

PROPIEDADES TERMICAS Y ENSAYO DE MATERIALES PARA ACUMULACION

E. Alanis, L. Saravia
Universidad Nacional de Salta
Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales

M.L. Rovetta
Universidad Nacional de Salta-Dpto. de Ciencias Exactas
Buenos Aires 177 - 4400 Salta

Resumen

En el presente trabajo se presentan los resultados de mediciones de diversas propiedades físicas de algunas sustancias propuestas para su uso en acumulación térmica y se describen los dispositivos experimentales utilizados.

Las sustancias ensayadas son, en primer lugar, una mezcla de agua-bentonita, en diversas proporciones, que fuera propuesta en trabajo anterior (1) para su utilización en muros "colector-acumulador".

En segundo lugar, se propone una nueva sustancia con cambio de fase, consistente en una mezcla de agua, bentonita y parafina, la cual debido a sus condiciones de fluidez por encima y por debajo de la temperatura de fusión, puede ser utilizada como un fluido caloportador y acumulador. Con el objeto de estudiar la estabilidad de la mezcla, bajo repetidos ciclos, se somete a la misma a un ciclaje acelerado en un túnel de viento que se describe.

Este trabajo ha sido financiado por el Plan Nacional de Energías No Convencionales (SECYT).

THERMAL PROPERTIES AND TESTS OF THERMAL STORAGE MATERIALS

Abstract

In this work, several properties of substances proposed as thermal storage materials are reported, and the experimental instrumentation used on the measurement are described.

Two types of materials were studied. One of them is a bentonite-water mix, which was proposed for use in collector walls in a previous work (1). The other one is a mix of paraffin, bentonite and water, which, because of its fluidity possibilities both below and above the fusion temperature of the paraffin, can be used as an accumulator material as well as a fluid for heat transportation.

In order to study the stability of the mix under repeated cycles, the material is subject to accelerated test in a small wind tunnel.

1.- Introducción

Entre los sistemas pasivos destinados a la calefacción de viviendas figura en primer término, sin lugar a dudas, el denominado muro colector-acumulador del tipo "Trombe-Michell". Las propiedades características de este sistema son la colección y acumulación del calor durante las horas de sol y su gradual transferencia a la habitación mediante la conducción a través del muro, radiación y convección en la pared interior del mismo y el aporte de aire caliente en circulación natural y en algunos casos forzada, entre la cubierta de vidrio y la pared exterior del muro.

Estos aportes pueden controlarse de manera relativamente sencilla a lo largo del día según los requerimientos, pero existe una regulación natural debido a la lenta propagación de la onda térmica a través del muro lo que produce un desfase entre el instante de máxima radiación solar y el instante de máxima temperatura en la pared interior del muro.

La velocidad de propagación de la onda depende de las propiedades térmicas del material del muro, a saber: conductividad, calor específico y densidad, mientras que el desfase dependerá además del espesor de la pared.

En los muros de concreto, material generalmente empleado, el desfase es de unas diez horas para un espesor de 0,40 m.

Si bien el uso del concreto está generalizado en las construcciones existentes, en su mayoría de carácter experimental, otros materiales han sido utilizados respondiendo a disponibilidades en la región, tal es el caso de la casa de Abra Pampa donde se utilizará piedras. (2)

Pero la posibilidad de industrialización masiva de estos sistemas, ha inducido a la búsqueda de otros materiales que, por sus propiedades específicas, permitan la construcción de muros más livianos y de menor volumen, compatibles con edificaciones económicas.

En un trabajo anterior (1) se propuso como material de relleno de muros prefabricados, una mezcla de agua-bentonita y se discutió la factibilidad de su utilización. En el presente trabajo se detallan las medidas de algunas propiedades de interés de dicha sustancia, como la conductividad térmica a distintas concentraciones de bentonita y el calor específico, las que al influir directamente sobre la velocidad de onda y la capacidad térmica del muro constituyen factores importantes del diseño.

Otros autores (3), han propuesto la utilización de materiales con cambio de fase para la construcción de estos muros, lo que además de las ventajas anteriormente apuntadas, reportan un mejoramiento en el rendimiento del sistema debido a la menor temperatura que alcanza la pared exterior como consecuencia del cambio de fase y por consiguiente la reducción de las pérdidas en este sector.

En el presente trabajo se propone la utilización de un material con cambio de fase, consistente en una emulsión de parafina en agua, estabilizada con bentonita. Esta sustancia, cuyas propiedades reológicas aun no han sido estudiadas pero parece comportarse como un plástico de Bingham, a temperaturas superiores e inferiores al punto de fusión de la parafina, (en este caso 52-54°C),

permitiría su circulación por medio de bombas y podría pensarse en su utilización como fluido portador de calor y a la vez acumulador. Por otra parte se espera que esta mezcla presente una conductividad térmica relativamente alta a la vez que una buena transferencia del calor a la parafina debido a la gran superficie de intercambio que presentan las pequeñas gotitas de esta sustancia presentes en la emulsión. Estos coeficientes son generalmente pequeños en los materiales con cambio de fase y en consecuencia originan uno de los mayores inconvenientes en la acumulación térmica por este medio.

Más adelante en el presente trabajo se describen los ensayos de esta sustancia, tendientes a determinar su comportamiento bajo repetidos ciclos fusión-solidificación y como afectan la estabilidad de la emulsión. También se reportan las medidas de la conductividad térmica de la misma a distintas temperaturas, como así también las medidas de este parámetro en la parafina pura utilizada en la emulsión.

2.- Dispositivos Experimentales

A continuación se describen los dispositivos experimentales utilizados para la determinación del calor específico y la conductividad térmica y el túnel de viento utilizado para el ciclaje acelerado de muestras de materiales con cambio de fase. Estos aparatos han sido donstruidos totalmente en los talleres del Grupo de Energía Solar de la Universidad.

a.- Medida del calor específico

El dispositivo se esquematiza en la figura la) y consta de un recipiente cilíndrico para alojar la muestra, rodeado de una resistencia calefactora R_1 por medio de la cual se le entrega una potencia dQ/dt constante.

Otra resistencia calefactora R_2 rodea a la primera a modo de anillo de guarda para asegurar que la potencia desarrollada en R_1 sea efectivamente entregada a la muestra. Esto se logra manteniendo la igualdad de temperatura en R_1 y R_2 lo que se controla mediante la termocupla diferencial S_d . En estas condiciones la temperatura central S_1 , crece linealmente con el tiempo obedeciendo a la ecuación:

$$\frac{dQ}{dt} = (mc + \eta) \frac{dT_1}{dt} = \text{Constante}$$

donde: m = masa de la sustancia (Kg)

c = Calor específico de la sustancia (Joule/Kg °C)

η = equivalente en agua del aparato (Joul/°C)

T_1 = Temperatura indicada por el sensor S_1 (°C)

Se lleva un registro de T_1 en función del tiempo mediante un registrador potenciométrico, y el valor de la derivada se obtiene gráficamente. El error del método está dentro del 10%. La propagación de errores muestra que el factor de mayor peso es la determinación gráfica de dT/dt por lo que en determinaciones posteriores está previsto mejorar este aspecto para reducir el error a valores más razonables.

b.- Medida de la conductividad térmica

Para la determinación de este parámetro se utilizaron dos aparatos. Uno de ellos efectúa la medición en estado estacionario, condición que se logra luego de varias horas (10 a 12 horas). El otro aparato efectúa la medición en estado transitorio, demandando un tiempo de 15 a 20 minutos para la toma de datos.

b₁.- Método estacionario

Para este método se utiliza el aparato esquematizado en la figura 1b, que fue construido siguiendo las pautas aconsejadas por Tye (4).

Está constituido por una placa calefactora de 26 cm de lado y dos placas refrigeradoras ubicadas a ambos lados y paralelamente a aquella, a una distancia de 3,8 cm. En este espacio se coloca la sustancia a medir.

La placa calefactora está compuesta por una zona central de 13 x 13 cm, rodeada de cuatro zonas rectangulares de 6,5 cm de ancho a modo de anillo de guarda. Cada una de estas zonas es calentada eléctricamente en forma independiente.

Un conjunto de cuatro termocuplas diferenciales entre la zona central y cada uno de los lados del anillo de guarda, permiten controlar la igualdad de temperaturas. Otras cuatro termocuplas, una a cada lado de la placa calefactora en su centro y una en cada placa refrigeradora, colineales con las primeras, permiten reconocer el estado estacionario y sus medidas son utilizadas para el cálculo de k. La ecuación utilizada es:

$$\frac{dQ}{dt} = k.A. \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

donde: dQ/dt = potencia entregada en la zona central (Watts)

k = conductividad térmica de la sustancia (Watts/m°C)

A = Area de la zona central (m²)

Δx = espesor de la muestra (m)

ΔT = diferencia de temperatura a ambos lados de la muestra (°C)

b₂.- Método No estacionario

El aparato utilizado se esquematiza en la figura 1c. En teoría (5) (6), se trata de un alambre calefactor por el que circula una corriente constante que genera un flujo de calor q por unidad de longitud y de tiempo, constante, hacia un sólido homogéneo infinito que lo rodea.

En la práctica, es suficiente que la muestra que rodea el alambre tenga un radio no menor de 10 cm y una altura de 30 cm. El aparato utilizado consta de un recipiente cilíndrico donde la muestra se coloca rodeada de una camisa por la que circula agua proveniente de un termostato a los efectos de poder hacer las mediciones a distintas temperaturas. El alambre calefactor central está soportado por un bastidor y se coloca una termocupla en el centro del alambre para registrar su temperatura.

El método consiste en hacer circular una corriente constante por el alambre y efectuar el registro de la temperatura en función del tiempo, durante unos 15 minutos. En las condiciones de la experiencia, puede demostrarse que la expresión siguiente constituye una buena aproximación dando

valores para la conductividad térmica con error inferior al 10%:

$$\Delta T = T(t) - T(t_1) = \frac{q}{4 \pi k} (\ln t - \ln t_1)$$

donde: $T(t)$ = Temperatura al tiempo t ($^{\circ}\text{C}$)

$T(t_1)$ = temperatura al tiempo t_1 (equivalente a un minuto)

q = calor entregado por unidad de tiempo y unidad de longitud del alambre. (Watts/m)

k = conductividad térmica del medio. (Watts/m $^{\circ}\text{C}$)

Graficando $\ln t$ en función de ΔT , se obtiene una recta de pendiente $4\pi k/q$, de donde se puede calcular k . La Figura 2 muestra la gráfica correspondiente a una de las mediciones efectuadas.

c.- Ciclaje de sustancias con cambio de fase

Dada la necesidad de estudiar el comportamiento de sustancias con cambio de fase a lo largo de repetidos ciclos fusión-solidificación y debido a que las sustancias de interés presentan punto de fusión dentro de un amplio rango de temperaturas, se ha modificado el dispositivo construido para ese fin que ya fuera descrito en un trabajo anterior (7).

El dispositivo se esquematiza en la figura 3 y consta de un módulo de ensayo, donde se colocan las muestras a ciclar, un módulo de calentamiento y un módulo de enfriamiento del aire circulante. Estos dos últimos módulos poseen un ventilador cada uno, los que se ponen en funcionamiento mediante un control automático alternativamente cada dos horas, lográndose así una corriente de aire caliente o fría según el caso, que pasa a través de las muestras. Un ducto de retorno conecta la salida del módulo de ensayo con la entrada a los ventiladores, cerrando así el circuito de aire. Este ducto posee una longitud suficiente como para medir la velocidad del aire por medio de un tubo Pitot.

Unos controladores de temperatura permiten fijar la temperatura del aire, tanto del semiciclo "frío" como del semiciclo "Caliente", en cualquier valor deseado entre 0°C y 100°C . Estos controles de tipo "ON-OFF" actúan sobre el refrigerador y las resistencias calefactoras respectivamente.

Diez termocuplas que, a través de un selector automático, envían sus señales secuencialmente a un registrador potenciométrico, completan el dispositivo de medida.

3.- Resultados Experimentales

Mezcla agua-bentonita

a.- Calor específico

Para una mezcla de agua-bentonita el 13% en peso, se obtuvo un valor:

$$c_p = (3,9 \pm 0,4) \text{ KJoule/kg } ^{\circ}\text{C}$$

Valor muy cercano al del agua pura: $c_a = 4,18 \text{ KJoule/kg } ^{\circ}\text{C}$

b.- Conductividad Térmica

Se efectuaron determinaciones por el método estacionario para mezclas con concentraciones que variaban de 13% a 19% en peso, obteniéndose valores que oscilaban entre:

$$k_b = 0,77 \text{ W/m}^\circ\text{C} \quad \text{y} \quad k_b = 0,82 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

no observándose una correlación entre k_b y la concentración.

Las determinaciones efectuadas por el método no estacionario, arrojaron resultados similares.

Tomando como valor de cálculo $k_b = 0,8 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, se observa que la conductividad térmica de la mezcla en las proporciones anteriormente indicadas, es un 30% superior a la del agua pura: $k_a = 0,6 \text{ W/m}^\circ\text{C}$.

Mezcla Parafina-agua-bentonita

a.- Conductividad térmica

Se efectuaron mediciones de una mezcla de parafina al 25% en peso en una mezcla de agua-bentonita al 13% en peso, por el método no estacionario. Tres determinaciones a distintas temperaturas comprendidas entre 22°C y 64°C (dos por debajo y una por encima del punto fusión) arrojaron resultados similares.

$$k_m = 0,55 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

En la figura 2 se muestra una de las curvas experimentales.

Se efectuaron además tres determinaciones de la conductividad térmica de la parafina sólida, utilizando el método estacionario, que arrojaron un valor promedio:

$$k_p = 0,26 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

Brailsford y Major (8), obtuvieron una fórmula que da la conductividad térmica promedio, k , de una distribución aleatoria de esferas de conductividad k_1 en un medio continuo de conductividad k_2 :

$$k = k_2 \left\{ 1 - 2f \left[\frac{1 - k_1/k_2}{2 + k_1 \cdot k_2} \right] \right\} / \left\{ 1 + f \left[\frac{1 - k_1/k_2}{2 + k_1 \cdot k_2} \right] \right\}$$

donde f es la fracción volumétrica de la fase 1.

Aplicando esta ecuación al caso presente, y tomando para $k_1 = k_p$ y $k_2 = k_b$ los valores anteriormente dados, se obtiene para la conductividad de la mezcla parafina-agua-bentonita, con $f = 0,31$, el valor:

$$k_m = 0,6 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

que difiere en un 9% del valor obtenido experimentalmente.

Si se considera que el error experimental del método es cercano al 10% puede decirse que la fórmula anterior es aceptable para una determinación $r_{\underline{1}}$

pida de la conductividad térmica para este tipo de sistemas.

b.- Ciclaje de las muestras

Se prepararon dos mezclas parafina-agua-bentonita al 25% y al 40% en peso respectivamente. En ambos casos la mezcla agua-bentonita fue del 13% en peso de bentonita. El análisis microscópico de las muestras revela que la parafina se encuentra dispersa en pequeñas gotitas con un diámetro promedio del orden de 0,01 mm formando una emulsión. El método de preparación es muy importante, habiéndose observado que el diámetro de las gotitas depende de la velocidad de agitación utilizada.

Estas muestras se ciclaron en el tunel de viento, con una temperatura del aire de 63°C en el semiciclo caliente y de 19°C en el frío. Al cabo de unos pocos ciclos, se observaron nuevamente al microscopio, detectándose una tendencia a la coalescencia de las gotitas, puesta de manifiesto por la presencia de partículas más gruesas de forma irregular. Este proceso continúa gradualmente y al cabo de unos 30 ciclos ya se observa a simple vista la formación de agregados de parafina pura separados nítidamente del resto de la mezcla. Esta inestabilidad de la emulsión se ha observado en ambas muestras.

Se continúan los estudios tendientes a lograr la estabilidad de la emulsión, donde se consideran, entre otros parámetros, el tamaño de las gotitas, la proporción de bentonita, el agregado de agentes estabilizantes, etc.

4.- Conclusiones

La mezcla agua-bentonita, presenta características que la hacen adecuada para su uso en muros colectores-acumuladores. Su calor específico c_b y densidad ρ_b cercanos al del agua pura, permite la construcción de muros cuyo peso es varias veces menor a similares de concreto.

No se ha detectado experimentalmente una variación de la conductividad térmica para concentraciones de bentonita entre 11% y 19%, por lo que la preparación de la mezcla no requerirá especiales cuidados en este aspecto.

El valor encontrado para $k_b = 0,8 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, daría un desfase de la onda térmica de unas 10 hs para un muro de 0,2 m de espesor, si se estima la velocidad de la onda por la expresión:

$$v = 2(\pi k_b / T \cdot c_b \cdot \rho_b)^{-\frac{1}{2}} = 5,5 \times 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

donde T es el período de la onda que se ha tomado de 24 hs.

La emulsión parafina-agua-bentonita ensayada, presenta una conductividad térmica dos veces mayor que la parafina pura, propiedad que la hace interesante para la aplicación propuesta.

Sin embargo, deben apuntarse dos aspectos desfavorables. En primer lugar, la inestabilidad de la emulsión observada en los ensayos. En segundo lugar el punto de fusión de la parafina es algo elevado, si se tienen en cuenta las temperaturas que alcanzan los muros colector-acumulador.

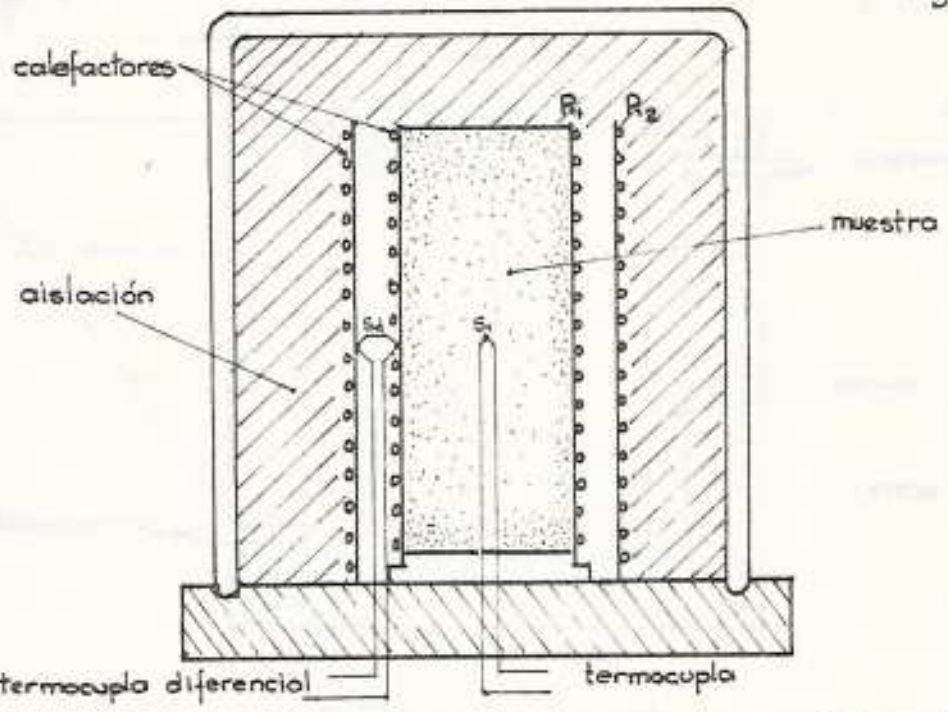
En lo que hace al primer aspecto se siguen los estudios tendientes a lo

grar la estabilidad, lo cual parece posible. En cuanto al segundo, sería deseable que en el país se fabricasen parafinas de más bajo punto de fusión, teniendo en cuenta su potencialidad para la acumulación de la energía solar.

5.- Referencias

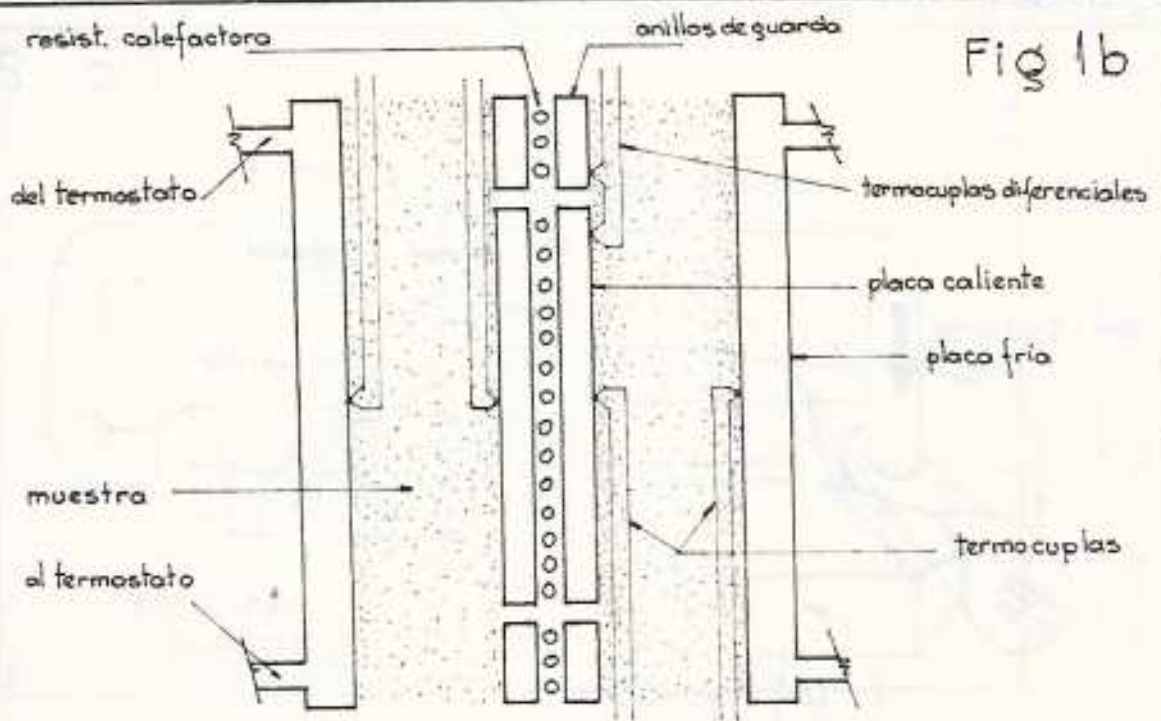
1. E. Alanis, L. Saravia, G. Lesino, Material de Alto Calor Específico para muros "Trombe - Michell", Actas de la 4a. Reunión de Trabajo ASADES, La Plata (1978).
2. G. Lesino, R. Ovejero, L. Saravia, J. Requena, "Proyecto de Casa Solar para la Puna", Actas de la 4a. Reunión de Trabajo ASADES, La Plata (1978).
3. L. Bourdeau, A. Jaffrin, "Latent heat diode Wall", International Symposium on Solar Energy, El Cairo, 'Junio 1978).
4. R.P.Tye, thermal Conduction, Vol I pag 342, Academic Press (1969).
5. H.S. Carslaw, J.C.Jaeger, Conduction of Heat in Solids, Oxford, at the Clarendon Press (1959).
6. Blackwell, Journal of Appl. Phys. Vol.25 (1954) pag 137 - 144.
7. E. Alanis, L. Saravia, L. Rovetta, J. Castro, Acumulación de Calor por Cambio de Fase, Actas de la 2a. Reunión de Trabajo, ASADES, Salta (Julio 1976)
8. A.D. Brailsford, I.G. Major (1964), Br. J.Appl. Phys. Vol 15 pag 313.

Fig. 1a



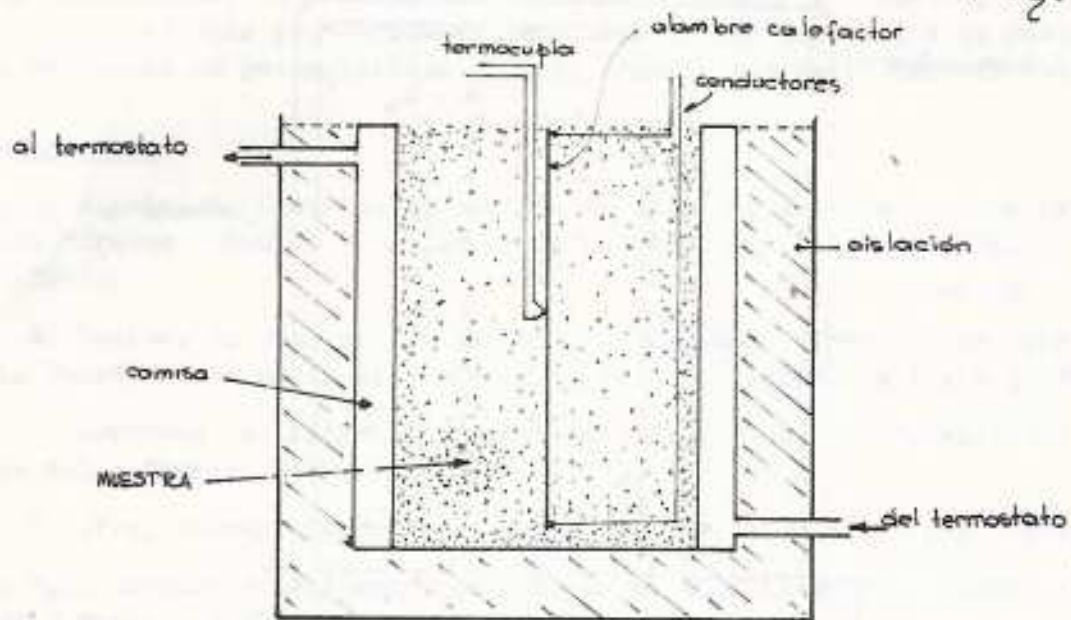
Esquema del aparato utilizado para la medición de C_p

Fig. 1b



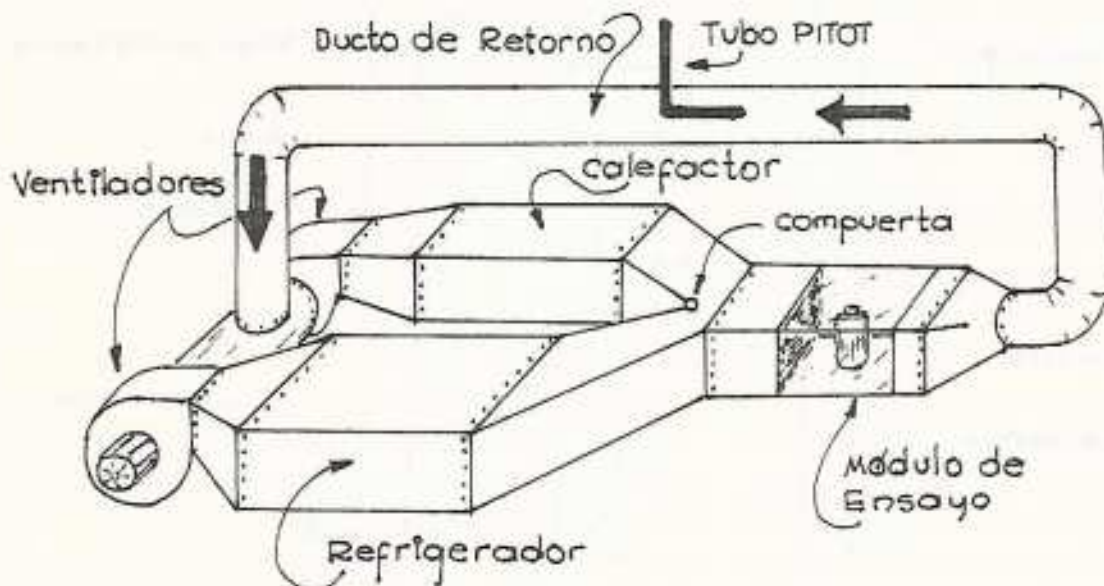
Esquema del aparato para la medición de la conductividad térmica - Método Estacionario

Fig. 1c



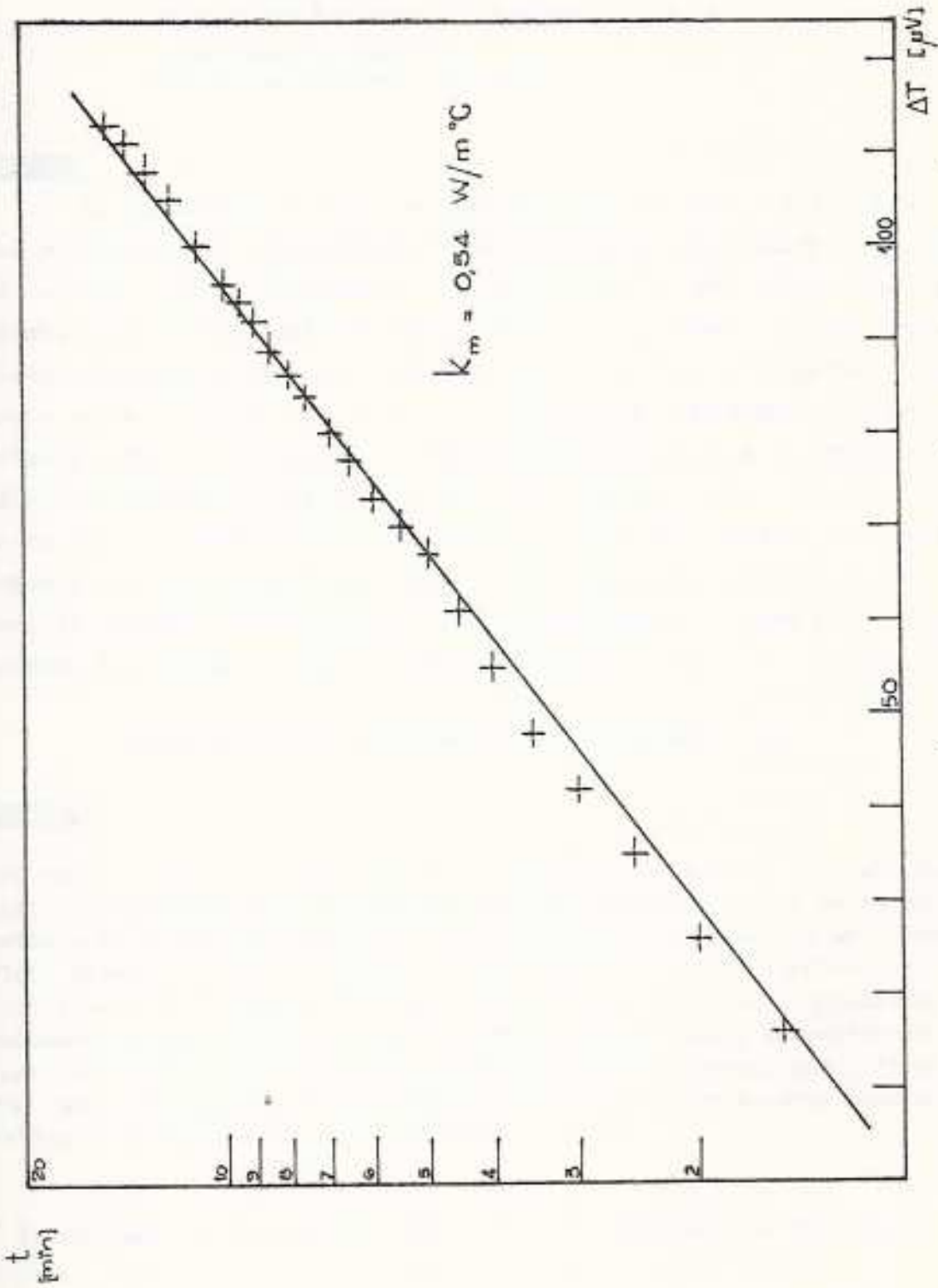
Esquema del aparato para la medición de la conductividad térmica - Método No estacionario.

Fig. 2



Esquema del aparato utilizado para ciclo je de materiales con cambio de fase.

Fig 3



Curva correspondiente a la medición de k_m para una mezcla para fino - agua-bentonita (25%) a 24°C . Método No estacionario.