, toma la forma

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right)_j = \frac{1}{(\Delta x)^2} \{ \lambda_j T_{j+1} - (\lambda_j + \lambda_{j-1}) T_j + \lambda_{j-1} T_{j-1} \},$$

mientras la derivada temporal es

$$\frac{\partial T}{\partial t} \Big|_j = \frac{1}{\Delta t} [T_j(t + \Delta t) - T_j(t)] \quad (12)$$

Por lo tanto, luego de un paso temporal Δt desde el tiempo t , la temperatura es

$$T_j(t + \Delta t) = T_j(t) + \frac{2\Delta t}{(\rho C_p|_j + \rho C_p|_{j+1})(\Delta x)^2} \left[\lambda_j T_{j+1} - (\lambda_j + \lambda_{j-1}) T_j + \lambda_{j-1} T_{j-1} \right] \quad (13)$$

Obtenida la distribución de temperatura en un dado tiempo, el flujo de calor se calcula con la formula discreta explicita (1):

$$q_j = -\frac{\lambda_j}{\Delta x} (T_{j+1} - T_j) \quad (14)$$

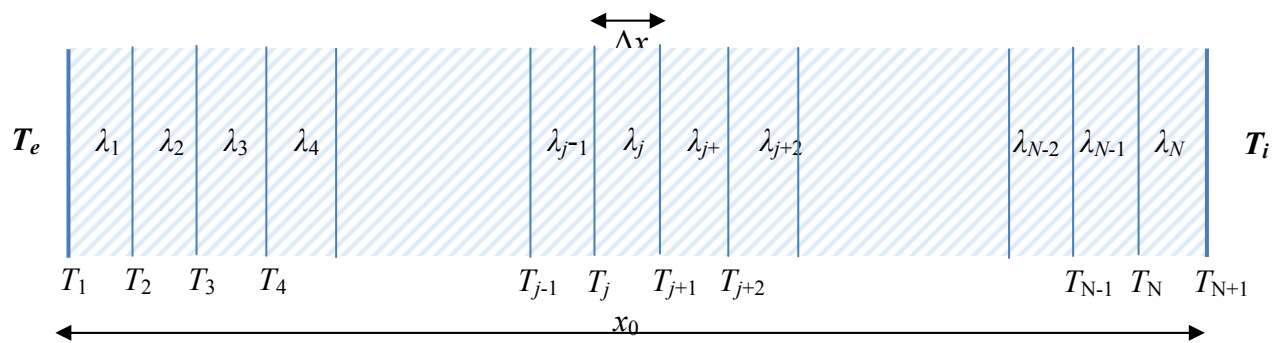


Figura 1: Corte esquemático de un muro fraccionado en N capas de espesor Δx .

En el caso de elegir el esquema explicito (12) para calcular la derivada temporal, el paso temporal debe cumplir una condición equivalente a la de Courant ²⁴ para que el esquema numérico sea estable:

$$\Delta t \leq C \frac{(\Delta x)^2}{\lambda / \rho C_p} \Big|_{\min} \quad (15)$$

donde la constante $C < 0.5$ (conocida también como *numero de difusión*) y *min* indica el menor de los valores de toda la grilla. Existen varios métodos alternativos de evitar la condición (15); entre ellos se encuentran los esquemas de resolución implícitos de la derivada temporal y el de Crank-Nicolson ²⁶. Por la CC (7), q_e es el flujo de calor en la primera capa, y entonces

$$q_e = \frac{1}{R_{se}} [T_e - T_1] = q_1 = \frac{\lambda_1}{\Delta x} [T_1 - T_2] \quad (16)$$

de modo que

$$T_1(t) = \frac{T_2(t) + \frac{\Delta x}{\lambda_1 R_{se}} T_e(t)}{1 + \frac{\Delta x}{\lambda_1 R_{se}}} \quad (17)$$

Análogamente, para el contorno interior,

$$T_{N+1}(t) = \frac{T_N(t) + \frac{\Delta x}{\lambda_N R_{si}} T_i(t)}{1 + \frac{\Delta x}{\lambda_N R_{si}}} \quad (18)$$

En resumen, la pared con λ_j , C_{pj} y ρ_j ($j = 1, 2, \dots, N$) se encuentra bajo las CC externa $T_e(t)$ e interna $T_i(t)$ más allá de las capas límites de aire. Se comienza introduciendo las condiciones iniciales T_j para todo j . Luego se calcula T_j en el tiempo Δt con ec. (13) desde $j = 2$ hasta $j = N$, y T_1 y T_{N+1} con ecs. (17) y (18); este cálculo se realiza para todo $0 < t < t_{fin}$ en M pasos temporales. Posteriormente, los valores de las temperaturas en todos los nodos y tiempos se calculan repetidamente hasta que converjan a valores que difieren en una cantidad (error) pequeña entre una iteración y la siguiente. Si se cumple la condición de Courant dada por ec. (15) para el Δt elegido, el cálculo necesita sólo un par de iteraciones para que los resultados numéricos converjan a la solución.

Como ya se mencionó, la elección de las CI afecta la solución en todo el intervalo de cálculo. En el caso de variaciones periódicas de la temperatura externa que se analizarán en la sección siguiente, se encuentra que la influencia de la CI sobre la solución es despreciable luego de transcurridos entre 3 y 6 días para cada muro evaluado. Por lo tanto, todos los casos se simularon durante 10 días y se muestran los resultados de las 72 h siguientes al 6^{to} día.

IV. RESULTADOS

Muro 1: pared doble con aislante central

Consideremos un muro de espesor total x_0 compuesto por doble pared de ladrillos macizos separados por una capa central de poliestireno expandido (EPS) que actúa como aislante térmico; la pared interna tiene un doble revoque (grueso y fino). El espesor ε de cada capa y las propiedades térmicas de los materiales involucrados se presentan en la Tabla 1. Por completitud, también se incluyen los valores de las resistencias superficiales R_{se} y R_{si} indicados en la norma IRAM 11601 y usados en el presente cálculo. Los intervalos temporales Δt obtenidos con la ec. (15) con la condición de Courant $C = 1$ y $\Delta x = x_0/100 = 0.003$ m para los diferentes materiales se muestran en la última columna. Para ejecutar el programa, se toma el menor de los intervalos ($= 7.1$ s) y $C = 0.5$.

Si el flujo de calor es estacionario, resulta que su valor máximo $q_{ss}|_{max} = q_j$ para $j = 1, 2, \dots, N$ es uniforme, y por lo tanto

$$q_{ss}|_{max} = \frac{1}{R_t} (T_e - T_i)_{max} = 5.9 \text{ W/m}^2, \quad (19)$$

y la diferencia de temperatura máxima en cada capa de material es

$$\Delta T_{max} = \frac{R}{R_t} (T_e - T_i)_{max} \quad (20)$$

donde $R = \varepsilon/\lambda$ y $R_t = \Sigma \varepsilon/\lambda + R_{si} + R_{se}$ son las resistencias térmicas de la capa considerada y la total del muro, respectivamente, cuyos valores se presentan en Tabla 1.

Interesa analizar la respuesta dinámica del muro cuando se lo somete a una diferencia de temperatura que varía sinusoidalmente con un periodo de 24 h. Se adopta $T_i = 20^\circ\text{C} = \text{const}$ y una fluctuación diurna de $\pm 10^\circ\text{C}$. Así,

$$T_e(t) = 20^\circ\text{C} + 10^\circ\text{C} \sin(2\pi t/24), \quad (21)$$

aunque los resultados se generalizan fácilmente para cualquier valor de T_i y de la amplitud de la fluctuación de temperatura.

Los resultados de la simulación numérica se muestran en la Fig. 2. La distribución de temperatura presenta cambios bruscos sobre la interface externa (donde T_e cambia a T_1) y entre el ladrillo visto y el EPS ($x/x_0 = 0.12/0.3 = 0.4$) debido a la significativa diferencia entre los valores de las propiedades de los materiales encontrados a ambos lados de esas interfaces. En cambio, a lo ancho del muro, q varía suavemente desde la pared externa, básicamente por conservación de la energía como se mencionó más arriba.

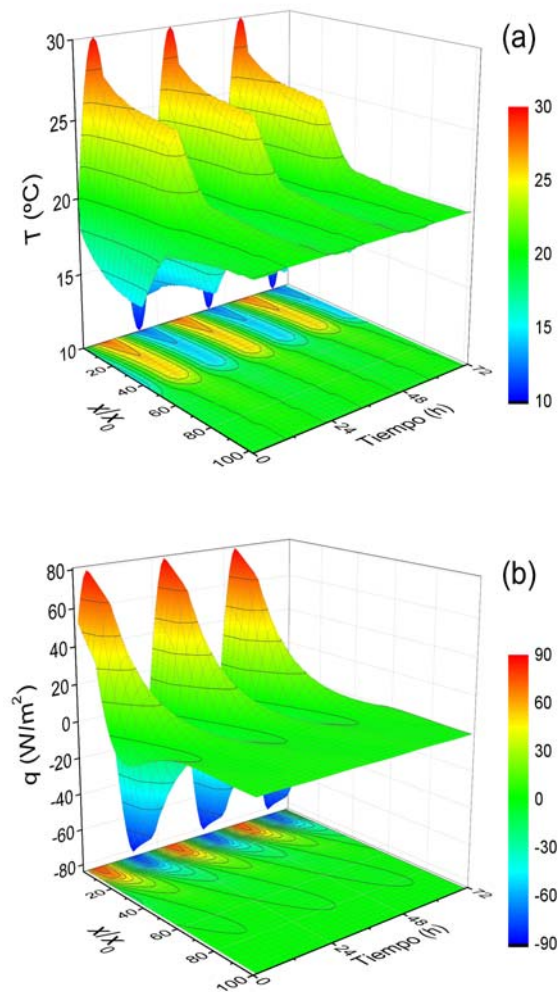


Figura 2. Distribución espacio-temporal de (a) temperatura y (b) flujo de calor por unidad de área.

Los perfiles espaciales de la temperatura y el flujo de calor máximos se muestran en la Fig. 3. Se observa que q_{max} decae casi linealmente desde su valor más grande ($\approx 81 \text{ W/m}^2$) en la cara externa del muro hasta un valor muy pequeño ($\approx 4.7 \text{ W/m}^2$) cuando alcanza al EPS en $x/x_0 = 0.40$; a partir de esta posición, q_{max} sigue decayendo hasta su valor mínimo ($\approx 1.9 \text{ W/m}^2$) en la cara interna. Por otra parte, como era de esperar, se observan cambios bruscos en el gradiente de temperatura cuando la conductividad del medio cambia abruptamente (ec. 1). El cambio de temperatura en la capa de aire superficial es importante ya que R_{se} es muy

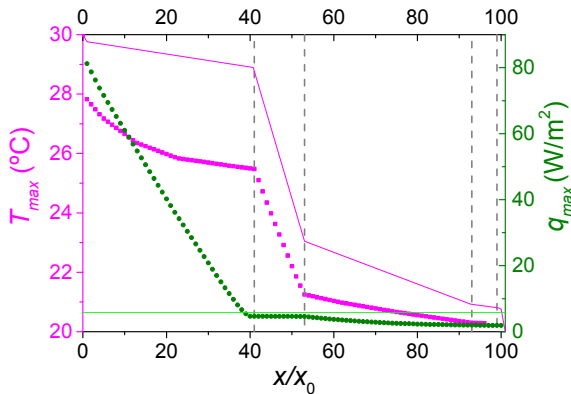


Figura 3: Perfiles espaciales de temperatura (magenta) y flujo de calor (verde) máximos en el muro 1 resultantes de la simulación numérica (puntos) y correspondientes soluciones en el régimen estacionario (líneas).

diferente de aquella de la primera capa (ver Tabla 1 y ec. 7) y el flujo de calor alcanza su máximo allí. Este q_{max} es consistente con un cambio brusco de temperatura en la superficie, mucho mayor que el encontrado en el régimen estacionario. En efecto, como q_{ss} es uniforme, la variación de temperatura en el régimen estacionario es mínima en la capa superficial externa y tres veces más grande en la capa interna debido al diferente valor de R_s ($R_{se} = 0.04$ y $R_{si} = 0.13$). La comparación entre la ordenada de la línea horizontal verde y la de los puntos verdes (Fig. 3) sugiere que una cantidad de calor mucho mayor que q_{ss} es intercambiado entre el medio exterior y el ladrillo visto. El flujo de calor no estacionario es similar a q_{ss} a través del aislante, pero mucho menor a través del ladrillo hueco.

En la Fig. 4 se representa la evolución de la temperatura y del flujo de calor en cada interface. Se observa la extraordinaria disminución de q_{max} desde la pared externa al aislante térmico en $x = 0.12 \text{ m}$, de acuerdo con los resultados mostrados en Fig. 3. En el caso de la temperatura, se observa una menor disminución de la amplitud a distancias mayores desde la cara externa, pero también se nota un retraso de las variaciones que es importante ya luego de atravesar la capa superficial de aire externa. Los retrasos totales experimentados por T y q , luego de atravesar todo el muro, son similares.

	R ($\text{m}^2\text{K/W}$)	ϵ (m)	λ ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)	ρ (kg/m^3)	C_p (J/kgK)	D (m^2/s)	Δt (s)
R_{se}	0.04						
Ladrillo macizo	0.15	0.120	0.81	1600	1000	5.1×10^{-7}	18.0
EPS	1.00	0.0370	0.037	17	1700	1.3×10^{-6}	7.1
Ladrillo hueco	0.40	0.120	0.30	800	920	4.5×10^{-7}	20.2
Revoque grueso	0.02	0.020	0.93	1400	1050	6.3×10^{-7}	14.4
Revoque fino	0.01	0.005	0.70	1400	1012	4.9×10^{-7}	18.5
R_{si}	0.13						
Totales	$R_t = 1.75$	$x_0 = 0.30$					

TABLA 1: PROPIEDADES DEL MURO 1 EVALUADO.

	R ($\text{m}^2\text{K/W}$)	ϵ (m)	λ ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)	ρ (kg/m^3)	C_p ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$)	D $\times 10^{-7}$ (m^2/s)	Δt (s)
R_{se}	0.04						
Revoque fino	0.01	0.005	0.7	1400	1012	4.9	18.5
Revoque grueso	0.02	0.020	0.9	1400	1050	6.3	14.4
Ladrillo hueco	0.4	0.200	0.5	800	920	6.8	22.4
Revoque grueso	0.02	0.020	0.9	1400	1050	6.3	14.4
Revoque fino	0.01	0.005	0.7	1400	1012	4.9	18.5
R_{si}	0.13						
Totales	$R_t = 0.63$	$x_0 = 0.25$					

TABLA 2: PROPIEDADES DEL MURO 2 EVALUADO.

De particular interés resulta encontrar la evolución de la posición del máximo de temperatura mostrado por la línea magenta en Fig. 5. Al igual que en Fig. 4, esta línea indica que los máximos correspondientes a diferentes profundidades no se alcanzan al mismo tiempo como ocurriría bajo la hipótesis de régimen estacionario. Por el contrario, hay un retraso de unas 10 h entre los tiempos para los cuales se alcanzan los máximos en $x = 0$ y $x = x_0$. Lo que importa, sin embargo, es el retardo φ (Ec. 10) que surge de comparar la evolución de la temperatura en $x = 0$ y la del flujo de calor en $x = x_0$.

Aplicando el método de la admitancia para este muro²³, se encuentran $Y = 3.9 \text{ W/m}^2\text{°C}$, $f = 0.32$, $\varphi = 10 \text{ h}$ y $u = 0.19 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Calculados con ecs. (9) y (11) a partir de los resultados numéricos, resulta que $Y \approx 3.7 \text{ W/m}^2\text{°C}$, $f \approx 0.33$, $\varphi \approx 10 \text{ h}$ y $u = 0.16 \text{ W/m}^2\text{°C}$. La admitancia obtenida de la simulación presenta el mayor error (5%), posiblemente por la falta de resolución espacial de la CC (15). De la comparación entre estos resultados, y del cotejo detallado entre todos los resultados numéricos y teóricos (no mostrado por cuestiones de brevedad), puede concluirse que la solución numérica de la ecuación de difusión del calor representa razonablemente bien la transferencia de calor a través del muro 1.

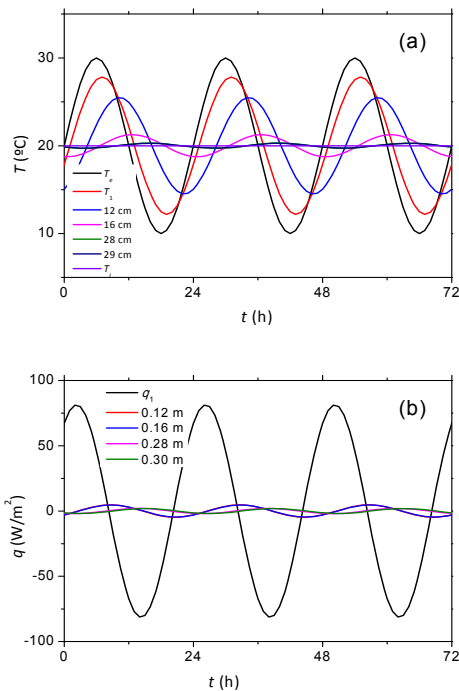


Figura 4: Evolución de temperatura (a) y flujo de calor (b) en las interfaces entre los materiales que componen el muro 1.

Muro 2: ladrillo hueco revocado

Un tipo de muro muy usado en Argentina es el construido con ladrillos huecos revocado en ambas caras, de 0.25 m de ancho total, cuyas características típicas se listan en la Tabla 2. Como es usual, y a los efectos del cálculo de la transferencia de calor, el bloque cerámico se trata como un sólido continuo con valores promedios de densidad, capacidad calorífica y

conductividad térmica de los alvéolos interiores y de los espacios vacíos. Con respecto al muro 1, el muro 2 presenta principalmente una mayor conductividad y menores densidad y calor específico, además de tener un menor ancho total. En la última columna se consignan los intervalos temporales Δt para los diferentes materiales, calculados con Ec. (14) con $C = 1$ y $\Delta x = x_0/100 = 0.0025 \text{ m}$.

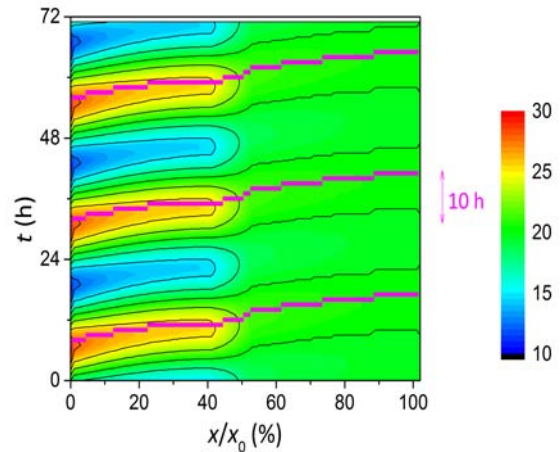


Figura 5: Gráfico de contorno de la distribución de temperatura mostrada en Fig. 2(a). La línea magenta indica la posición de los máximos de temperatura en función del tiempo.

Los resultados de la simulación numérica (Figs. 6 y 7) muestran la disminución de q_{max} (puntos verdes) desde el contorno exterior. El flujo de calor ($\approx 9.9 \text{ W/m}^2$) que pasa a la cara interna del muro ($x/x_0 = 100\%$) es menor que el que atraviesa la cara externa ($\approx 55.2 \text{ W/m}^2$), y también que q_{ss} (15.9 W/m^2 , línea verde horizontal). Esta reducción del flujo de calor se debe a que el muro 2 transmite hacia el interior sólo en parte las variaciones temporales de la temperatura exterior. Así, la carga térmica de esta envolvente debida a la conducción del calor y calculada con la resistencia térmica en el régimen estacionario (esto es, con q_{ss}) también arroja un resultado diferente al encontrado cuando se considera la respuesta dinámica.

En la Fig. 8 se representa la evolución de la temperatura y del flujo de calor en cada interface. Se observa que la disminución de la amplitud de las variaciones es grande en ambos casos, y un cierto retraso de las fluctuaciones al atravesar la pared. De hecho, entre la evolución de T y q en el contorno interior (líneas verdes) hay una diferencia de fase $\varphi_Y \approx 3.5 \text{ h}$, como lo muestra la Fig. 9. Como resultado se encuentra $Y \approx 3.4 \text{ W/m}^2$, $f \approx 0.62$, $\varphi \approx -5.5 \text{ h}$ y $u \approx 0.99 \text{ W/m}^2$. Mientras, del método de la admitancia²³ resulta $Y = 3.9 \text{ W/m}^2$, $f = 0.62$, $\varphi = -5.9 \text{ h}$ y $u = 0.99 \text{ W/m}^2$. Las curvas correspondientes a $x \leq 0.025 \text{ m}$ representan la evolución de los valores de T y q en las interfaces hasta el revoque grueso de la cara exterior, mientras que las curvas correspondientes a $x \geq 0.225 \text{ m}$ representan la evolución de los valores de T y q en las interfaces presentes entre el revoque grueso interior hasta la superficie interior.

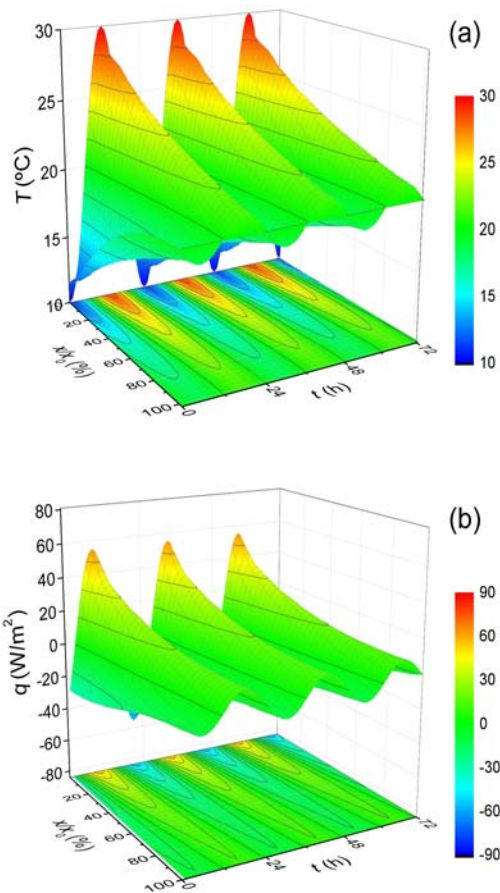


Figura 6. Distribución espacio-temporal de (a) temperatura y (b) flujo de calor por unidad de área del muro 2.

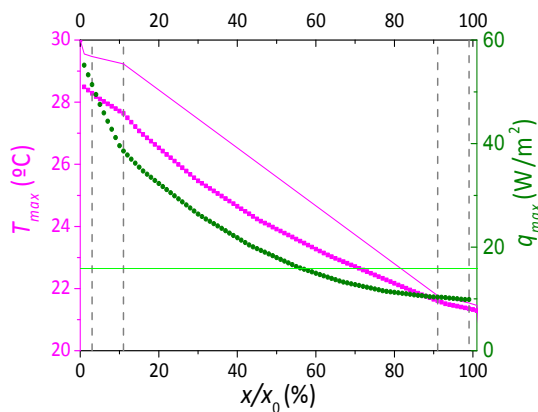


Figura 7: Perfiles espaciales de temperatura (magenta) y flujo de calor (verde) máximos en el muro 2 resultantes de la simulación numérica (puntos) y correspondientes soluciones en el régimen estacionario (líneas).

IV. DISCUSIÓN

Se simuló la transferencia de calor no estacionaria por medio de un código sencillo y fácil de programar. Si bien aquí se empleó *Matlab*, existen códigos y subrutinas para Fortran, C++, etc. que facilitan la construcción del programa. También hay versiones comerciales que permiten la resolución de la ecuación

de difusión del calor por diferencias finitas, elementos finitos, métodos espectrales, etc. Sin embargo, mostramos que la resolución con el tradicional y más simple método de diferencias finitas de segundo orden en el espacio y explícito en el tiempo es suficiente para resolver la ecuación de difusión del calor sin demasiados inconvenientes con un nivel intermedio de conocimiento de cálculo numérico. Otros métodos o esquemas para aproximar la derivada temporal pueden tener mejor resolución y/o ser más eficientes computacionalmente, aunque suelen requerir mayor conocimiento de programación. Sin embargo, lo importante no es el código sino usarlo bien conociendo sus limitaciones y los errores de cálculo.

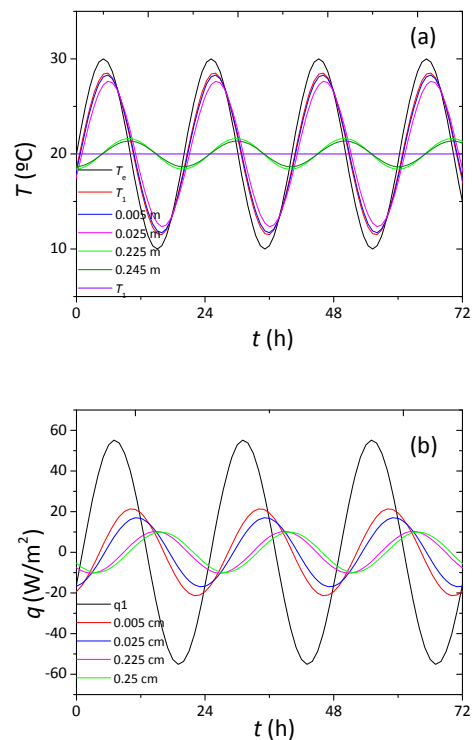


Figura 8: Evolución de temperatura (a) y flujo de calor (b) en las interfaces entre los materiales que componen el muro 2.

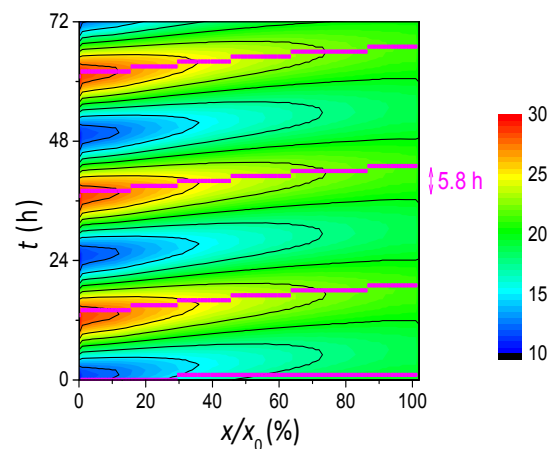


Figura 9: Gráfico de contorno de la distribución de temperatura. La línea magenta indica la posición de los máximos de temperatura en función del tiempo.

Comúnmente se usa la Ec. (6) para evaluar la transferencia de calor a través de un medio homogéneo. En este caso, el comportamiento térmico del medio se determina mediante la difusividad térmica que relaciona la conductividad térmica, la densidad y el calor específico del material. Si el medio no es homogéneo, la conductividad térmica y el producto entre la densidad y el calor específico deben considerarse por separado. Ambos parámetros establecen el comportamiento térmico de cada capa y, en definitiva, las características dinámicas del muro completo. La clásica Ec. (6) cambia a la forma de Ec. (5), y entonces es necesario modificar los códigos estándares de simulación que están preparados para resolver la Ec. (6). De lo contrario el flujo de calor a través de las diferentes interfaces internas del muro no cumple la condición (4), o lo hace con un error muy grande, y pueden obtenerse resultados erróneos si hay capas adyacentes con características térmicas apreciablemente diferentes.

Otro punto crítico de la simulación numérica es la elección de las CC y CI. Las capas límites superficiales de aire externa e interna se consideran por medio de los coeficientes convectivos correspondientes o, en forma equivalente, mediante las resistencias térmicas superficiales R_{se} y R_{si} . Esto permite empalmar T_e o T_i con T_1 y T_{N+1} , lográndose la necesaria conservación del flujo de calor en la capa límite a pesar de las muy diferentes características térmicas del aire y del muro.

Los resultados de la simulación numérica de la transferencia de calor por conducción a través de los dos muros analizados indican que las fluctuaciones de T_e tardan varias horas en manifestarse sobre la superficie interna. Para el muro de ladrillo hueco revocado, la resistencia $R_t = 0.63 \text{ m}^2\text{C/W}$ es menor que la del muro doble ($R_t = 1.75 \text{ m}^2\text{C/W}$), por lo que el flujo de calor por conducción que lo atraviesa experimenta una menor reducción bajo los efectos de la variación diurna de T_e , aun cuando tenga menor capacidad calorífica ρC_p .

V. CONCLUSIONES

Los resultados de simulaciones numéricas como las presentadas aquí mejoran la comprensión de la respuesta dinámica de las diferentes capas de material que componen un muro y su contribución al comportamiento térmico global del mismo. También es posible simular las variaciones reales de temperatura en una parte determinada de la envolvente para evaluar sus efectos sobre el flujo de calor, y visualizar los efectos de la variación diurna de la temperatura exterior sobre las diferentes capas. Se muestra que con muros perimetrales dobles con aislante interior antes que con muros de ladrillo hueco se obtienen una menor transferencia térmica dinámica y un mayor tiempo de retraso. En consecuencia, puede inferirse que el muro 1 ofrece la mejor opción para resguardar el interior edilicio de las variaciones diurnas de temperatura, preservar por más tiempo las condiciones internas. Este último punto implica un menor requerimiento energético para mantener las condiciones de confort

térmico interior si se utiliza el muro 1 para construir la envolvente.

Por otra parte, el problema tratado constituye una interesante aplicación de la solución de la ecuación del flujo de calor a través de medios inhomogéneos, con CC que involucran capas límites de aire adyacentes a contornos rígidos, y de cómo obtener información física relevante de los procesos relacionados con la conducción del calor a través de interfaces térmicas.

VI. REFERENCIAS

- 1 - IVBA *Normas Técnicas para Proyectos de Conjuntos Habitacionales*. Cap. 4: Acondicionamiento higrotérmico de edificios. Instituto de la Vivienda de la Provincia de Buenos Aires (2014) Disponible en: http://www.vivienda.mosp.gba.gov.ar/programas/normas_tec.pdf.
- 2 - Lanzetti A. *Manual de Aplicación Ley 13059: Acondicionamiento higrotérmico de edificios*. Instituto de la Vivienda de la Provincia de Buenos Aires (2014). Disponible en: http://www.vivienda.mosp.gba.gov.ar/varios/manual_ac_higrotermico.pdf.
- 3 - ASHRAE *Fundamentals Handbook*. Disponible en <https://www.ashrae.org> (2001).
- 4 - Norma IRAM-11603. Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina (2012). IRAM-11604. Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en calefacción. Coeficiente volumétrico G de pérdidas de calor. Cálculo y valores límites (2001). IRAM- 11659. Acondicionamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en refrigeración (2007).
- 5 - Flores Larsen S., Filippin C. y Flores L. *Open Construct Build Tech J*, 2, 217-223 (2008).
- 6 - Yan C., Wang S., Shan K. y Lu Y. *Appl. Therm. Eng.*, 77, 30-41 (2015).
- 7 - Thomas L.P. y Marino B.M. *AVERMA*, 12, 05.25-32 (2008).
- 8 - Mercado M.V., Flores Larsen S., Esteves A. y Filippin C. *AVERMA*, 14, 03.31-38 (2010).
- 9 - Balter J., Ganem C. y Discoli C. *AVERMA*, 16, 05.59-66 (2012).
- 10 - Marino B.M., Muñoz N. y Thomas L.P. *Appl. Therm. Eng.*, 114, 1213-1221 (2016).
- 11 - Kuehn T.H., Ramsey W.W. y Threlkeld J.L. *Thermal Environmental Engineering*, pp. 481-485, 559-560, Prentice Hall, New Jersey (2001).
- 12 - Davis M.G. *Build. Environ.* 29, 2, 217-235 (1994).
- 13 - Filippin C., Flores Larsen S. y Lesino G. *AVERMA*, 6, 05.19-24 (2002).
- 14 - Czajkowski J.D., Gómez A.F. y Bianciotto M.G. *AVERMA*, 12, 05.33-40 (2008).
- 15 - Asan H. y Sancaktar Y. *Energ. Buildings*, 28, 9, 159-166 (1997).
- 16 - Ozel M. y Pihitli K. *Build. Environ.*, 42, 8, 3051-3059 (2007).
- 17 - Chen C. y Krokosky E. *Mat. Constr.*, 9, 1, 19-32 (1976).
- 18 - Al-Sanea S. *Build. Environ.*, 38, 8, 1039-49 (2003).
- 19 - Barrios G., Huelsz G. y Rojas. J. *Appl. Therm. Eng.*, 40, 1-7 (2012).

- 20 - Gottlieb D. y Orzag S. *Numerical Analysis of Spectral Methods: Theory and Applications*, SIAM, Philadelphia, PA (1977).
- 21 - Kontoleon K. y Bikas D. *Energ. Buildings*, 39, 9, 1011-1018 (2007).
- 22 - Gasparella A., Pernigotto G., Baratieri M. y Baggio P. *Energ. Buildings*, 43, 9, 2509-2517 (2011).
- 23 - Muñoz N., Thomas L.P. y Marino B.M. *ERMA*, 36, 31-39 (2015).
- 24 - Sandrolini F., Franzoni E. *Build. Environ.* 41, 1372–1380 (2006).
- 25 - Hazewinkel M. ed. *Parabolic partial differential equation, numerical methods*. *Encyclopaedia of Mathematics*, Springer (2001).
- 26 - Thomas J.W. *Numerical Partial Differential Equations: Finite Difference Methods*. *Texts in Applied Mathematics*, vol. 22, Springer-Verlag, New York (1995).