

ANÁLISIS DE LA RESPUESTA TÉRMICA DE UN MURO SOLAR COMPUESTO (*)

M. Machado, R. Seffino y R. Gaspar
Instituto de Física Rosario
Av. Pellegrini 250 - 2000 Rosario Argentina

Resumen

Se desarrolla un esquema de cálculo unidimensional por diferencias finitas para la determinación del comportamiento térmico de un muro solar. El modelo permite simular sistemas compuestos por varias capas de diferentes materiales. Dentro del muro se supone que el calor fluye por conducción. Sobre la cara interior se admite transferencia convectiva y convección-radiativa sobre la exterior.

El modelo se emplea en el análisis de un muro compuesto por dos capas de mamposteado de ladrillo y una aislación de poliuretano.

Se analizan las transferencias de energía dentro del muro y en sus superficies límites para diferentes espesores y posiciones de la capa aislante, y se discuten los resultados obtenidos, elaborándose las conclusiones correspondientes.

Introducción

En el análisis energético de una vivienda solar interesa frecuentemente conocer la respuesta térmica de muros expuestos a esta fuente de energía. En un trabajo anterior (1) se ha analizado la manera de evaluar el comportamiento de muros homogéneos. Sin embargo, existen casos donde el muro no cae en esa tipificación. Un ejemplo es el de la vivienda electro-solar (2), cuyas paredes están formadas por varias capas de materiales diferentes.

Formulación del Modelo

Se consideran muros formados por ca-

*) Trabajo parcialmente financiado por el Programa Nacional de Energía

pas de diferentes materiales como se indica en la Fig. 1, en los cuales dos de sus dimensiones son predominantes frente a la restante.

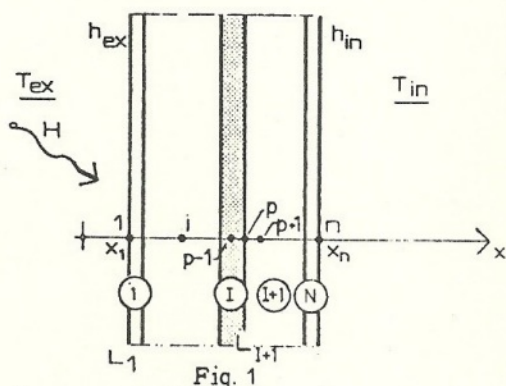


Fig. 1

En el esquema de diferencias finitas, la solución se obtiene aproximando las ecuaciones diferenciales parciales por ecuaciones algebraicas que involucran los valores de $T(x, t)$ en los puntos interiores al contorno \mathcal{L} y en sus fronteras.

Las derivadas parciales se reemplazan por las siguientes diferencias finitas (ver fig. 2).

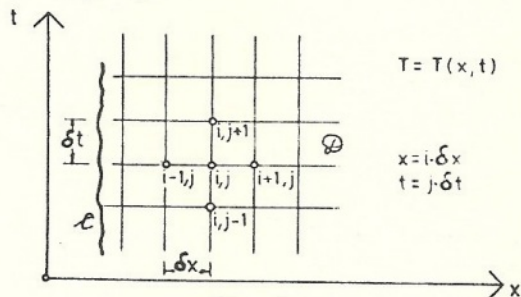


Fig. 2

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)_{ij} \approx \frac{T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}}{(\delta x)^2} \quad 3.1$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{ij} \approx \frac{T_{i+1,j} - T_{i-1,j}}{2\delta x} \quad 3.2$$

No Convencional de la Subsecretaría de Estado de Ciencia y Tecnología.

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_i \approx \frac{T_{ij+1} - T_{ij}}{\delta t} \quad 3.3.$$

Para la evaluación de la solución aproximada se construye un modelo geométrico, definiendo en cada una de las capas nodos equidistantes, denominados Puntos Nodales y que sirven de apoyo para el cálculo de la temperatura.

En el esquema de Crank-Nicolson (3), la derivada espacial se toma como el promedio de su valor para los instantes de tiempo J. δt y (J+1). δt . En este esquema de dos niveles propuesto, las condiciones de borde se introducen como el promedio de las correspondientes a los dos instantes consecutivos de tiempo considerados. Para un nodo genérico i interno de cada capa vale la Ec. 3.4,

$$\begin{aligned} -r_1 \alpha_1 T_{i-1,j+1} + (2 + 2r_1 \alpha_1) T_{i,j+1} - r_1 \alpha_1 T_{i+1,j+1} = \\ = r_1 \alpha_1 T_{i-1,j} + (2 - 2r_1 \alpha_1) T_{i,j} + r_1 \alpha_1 T_{i+1,j} \end{aligned} \quad 3.4$$

• $r_1 = \delta t / (\delta x)^2$; $\alpha_1 = k_1 / (\rho_1 c_1)$

Para los nodos en la interfase entre dos capas, planteando la conservación de la energía, se tiene,

$$\begin{aligned} -2r'_1 \alpha'_1 T_{p-1,j+1} + [2 + 2(r'_1 \alpha'_1)] T_{p,j+1} - r'_1 \alpha'_1 T_{p+1,j+1} = \\ = 2r'_1 \alpha'_1 T_{p-1,j} - [2 - 2(r'_1 \alpha'_1)] T_{p,j} + r'_1 \alpha'_1 T_{p+1,j} \end{aligned} \quad 3.5$$

• $r'_1 = \delta t / (\delta x_p)^2$; $r'_{1+1} = \delta t / (\delta x_{1+1})^2$
 • $r'_p = r'_1$
 $\alpha'_1 = k_1 / (\rho_1 c_1 \delta x_1 + \rho_{1+1} c_{1+1} \delta x_{1+1})$
 $\alpha'_{1+1} = (k_{1+1} / k_1) \cdot \alpha'_1$
 • $\alpha'_p = \alpha'_1 + \alpha'_{1+1} (r'_{1+1} / r'_1)$

En la cara interna se acepta una condición de borde convectiva,

$$\begin{aligned} -2r_N \alpha_N T_{n-1,j+1} + [2 + 2r_N \alpha_N (1 + \delta x_N \frac{h_{in}}{k_N})] T_{n,j+1} = \\ = 2r_N \alpha_N T_{n-1,j} + [2 - 2r_N \alpha_N (1 + \delta x_N \frac{h_{in}}{k_N})] T_{n,j} + \\ + 4r_N \alpha_N \delta x_N \frac{h_{in}}{k_N} T_{in} \end{aligned} \quad 3.6$$

Para la externa, debe considerarse también la radiación solar H, obteniéndose de manera análoga la ecuación algebraica correspondiente,

$$\begin{aligned} [2 + 2r_1 \alpha_1 (1 + \delta x_1 \frac{h_{ex}}{k_1})] T_{1,j+1} - 2r_1 \alpha_1 T_{2,j+1} = \\ = [2 - 2r_1 \alpha_1 (1 + \delta x_1 \frac{h_{ex}}{k_1})] T_{1,j} + 2r_1 \alpha_1 T_{2,j} + \\ + 2r_1 \alpha_1 \delta x_1 [h_1 (T_{j+1} + T_j)_{ex} + (H_{j+1} + H_j)] \end{aligned} \quad 3.7$$

Si se conoce la condición inicial para J=0, las ecuaciones anteriores con

forman un sistema compatible, cuya solución da la temperatura para J=1. Iterando este proceso para los J sucesivos se obtiene la solución buscada del problema.

El esquema de cálculo puede ser expresado en forma matricial,

$$[B] \{T\}_{j+1} = [B] \{T\}_j + [C]$$

$$[B] = 2[I] - \{r\} \{\alpha\} [O_N]$$

$$[B] = 2[I] + \{r\} \{\alpha\} [O_N]$$

$$\{T\}_{j+1} = [4B^{-1} - I] \{T\}_j + [B]^{-1} \{C\}$$

$$\{T\}_j = \begin{Bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_{p-1} \\ T_p \\ T_{p+1} \\ \vdots \\ T_n \end{Bmatrix}_j \quad \{T\}_{j+1} = \begin{Bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_{p-1} \\ T_p \\ T_{p+1} \\ \vdots \\ T_n \end{Bmatrix}_{j+1}$$

$$[O_N] = \begin{bmatrix} -2(1 + \frac{h_{ex} \delta x_1}{k_1}) & & & & & & & 0 \\ & 1 & -2 & 1 & & & & \\ & & 1 & -2 & 1 & & & \\ & & & 2 & -2 & 1 & & \\ & & & & 1 & -2 & 1 & \\ & 0 & & & & 1 & -2 & 1 \\ & & & & & & 2 & -2(1 + \frac{h_{in} \delta x_n}{k_n}) \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 2r_1 \alpha_1 \frac{\delta x_1}{k_1} [h_{ex} (T_{j+1} + T_j)_{ex} + (H_{j+1} + H_j)] \\ \\ \\ \\ \\ \\ 2r_N \alpha_N \frac{\delta x_N}{k_N} h_{in} (T_{j+1} + T_j)_{in} \end{bmatrix}$$

$$r_1 = \delta t / (\delta x_1)^2$$

$$r'_{1+1} = \delta t / (\delta x_{1+1})^2$$

$$r'_p = r'_1$$

$$\alpha'_1 = k_1 / (\rho_1 c_1 \delta x_1)$$

$$r'_{1+1} = \delta t / (\delta x_{1+1})^2$$

$$\frac{d^2 x_i}{dt^2} + \alpha'_{i,1} \left(\frac{r'_{i,1}}{r_{i,1}} \right) \frac{dx_i}{dt} + \rho_{i,1} \cdot c_{i,1} \cdot \frac{dx_i}{dt} + \rho_{i,1} \cdot c_{i,1} \cdot \frac{dx_{i-1}}{dt} = 0$$

La estabilidad del esquema se analizó mediante el método matricial (3), utilizando el Teorema de Brauer.

Para el cálculo de la radiación solar sobre el muro se usa el modelo de Langford para días claros (4), modificado por la heliofanía, constante por día, a los efectos de introducir un factor de atenuación para la radiación directa.

La temperatura ambiente se da por un caso de Fourier de dos armónicos, cuyos parámetros se obtienen de los promedios mensuales para cada hora observados de registros meteorológicos.

Aplicación del modelo

Se analizaron muros no acumuladores verticales orientados al Norte, compuestos por mampostería de ladrillo, poluretano expandido y revestimiento. En este trabajo se estudiaron muros con un único espesor de mampostería y distintos espesores y posiciones de la capa aislante.

Se consideró para todos los casos espesores de una absorbancia de 0.80 para la superficie expuesta a la radiación solar.

Para los coeficientes convectivos de transferencia de calor externo e interno se adoptaron los siguientes valores:

$$h_{ex} = 6,9680 \quad J/(m^2Cs)$$

$$h_{in} = 2,8006 \quad J/(m^2Cs),$$

que corresponden a velocidades de aire constante sobre cada cara.

La temperatura interna del recinto se supone constante, e igual a 18°C en invierno y 23°C en verano, valores aceptables para el confort.

Se calcularon los perfiles de temperatura dentro del muro, los flujos de energía sobre cada una de las caras, la energía media almacenada, la transmitancia, la inercia térmica y la potencia media aportada por el muro al recinto interior.

En la Fig. 3 se muestran perfiles de temperatura y en la Fig. 4 los flujos sobre cada una de las caras, para el muro compuesto por dos capas de ladrillo con aislación intermedia, en un día característico de invierno. Su comportamiento, se comparó con otros muros también de tres capas que utilizaran los mismos materiales.

En las tablas I y II se dan las características de cada muro y los pa-

rámetros térmicos de los materiales. En la Tabla III se muestran los valores medios obtenidos para el mes de Junio para la transmitancia y la inercia térmica en los diferentes casos estudiados.

En la Tabla IV se indica la potencia media transmitida desde el exterior hacia el muro y desde su cara interna hacia el recinto interior, para invierno y verano.

TABLA I

Descripción de los muros analizados. Los espesores de las capas se dan en metros.

MURO	CAPA EXTERNA	CAPA MEDIA	CAPA INTERNA
1	Mamp. 0,15	Polu. 0,05	Mamp. 0,15
2	Mamp. 0,15	Polu. 0,025	Mamp. 0,15
3	Mamp. 0,30	Polu. 0,05	Revt. 0,03
4	Mamp. 0,30	Polu. 0,025	Revt. 0,03
5	Revt. 0,03	Polu. 0,05	Mamp. 0,30
6	Revt. 0,03	Polu. 0,025	Mamp. 0,30

TABLA II

Propiedades térmicas de los materiales de los muros.

MATERIAL	ρ [Kg/m ³]	C [J/(Kg C)]	k [W/(m ² C)]	α [m ² /s]
MAMP.	1800,0	920,0	0,916	0,555E-06
REV.	2000,0	1000,0	1,160	0,580E-06
POLU.	40,0	1700,0	0,038	0,559E-06

TABLA III

Valores obtenidos de transmitancia e inercia térmica.

MURO	TRANSMITANCIA [J/(m ² C día)]	INERCIA TERMICA [h]
1	1,6 × 10 ⁵	9,3
2	1,6 × 10 ⁵	9,9
3	1,8 × 10 ⁵	9,1
4	1,9 × 10 ⁵	9,2
5	1,1 × 10 ⁵	9,4
6	1,2 × 10 ⁵	9,5

TABLA IV

Flujos medios externos e internos (W/m²)

ANÁLISIS DE LA RESPUESTA TÉRMICA DE UN MURO SOLAR COMPUESTO (*)

M. Machado, R. Seffino y R. Gaspar
Instituto de Física Rosario
Av. Pellegrini 250 - 2000 Rosario Argentina

Resumen

Se desarrolla un esquema de cálculo unidimensional por diferencias finitas para la determinación del comportamiento térmico de un muro solar. El modelo permite simular sistemas compuestos por varias capas de diferentes materiales. Dentro del muro se supone que el calor fluye por conducción. Sobre la cara interior se admite transferencia convectiva y convección-radiativa sobre la exterior.

El modelo se emplea en el análisis de un muro compuesto por dos capas de mamposteado de ladrillo y una aislación de poliuretano.

Se analizan las transferencias de energía dentro del muro y en sus superficies límites para diferentes espesores y posiciones de la capa aislante, y se discuten los resultados obtenidos, elaborándose las conclusiones correspondientes.

Introducción

En el análisis energético de una vivienda solar interesa frecuentemente conocer la respuesta térmica de muros expuestos a esta fuente de energía. En un trabajo anterior (1) se ha analizado la manera de evaluar el comportamiento de muros homogéneos. Sin embargo, existen casos donde el muro no cae en esa tipificación. Un ejemplo es el de la vivienda electro-solar (2), cuyas paredes están formadas por varias capas de materiales diferentes.

Formulación del Modelo

Se consideran muros formados por ca-

*) Trabajo parcialmente financiado por el Programa Nacional de Energía

pas de diferentes materiales como se indica en la Fig. 1, en los cuales dos de sus dimensiones son predominantes frente a la restante.

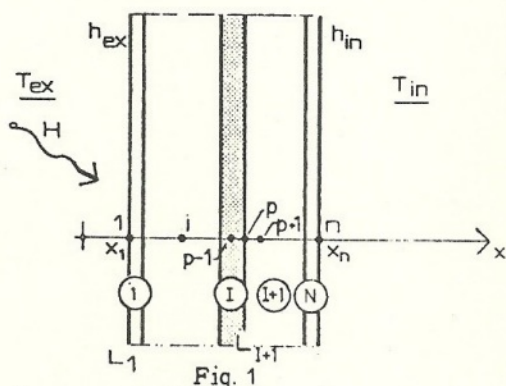


Fig. 1

En el esquema de diferencias finitas, la solución se obtiene aproximando las ecuaciones diferenciales parciales por ecuaciones algebraicas que involucran los valores de $T(x, t)$ en los puntos interiores al contorno \mathcal{L} y en sus fronteras.

Las derivadas parciales se reemplazan por las siguientes diferencias finitas (ver fig. 2).

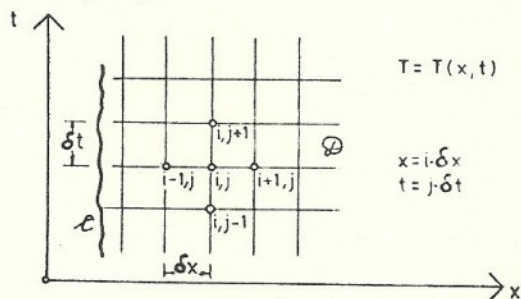


Fig. 2

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)_{ij} \approx \frac{T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}}{(\delta x)^2} \quad 3.1$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{ij} \approx \frac{T_{i+1,j} - T_{i-1,j}}{2\delta x} \quad 3.2$$

No Convencional de la Subsecretaría de Estado de Ciencia y Tecnología.

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_i \approx \frac{T_{ij+1} - T_{ij}}{\delta t} \quad 3.3.$$

Para la evaluación de la solución aproximada se construye un modelo geométrico, definiendo en cada una de las capas nodos equidistantes, denominados Puntos Nodales y que sirven de apoyo para el cálculo de la temperatura.

En el esquema de Crank-Nicolson (3), la derivada espacial se toma como el promedio de su valor para los instantes de tiempo $J. \delta t$ y $(J+1). \delta t$. En este esquema de dos niveles propuesto, las condiciones de borde se introducen como el promedio de las correspondientes a los dos instantes consecutivos de tiempo considerados. Para un nodo genérico i interno de cada capa vale la Ec. 3.4,

$$\begin{aligned} & -r_1 \alpha_1 T_{i-1,j+1} + (2 + 2r_1 \alpha_1) T_{i,j+1} - r_1 \alpha_1 T_{i+1,j+1} = \\ & = r_1 \alpha_1 T_{i-1,j} + (2 - 2r_1 \alpha_1) T_{i,j} + r_1 \alpha_1 T_{i+1,j} \\ & \cdot r = \delta t / (\delta x)^2 ; \quad \alpha_1 = k_1 / (\rho_1 c_1) \end{aligned} \quad 3.4.$$

Para los nodos en la interfase entre dos capas, planteando la conservación de la energía, se tiene,

$$\begin{aligned} & -2r'_1 \alpha'_1 T_{p-1,j+1} + [2 + 2(r'_1 \alpha'_1)] T_{p,j+1} - r'_{1+1} \alpha'_{1+1} T_{p+1,j+1} = \\ & = 2r'_1 \alpha'_1 T_{p-1,j} - [2 - 2(r'_1 \alpha'_1)] T_{p,j} + r'_{1+1} \alpha'_{1+1} T_{p+1,j} \end{aligned} \quad 3.5.$$

$$\begin{aligned} \cdot r'_1 &= \delta t / (\delta x_p)^2 ; \quad r'_{1+1} = \delta t / (\delta x_{p+1})^2 \\ \cdot r'_p &= r'_1 \\ \alpha'_1 &= k_1 / (\rho_1 c_1 \delta x_1 + \rho_{1+1} c_{1+1} \delta x_{1+1}) \\ \alpha'_{1+1} &= (k_{1+1} / k_1) \cdot \alpha'_1 \\ \cdot \alpha'_p &= \alpha'_1 + \alpha'_{1+1} (r'_{1+1} / r'_1) \end{aligned}$$

En la cara interna se acepta una condición de borde convectiva,

$$\begin{aligned} & -2r_N \alpha_N T_{n-1,j+1} + [2 + 2r_N \alpha_N (1 + \delta x_N \frac{h_{in}}{k_N})] T_{n,j+1} = \\ & = 2r_N \alpha_N T_{n-1,j} + [2 - 2r_N \alpha_N (1 + \delta x_N \frac{h_{in}}{k_N})] T_{n,j} + \\ & + 4r_N \alpha_N \delta x_N \frac{h_{in}}{k_N} T_{in} \end{aligned} \quad 3.6.$$

Para la externa, debe considerarse también la radiación solar H , obteniéndose de manera análoga la ecuación algebraica correspondiente,

$$\begin{aligned} & [2 + 2r_1 \alpha_1 (1 + \delta x_1 \frac{h_{ex}}{k_1})] T_{1,j+1} - 2r_1 \alpha_1 T_{2,j+1} = \\ & = [2 - 2r_1 \alpha_1 (1 + \delta x_1 \frac{h_{ex}}{k_1})] T_{1,j} + 2r_1 \alpha_1 T_{2,j} + \\ & + 2r_1 \alpha_1 \delta x_1 [h_1 (T_{j+1} + T_j)_{ex} + (H_{j+1} + H_j)] \end{aligned} \quad 3.7$$

Si se conoce la condición inicial para $J=0$, las ecuaciones anteriores con-

forman un sistema compatible, cuya solución da la temperatura para $J=1$. Iterando este proceso para los J sucesivos se obtiene la solución buscada del problema.

El esquema de cálculo puede ser expresado en forma matricial,

$$[B] \{T\}_{j+1} = [E] \{T\}_j + [C]$$

$$[B]_i = 2[I] - \{r\} \{ \alpha \} [O_N]$$

$$[E]_i = 2[I] + \{r\} \{ \alpha \} [O_N]$$

$$\{T\}_{j+1} = [4B^{-1} - I] \{T\}_j + [B]^{-1} \{C\}$$

$$\{T\}_j = \begin{Bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_{p-1} \\ T_p \\ T_{p+1} \\ \vdots \\ T_n \end{Bmatrix}_j \quad \{T\}_{j+1} = \begin{Bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_{p-1} \\ T_p \\ T_{p+1} \\ \vdots \\ T_n \end{Bmatrix}_{j+1}$$

$$[O_N] = \begin{bmatrix} -2(1 + \frac{h_{ex} \delta x_1}{k_1}) & & & & & & & & & & & 0 \\ & 1 & -2 & 1 & & & & & & & & \\ & & 1 & -2 & 1 & & & & & & & \\ & & & 2 & -2 & 1 & & & & & & \\ & & & & 1 & -2 & 1 & & & & & \\ & & & & & 1 & -2 & 1 & & & & \\ & 0 & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & 2 & -2(1 + \frac{h_{in}}{k_N} \delta x_N) \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 2r_1 \alpha_1 \frac{\delta x_1}{k_1} [h_{ex} (T_{j+1} + T_j)_{ex} + (H_{j+1} + H_j)] \\ & & & & & & & & & & & & 0 \\ & & & & & & & & & & & & & 2r_N \alpha_N \frac{\delta x_N}{k_N} h_{in} (T_{j+1} + T_j)_{in} \end{bmatrix}$$

$$r_1 = \delta t / (\delta x_1)^2$$

$$r'_{1+1} = \delta t / (\delta x_{1+1})^2$$

$$r'_p = r'_1$$

$$\alpha'_1 = k_1 / (\rho_1 c_1)$$

$$r'_{1+1} = \delta t / (\delta x_{1+1})^2$$

$$\frac{d^2 x_i}{dt^2} + \alpha'_{i,1} \left(\frac{r'_{i,1}}{r_{i,1}} \right) \frac{dx_i}{dt} + \rho_{i,1} \cdot c_{i,1} \cdot \frac{dx_i}{dt} + \rho_{i,1} \cdot c_{i,1} \cdot \frac{dx_{i-1}}{dt} = 0$$

La estabilidad del esquema se analizó mediante el método matricial (3), utilizando el Teorema de Brauer.

Para el cálculo de la radiación solar sobre el muro se usa el modelo de Langley para días claros (4), modificado por la heliofanía, constante para cada día, a los efectos de introducir un factor de atenuación para la radiación directa.

La temperatura ambiente se da por un caso de Fourier de dos armónicos, cuyos parámetros se obtienen de los promedios mensuales para cada hora observados de registros meteorológicos.

Aplicación del modelo

Se analizaron muros no acumuladores verticales orientados al Norte, compuestos por mampostería de ladrillo, poluretano expandido y revestimiento. En este trabajo se estudiaron muros con un único espesor de mampostería y distintos espesores y posiciones de la capa aislante.

Se consideró para todos los casos espesores de una absorbancia de 0.80 para la superficie expuesta a la radiación solar.

Para los coeficientes convectivos de transferencia de calor externo e interno se adoptaron los siguientes valores:

$$h_{ex} = 6,9680 \quad J/(m^2Cs)$$

$$h_{in} = 2,8006 \quad J/(m^2Cs)$$

que corresponden a velocidades de aire constante sobre cada cara.

La temperatura interna del recinto se mantuvo constante, e igual a 18°C en invierno y 23°C en verano, valores aceptables para el confort.

Se calcularon los perfiles de temperatura dentro del muro, los flujos de energía sobre cada una de las caras, la energía media almacenada, la transmitancia, la inercia térmica y la potencia media aportada por el muro al recinto interior.

En la Fig. 3 se muestran perfiles de temperatura y en la Fig. 4 los flujos sobre cada una de las caras, para el muro compuesto por dos capas de ladrillo con aislación intermedia, en un día característico de invierno. Su comportamiento, se comparó con otros muros también de tres capas que utilizaron los mismos materiales.

En las tablas I y II se dan las características de cada muro y los pa-

rámetros térmicos de los materiales. En la Tabla III se muestran los valores medios obtenidos para el mes de Junio para la transmitancia y la inercia térmica en los diferentes casos estudiados.

En la Tabla IV se indica la potencia media transmitida desde el exterior hacia el muro y desde su cara interna hacia el recinto interior, para invierno y verano.

TABLA I

Descripción de los muros analizados. Los espesores de las capas se dan en metros.

MURO	CAPA EXTERNA	CAPA MEDIA	CAPA INTERNA
1	Mamp. 0,15	Polu. 0,05	Mamp. 0,15
2	Mamp. 0,15	Polu. 0,025	Mamp. 0,15
3	Mamp. 0,30	Polu. 0,05	Revt. 0,03
4	Mamp. 0,30	Polu. 0,025	Revt. 0,03
5	Revt. 0,03	Polu. 0,05	Mamp. 0,30
6	Revt. 0,03	Polu. 0,025	Mamp. 0,30

TABLA II

Propiedades térmicas de los materiales de los muros.

MATERIAL	ρ [Kg/m ³]	C [J/(Kg C)]	k [W/(m ² C)]	α [m ² /s]
MAMP.	1800,0	920,0	0,916	0,555E-06
REV.	2000,0	1000,0	1,160	0,580E-06
POLU.	40,0	1700,0	0,038	0,559E-06

TABLA III

Valores obtenidos de transmitancia e inercia térmica.

MURO	TRANSMITANCIA [J/(m ² C día)]	INERCIA TERMICA [h]
1	1,6 × 10 ⁵	9,3
2	1,6 × 10 ⁵	9,9
3	1,8 × 10 ⁵	9,1
4	1,9 × 10 ⁵	9,2
5	1,1 × 10 ⁵	9,4
6	1,2 × 10 ⁵	9,5

TABLA IV

Flujos medios externos e internos (W/m²)

MURO	VERANO		INVIERNO	
	EXTERNO	INTERNO	EXTERNO	INTERNO
1	8,7	4,8	8,1	5,8
2	11,2	7,1	11,4	8,6
3	12,2	4,5	11,8	5,6
4	13,7	6,7	13,7	8,5
5	6,4	4,2	10,0	3,5
6	9,6	6,2	13,3	6,7

5. Conclusiones

Analizando la energía entregada al recinto en invierno, que representa de alguna manera el aporte solar efectivo, se observa que de los muros con 0,05m de aislación, los que tienen el ladrillo sobre la cara externa presentan similares prestaciones que equivalentes a 0,130 KWh/(m².día). Ese valor es un 60% mayor que el correspondiente al muro que tiene la aislación en el exterior.

En los de menor aislación, la energía transmitida es mayor, de 0,205 KWh/(M².día) para los muros con manpostería al exterior, y de 0,160 KWh/(m².día) para el muro con poliuretano y revoque externo.

En el análisis para verano, la energía transmitida hacia el recinto debe considerarse como una carga sobre el sistema de acondicionamiento. Conviene, por lo tanto, que tenga un valor bajo. En los muros más aislados, su valor es de 0,105 KWh/(m².día), para los tres casos estudiados. Dicha energía sube a 0,160 KWh/(m².día) para los de una aislación de 0,025m de espesor. Dicho valor es un 45% superior a los valores anteriores, en regiones de clima templado como la considerada.

Se concluye en principio que los mayores costos de una capa más gruesa de aislación no se traducen en una mejora del sistema, por cuanto si bien protegen mejor en verano aportan menos energía en el período invernal. De los sistemas con 0,025 m de poliuretano, el que mejor responde al funcionamiento anual es el muro de manpostería exterior y revoque interno, por entregar un valor relativamente alto de energía en invierno y no transmitir un valor elevado en verano. Estos resultados son válidos para la región bioclimática de Rosario, para muros verticales orientados al norte, y de las características indicadas.

Nomenclatura

c	Capacidad calorífica
F	Flujo de energía por unidad de área
h	Coefficiente convectivo de transferencia de calor
H	Radiación solar incidente (directa y difusa)
K	Conductividad térmica
L	Superficie genérica de interfase entre capas
r	Relación de intervalos temporal-espacial
r'	Relación de intervalos temporal-espacial
t	Tiempo
T	Temperatura
x	Coordenada genérica
α	Difusividad del material
α'	Difusividad equivalente
δt	Incremento de tiempo
δx	Incremento de espacio
ρ	Densidad del material

- (B) Matriz de conducción-convección
- (C) Vector de condiciones de contorno
- (D)_N Matriz adimensional
- (r) Vector de relación tiempo-espacio
- (T) Vector temperatura
- (α) Vector de difusividad

Subíndices

ex	Exterior
i	Nodo genérico de una capa
I	Material de una capa genérica
in	Interior
j	Nodo genérico de tiempo
p	Nodo genérico de una interfase

Referencias

1. R. Gaspar & J. J. Elicabe Urribe. "Analysis of Solar Walls by Means of the Initial and Boundary Conditions". Enviado para su publicación a Energy & Buildings.
2. E. Di Bernardo, R. D. Piacentini, Podadera, A. Seggiaro & M. C. Vozzi. "Vivienda Electro Solar". Comunicado en la 7ma. Reunión de Trabajo bajo de ASADES, Rosario, 1981.
3. G. D. Smith. "Numerical Solution of Partial Differential Equations". Oxford University Press, UK, 1975.
4. J. A. Duffie & W. A. Beckman. "Solar Engineering Thermal Processes". J. Wiley & Sons, Inc. Usa. 1980.

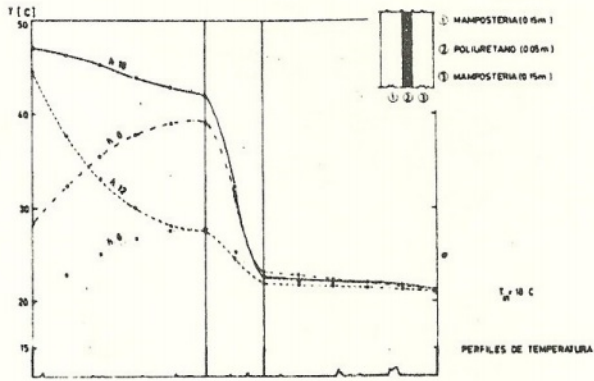


Fig. 3.
Perfiles de temperatura,
h indica la hora standar.

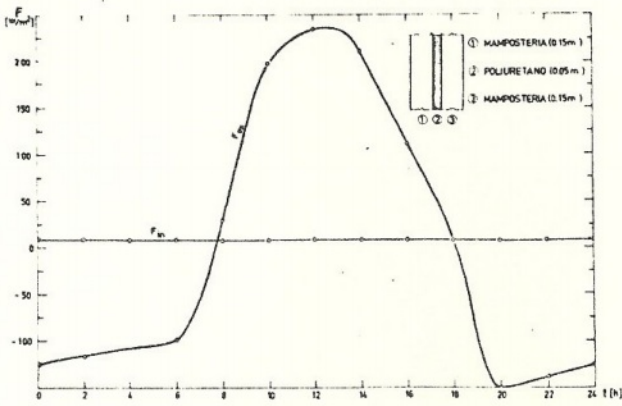


Fig. 4.
Flujos de temperatura
para un período de 24 horas