

## MATERIAL DE ALTO CALOR ESPECIFICO PARA MURO TROMBE-MICHEL

Elvio Alanis\*, Luis Saravia\* y Graciela Lesino  
Grupo de Energía Solar, Departamento de Ciencias Exactas  
Universidad Nacional de Salta - 4400 Salta, Argentina.

### Resumen

Se estudia un muro colector acumulador en el que se ha utilizado como material de relleno una mezcla de agua y bentonita. Esta mezcla tiene una capacidad calorífica cercana a la del agua y se comporta desde el punto de vista reológico como un plástico de Bingham.

La transmisión térmica se realiza por conducción obteniéndose los retardos de la onda térmica deseados en estos sistemas, con menor volumen y peso que en los muros de hormigón.

El comportamiento térmico y la posibilidad de aparición de corrientes convectivas se estudian en un pequeño muro de  $1,2 \times 0,5 \times 0,1 \text{ m}^3$ , una de cuyas paredes se calienta eléctricamente.

Se registra la distribución de temperaturas durante el calentamiento y el enfriamiento del muro, comparándose los resultados obtenidos experimentalmente con los calculados mediante un modelo computacional para esta mezcla y para hormigón.

### Abstract

A collecting-accumulating wall filled with a mixture of water and bentonite is studied. The heat capacity of the mixture is similar to that of water and its rheological properties are those of a Bingham plastic.

Heat transfer is accomplished by conduction and the desired delay in heat release is obtained with smaller volume and weight than in concrete walls.

The thermal behavior and the possibility of creation of convective motions are studied in a small experimental model wall of  $1,2 \times 0,5 \times 0,1 \text{ m}^3$ . The wall is heated electrically on one side.

The temperature distribution is recorded during the heating and cooling periods. Experimental results are compared with those of a computational model both for the mixture and for concrete.

### Introducción:

Entre los sistemas pasivos de interés en el acondicionamiento ambiental se destaca el muro colector-acumulador, del tipo Trombe-Michel. Este sistema combina la captación de energía, que se realiza en una de sus paredes, con la acumulación parcial de ésta en su interior transfiriéndola gradualmente a la habita-

\* Investigador de la CNEGH

## MATERIAL DE ALTO CALOR ESPECIFICO PARA MURO TROMBE-MICHEL

Elvio Alanis\*, Luis Saravia\* y Graciela Lesino  
Grupo de Energía Solar, Departamento de Ciencias Exactas  
Universidad Nacional de Salta - 4400 Salta, Argentina.

### Resumen

Se estudia un muro colector acumulador en el que se ha utilizado como material de relleno una mezcla de agua y bentonita. Esta mezcla tiene una capacidad calorífica cercana a la del agua y se comporta desde el punto de vista reológico como un plástico de Bingham.

La transmisión térmica se realiza por conducción obteniéndose los retardos de la onda térmica deseados en estos sistemas, con menor volumen y peso que en los muros de hormigón.

El comportamiento térmico y la posibilidad de aparición de corrientes convectivas se estudian en un pequeño muro de  $1,2 \times 0,5 \times 0,1 \text{ m}^3$ , una de cuyas paredes se calienta eléctricamente.

Se registra la distribución de temperaturas durante el calentamiento y el enfriamiento del muro, comparándose los resultados obtenidos experimentalmente con los calculados mediante un modelo computacional para esta mezcla y para hormigón.

### Abstract

A collecting-accumulating wall filled with a mixture of water and bentonite is studied. The heat capacity of the mixture is similar to that of water and its rheological properties are those of a Bingham plastic.

Heat transfer is accomplished by conduction and the desired delay in heat release is obtained with smaller volume and weight than in concrete walls.

The thermal behavior and the possibility of creation of convective motions are studied in a small experimental model wall of  $1,2 \times 0,5 \times 0,1 \text{ m}^3$ . The wall is heated electrically on one side.

The temperature distribution is recorded during the heating and cooling periods. Experimental results are compared with those of a computational model both for the mixture and for concrete.

### Introducción:

Entre los sistemas pasivos de interés en el acondicionamiento ambiental se destaca el muro colector-acumulador, del tipo Trombe-Michel. Este sistema combina la captación de energía, que se realiza en una de sus paredes, con la acumulación parcial de ésta en su interior transfiriéndola gradualmente a la habita-

\* Investigador de la CNEGH

ción por convección, conducción y radiación durante todo el día.

Clásicamente, los muros son construidos en hormigón, pero se han realizado también estudios(1) con muros prefabricados, con agua en su interior, a efectos de disminuir el volumen y peso debido al mayor calor específico del agua. Sin embargo, al producirse la convección del líquido, la energía captada es transferida rápidamente al interior no lográndose el retardo de la onda térmica que es deseable en este tipo de sistema.

Con el fin de conjugar el retardo térmico con la elevada capacidad calorífica del agua, se propone en el presente trabajo el empleo de una mezcla agua-bentonita, como material de relleno del muro.

Esta mezcla se comporta desde el punto de vista reológico como un plástico de Bingham, requiriéndose un esfuerzo de corte finito,  $T_y$ , para hacerlo fluir. De esta manera, al establecerse en el material un gradiente de temperatura, se espera que éste resista los esfuerzos de corte producidos por las diferencias de densidades en su interior y no entre en convección como ocurre con el agua.

Este esfuerzo de corte mínimo, o punto de cesión del material, depende de la concentración de la mezcla, siendo mayor a mayores concentraciones. Sin embargo, a efectos de no apartarse apreciablemente de los valores de calor específico y conductividad térmica del agua, es necesario trabajar con pequeñas concentraciones. La mínima concentración para la cual la mezcla es estable (no precipita) se ha encontrado que es de 10 a 11% en peso, y siendo en este caso bajo el punto de cesión existe la posibilidad de formación de corrientes convectivas.

El objeto del presente trabajo es estudiar experimentalmente el comportamiento térmico y reológico del material en lo que importa a su aplicación en un muro colector-acumulador.

Para ello se ha construido un pequeño muro, que consiste en un recipiente de chapa de 1,2 m de altura, 0,5 m de ancho y 0,1 m de espesor, relleno con una mezcla agua-bentonita al 11% en peso. El muro es calentado eléctricamente en una de sus paredes mientras que la otra se mantiene en contacto con el aire del laboratorio. Ocho termocuplas de cobre constantandispuestas en dirección perpendicular al muro y montadas en un soporte móvil, permiten el registro de las temperaturas en el interior.

En las secciones que siguen se describen las experiencias realizadas. En primer lugar se estudia la posibilidad de formación de corrientes convectivas. Luego se estudia la propagación de una onda térmica a través del muro y finalmente se comparan los resultados obtenidos via computacional para tres muros de igual capacidad calorífica : uno de hormigón, otro de agua-bentonita y el tercero de agua en convección.

### Ensayo de convección

Se calienta la pared del muro entregándose energía a razón de  $800 \text{ W/m}^2$ , hasta alcanzar el estado de régimen estacionario. La distribución de temperatura re

sultante se muestra en la Figura 1, alcanzándose una temperatura de 107° C en la mezcla que está en contacto con la pared. En estas condiciones se observa un aumento de volumen de aproximadamente 5%, y desprendimiento de burbujas con arrastre de material sólido en la superficie libre del líquido, evidenciando la formación de vapor de agua en el seno del material. La forma de la curva muestra la existencia de una zona convectiva que tiende a uniformizar la temperatura y que se extiende hasta una profundidad de aproximadamente 0,03 m de la pared caliente.

Puede hacerse un cálculo de la conductividad equivalente en la parte más activa de esta zona:

$$k_e = q \frac{\Delta X}{\Delta T} = 800 \frac{W}{m^2} \frac{0,015 m}{3^\circ C} \approx 4 \frac{W}{m^\circ C}$$

donde  $\Delta X$  es la separación de las dos primeras termocuplas y  $\Delta T$  la diferencia de temperatura que miden. Los registros completos de temperatura en función del tiempo, obtenidos en la experiencia, muestran oscilaciones hasta los 0,03 m de profundidad; más allá el aumento de temperatura es uniforme hasta el régimen estacionario, indicando el límite de la capa convectiva.

El fenómeno se atribuye principalmente a la formación de vapor, que al ascender en forma de burbujas agita la mezcla provocando la convección del calor. Como las temperaturas alcanzadas en la experiencia son mayores que las esperadas en un caso real, se la repite con regímenes de potencia menores.

La Figura 2 muestra la curva obtenida en régimen estacionario con una entrega de 380 W/m<sup>2</sup>, alcanzándose en la pared una temperatura de 79° C. No se observa aumento de volumen ni movimiento de material como en el caso anterior. El gradiente de temperatura es casi constante (notar la diferencia con la Figura 1) indicando que la transferencia térmica se realiza únicamente por conducción.

La ligera concavidad hacia arriba de la curva, o disminución del gradiente de temperatura, se atribuye al hecho de existir pérdidas de calor por las paredes laterales, que disminuyen el flujo en la dirección normal al muro. Esta disminución del gradiente es demasiado pronunciada como para ser atribuida a un aumento de la conductividad al disminuir la temperatura, más aún si se tiene en cuenta que la conductividad del agua disminuye con la temperatura en este rango.

Un cálculo de la conductividad térmica utilizando la parte superior de la curva de la Figura 2, da:

$$k \approx q \frac{\Delta X}{\Delta T} = 380 \frac{W}{m^2} \frac{0,015 m}{5,0^\circ C} = 1 \frac{W}{m^\circ C}$$

mientras que la conductividad del agua a 80° C en las mismas unidades es de 0,668.

Las experiencias realizadas permiten asegurar que a las temperaturas de interés, no existen corrientes convectivas macroscópicas en el seno de la mezcla

y además, aunque no han sido diseñadas para una medida precisa de la conductividad térmica, indican que este parámetro es alrededor de un 35% superior que el correspondiente al agua pura.

### Propagación de la onda térmica

Se realizaron medidas de calor específico y densidad de la mezcla, obteniéndose valores similares a los correspondientes al agua pura. Sobre esta base, puede hacerse un cálculo del espesor de un muro bentonítico que tenga la misma capacidad térmica y superficie de colección que otro de espesor dado construido con hormigón

$$\frac{d_b}{d_h} = \frac{\rho_h C_h}{\rho_b C_b} = \frac{2.400 \text{ Kg/m}^3 \times 0,837 \text{ KJ/Kg } ^\circ\text{C}}{1.000 \text{ Kg/m}^3 \times 4,19 \text{ KJ/Kg } ^\circ\text{C}} = 0,48$$

donde  $d$  es el espesor,  $\rho$  la densidad y  $C$  el calor específico.

En cuanto a la relación de masas:

$$\frac{m_b}{m_h} = \frac{\rho_b d_b}{\rho_h d_h} = 0,48 \frac{1.000 \text{ Kg/m}^3}{2.400 \text{ Kg/m}^3} = 0,2$$

O sea que el muro bentonítico posee la mitad del espesor y la quinta parte de la masa que el de hormigón.

Para estudiar la propagación de la onda térmica dentro del muro, se realiza la siguiente experiencia. Se calienta una pared del muro simulando las temperaturas alcanzadas en un caso real, durante las 24 hs. y se registran las temperaturas en su interior. Con los datos obtenidos puede determinarse la velocidad de propagación del máximo de temperatura para las condiciones dadas. La Figura 3 muestra los instantes de tiempo en que se registra dicho máximo en las posiciones ocupadas por las termocuplas.

Este máximo se propaga dentro del muro, a una velocidad de  $5,6 \times 10^{-6}$  m/s, que es del orden de las reportadas para muros de hormigón.

Para un muro bentonítico de 0,2 m de espesor se obtiene, utilizando este resultado, que el desfase entre el máximo de temperatura en la pared colectora y el máximo correspondiente en la pared interior, es de 10 horas.

La velocidad de propagación de una onda armónica, de período  $T_0$ , dentro de un muro de conductividad térmica  $k$ , densidad  $\rho$  y calor específico  $C$ , está dada por (2):

$$v = 2 (\pi k / \rho C T_0)^{\frac{1}{2}}$$

Tomando los valores para las propiedades de la mezcla dados anteriormente, y un período de 24 hs., se obtiene

$$v = 2 \left( \frac{\lambda \times 1 \text{ W/m}^\circ \text{ C}}{1000 \text{ Kg/m}^3 \times 4,19 \text{ KJ/Kg}^\circ \text{ C} \times 24 \times 3600 \text{ s}} \right)^{\frac{1}{2}} = 5,9 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

valor que concuerda con el obtenido experimentalmente.

### Simulación del comportamiento del muro

Sobre la base de los valores de calor específico, densidad y conductividad de la mezcla agua-bentonita, obtenidos en las secciones anteriores, se puede simular numéricamente el comportamiento de un muro de este tipo como parte de un sistema Trombe-Michel.

El cálculo se ha realizado con un programa detallado en otro trabajo presentado a esta Reunión (3). A los efectos de realizar una comparación, también se calcularon dos muros de igual capacidad calorífica, uno en hormigón y otro con agua en convección. Las condiciones de radiación y temperatura ambiente para las cuales se realizaron los cálculos, corresponden a un día de invierno en la Puna Jujeña cerca de Abra Pampa (3500 m.s.n.m.).

La energía, hora por hora, que el muro entrega a la habitación a lo largo de las 24 hs. se muestra en la Figura 4, para los tres muros en cuestión.

El muro bentonítico tiene un comportamiento similar al de hormigón ambos con un rendimiento del orden de 33%. El muro de agua tiene un rendimiento algo superior, del orden del 38%, pero la entrega de energía está muy concentrada al rededor de las 15:00 hs. y luego cae fuertemente a la noche (al 50% de lo que entrega el hormigón). En estas circunstancias y a menos que se logre una transferencia rápida de este calor a la masa del interior de la habitación, se puede producir un sobrecalentamiento de la pieza en la hora pico.

Otra característica distintiva importante, es que la pared interior del muro de agua llega a 35° C en la hora del máximo, mientras que en los muros de hormigón y bentonítico no supera los 26° C.

### REFERENCIAS

- 1) J.O. Balcomb, J.C Hedstrom, R.D. Mc. Farland "Passive Solar Heating of Building" - Workshop of Solar Energy Applications Associated Universityes inc. Jun. 27 - Jul. 31 - 1977.
- 2) H.S. Carslaw and J.C. Jaeger - "Conduction of Heat in Solids" - Oxford Univ. Press - 1959.
- 3) G. Lesino, R.Ovejero, L. Saravia, R.Requena - "Anteproyecto y análisis Térmico de una vivienda con uso de energía Solar para la Puna". - 4ta. Reunión de Trabajo ASADES - La Plata 1978.

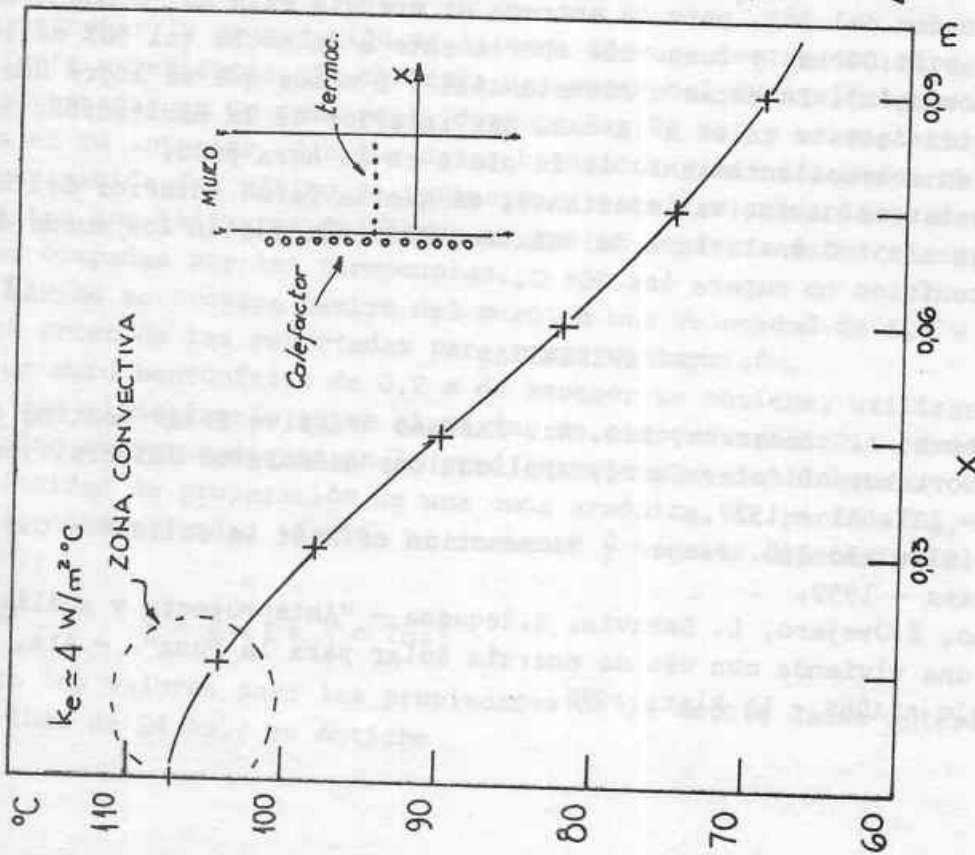


FIGURA 1

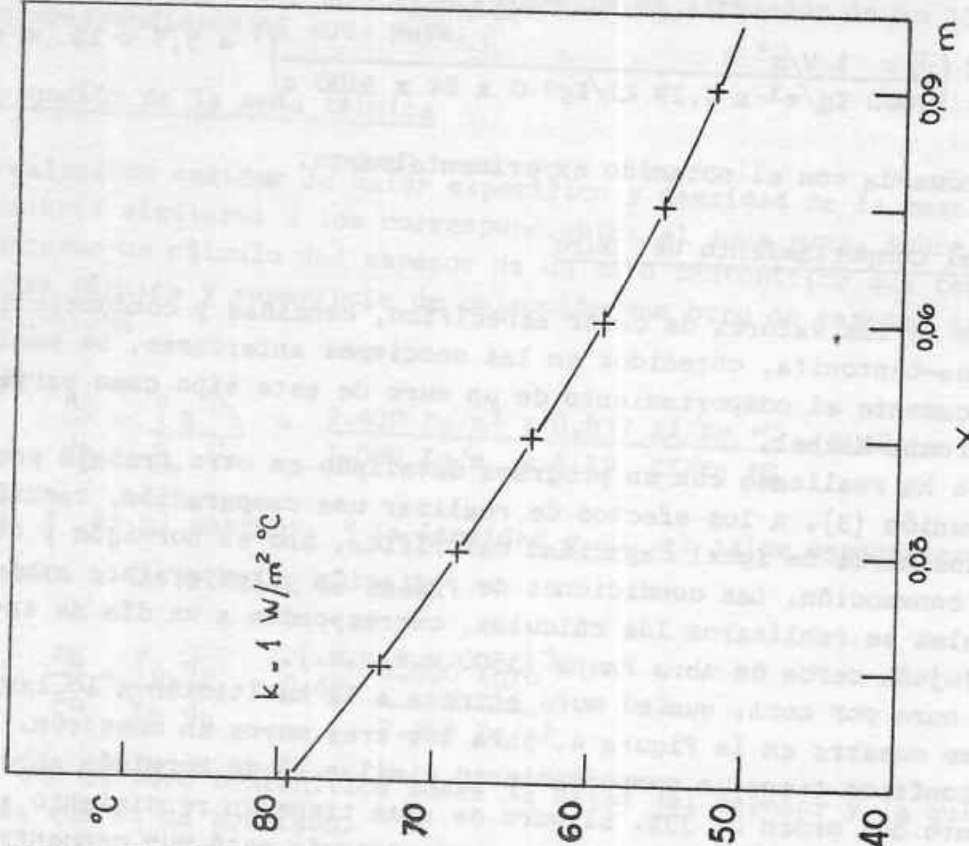


FIGURA 2

ENSAYO MURO BENTONITICO - REGIMEN ESTACIONARIO

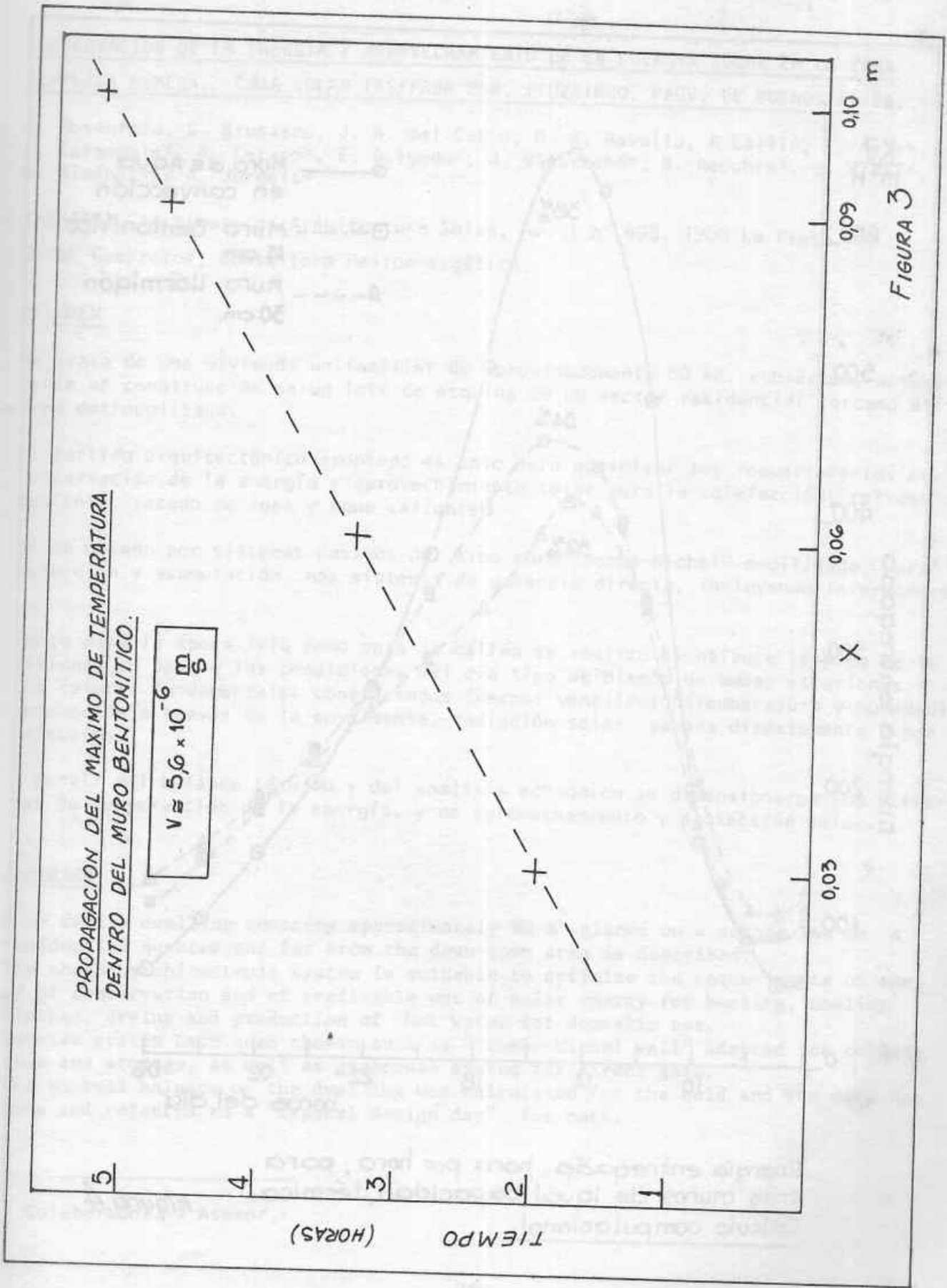
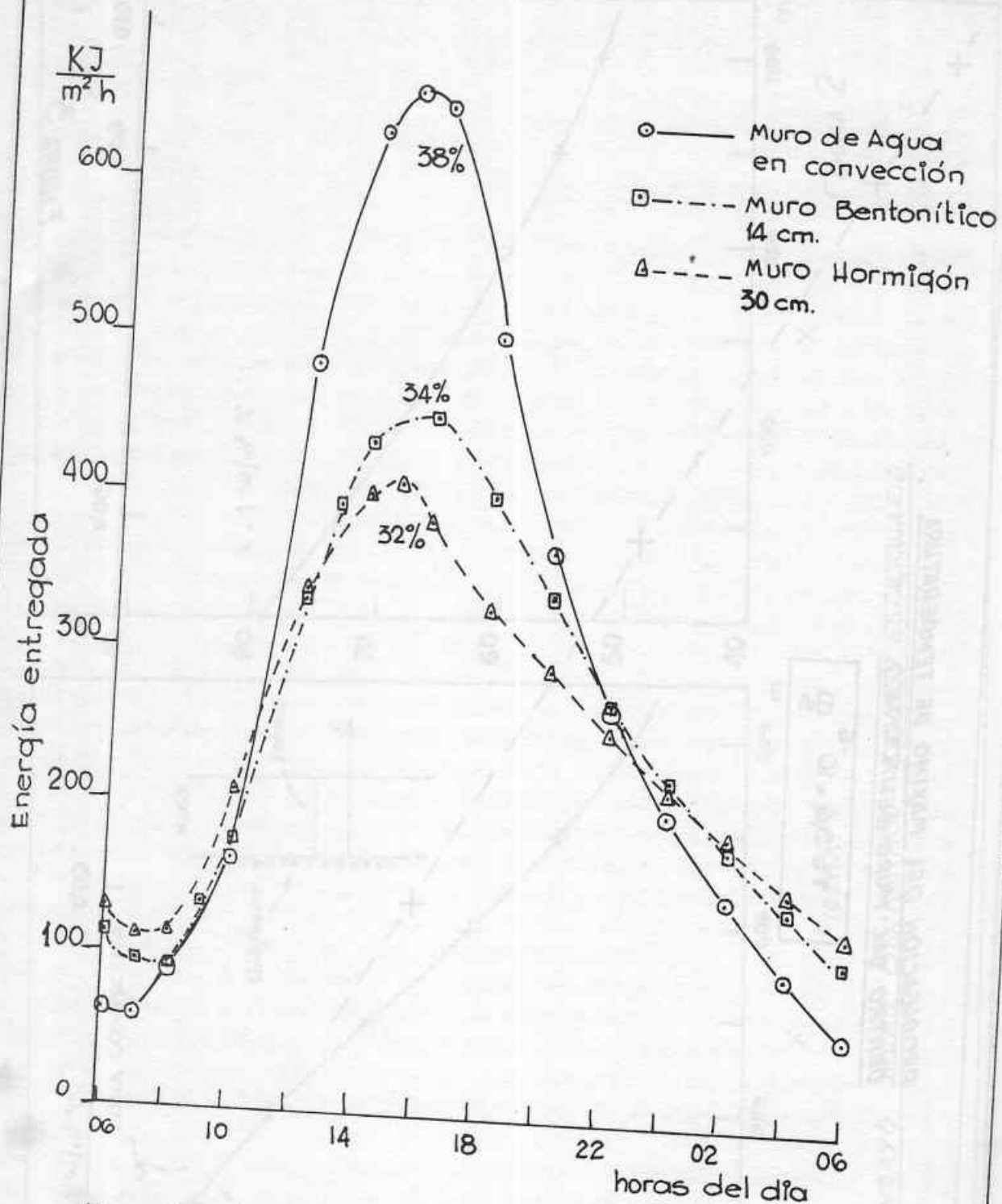


FIGURA 3





Energía entregada, hora por hora, para tres muros de igual capacidad térmica. Cálculo computacional.

Figura 4