

Equipo para evaluar en forma experimental el coeficiente de conductividad térmica de los materiales de construcción

Raymundo López C., Juan R. Morales G.,¹ Alen Díaz C. y Arturo Lizardi R.
Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco
Av. San Pablo 180, 02200 México, D.F., Mexico
¹ e-mail: rlc@hp9000a1.uam.mx

Mabel Vaca M.
Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad Universitaria, 04510 México, D.F., Mexico

Recibido el 22 de marzo de 2000; aceptado el 23 de noviembre de 2000

Se diseñó, construyó y evaluó un equipo, con el cual se obtiene el coeficiente de conductividad térmica en diversos materiales. En éste se reducen las pérdidas por convección, colocando una cámara de vacío alrededor del conjunto de prueba. Las pérdidas por conducción se minimizan con un aislamiento adecuado. Los materiales evaluados son los que más se utilizan en la construcción en México, a saber, el concreto, el ladrillo cocido, el adobe y el yeso. Los valores obtenidos, sin considerar las pérdidas por convección, se comparan con los de la literatura. Los ensayos utilizando la cámara de vacío proporcionan valores del coeficiente de conductividad térmica menores en 3% a los obtenidos sin dicha cámara.

Descriptores: Transferencia de calor; coeficiente de conducción térmica

An equipment meant to obtain the thermal conductivity coefficient was designed, constructed and evaluated. Convection losses in the experimental device were reduced by means of a vacuum chamber that wraps it. Conduction losses were minimized with the proper insulation. The tested materials are the most frequently used in the construction of buildings in Mexico, such as concrete, burnt brick, adobe and gypsum. Results observed are comparable to those reported in the literature. The essays done using the vacuum chamber produced values of thermal conductivity coefficient 3% lower than those obtained without using it.

Keywords: Heat transfer, thermal conductivity coefficient

PACS: 44 10 +1

1. Introducción

En el diseño de acondicionamiento térmico de locales o de espacios donde se tiene que controlar la temperatura es un requisito tener información adecuada acerca de los materiales que en cada caso particular se vayan a utilizar en la construcción de las paredes, así como los aislamientos empleados en tales espacios. Esto, con el propósito de seleccionar el material adecuado para el uso óptimo de la energía requerida para mantener el acondicionamiento del local. Sin embargo, aun cuando el diseño sea apropiado para un ahorro de energía substancial, no utilizar los coeficientes de transferencia de calor correctos puede invalidar las suposiciones para la optimización de éste. Cuando los materiales utilizados como aislamiento han sido importados, los coeficientes de conducción se pueden obtener de los datos proporcionados por los fabricantes. Lamentablemente, cuando los materiales se fabrican en México el fabricante proporciona datos de materiales similares a los producidos en el exterior, bajo el supuesto de que se obtendrían los mismos resultados, si el proceso de la medición de los coeficientes se realizara en esta localidad. Aunque esta suposición no ha sido validada, no deja de tener algún viso de veracidad. Sin embargo, cuando se trata de materiales propios de la región, como los que se usan mayoritariamente en las construcciones de edificios y casas habitación, no se

cuenta con esta posibilidad de extrapolación, puesto que se fabrican con elementos de la zona geográfica y con procesos y composiciones diferentes.

En el pasado, cuando no se tenía la presión de la conservación de la energía y del ambiente ni la competitividad que ha auspiciado la apertura comercial, quizás las deficiencias podían solventarse haciendo las paredes más gruesas. Sin embargo, en el momento actual con las exigencias del uso racional de los materiales, es imperativo conocer los coeficientes de los mencionados materiales para la construcción del hábitat.

De aquí la importancia de contar con un equipo adecuado que permita evaluar correctamente y con el mínimo error el coeficiente de conductividad térmica de los materiales que más se emplean en la construcción de las casas habitación y los edificios de México, éstos son: el concreto, el ladrillo cocido, el adobe y el yeso.

La determinación del coeficiente de conductividad térmica se toma de la definición de la transferencia de calor por conducción dada por la ley de Fourier [1], bajo las siguientes suposiciones:

- Flujo de calor uniforme y unidireccional,
- coeficiente de conductividad térmica constante, y
- material homogéneo.

La ley de Fourier se expresa como

$$Q = kA \left(-\frac{dT}{dx} \right), \quad (1)$$

donde Q = razón de transferencia de calor; A = área; dT/dx = gradiente de temperatura, y k = coeficiente de conductividad térmica.

Esta expresión se considera como la definición del coeficiente de conductividad térmica, ya que, si se determina el área de transferencia y el gradiente de temperatura a que se va a someter un cierto material, se obtiene el coeficiente k .

Las técnicas para la medición del calor y del gradiente de temperatura dependen del material, del intervalo de temperaturas a considerar y del régimen del proceso transitorio o permanente.

2. Equipo experimental

Para el diseño del equipo empleado en la medición del coeficiente de conductividad térmica se utilizó la recomendación propuesta por la ASTM, norma C177-97 [2], con una modificación para minimizar las pérdidas de energía por convección hacia el medio ambiente.

La Fig. 1 muestra el diagrama básico del equipo diseñado, el cual consta de una placa de calentamiento central, cuyo objetivo es suministrar el calor que se va a transferir. A ambos lados de ésta, se colocan las probetas del material que se va a caracterizar, las cuales deben ser simétricas e idénticas en su composición física. Finalmente, a los lados de las probetas se coloca otra placa cuya función es mantener una temperatura constante. Esto se logra por la circulación de agua a través de un circuito apropiado que está soldado a la placa.

El diseño de este aparato se basa en la forma tradicional de los elementos para construcción, que tienen la geometría de paralelepípedos, la cual se acopla con la estructura de la placa caliente del aparato de medición. El intervalo de temperaturas a considerar fue determinado por las variaciones de temperatura ambiental en el país, que pueden estimarse de 40°C en el verano, a una mínima de -4°C en el invierno, lo que proporcionaría un gradiente máximo de 44°C. Además, el método presenta la ventaja de ser absoluto o primario en tanto que no requiere de calibración del aparato y se puede usar para sólidos opacos, materiales porosos y transparentes bajo un intervalo variado de condiciones ambientales.

La modificación realizada a la propuesta de la ASTM obedece a la suposición de que las pérdidas convectivas son significativas, de tal manera que puedan modificar la condición de unidireccionalidad del calor propuesta por la ley de Fourier. Ésta consiste en encerrar todo el equipo en una cámara que permite realizar el vacío y con ello minimizar las corrientes convectivas. Las pérdidas por conducción se reducen al colocar el aislante alrededor del emparedado.

Para el ensayo del equipo se siguieron las recomendaciones de la ASTM. La minimización de las pérdidas de energía por conducción se llevó a cabo colocando una placa de 5.0 cm

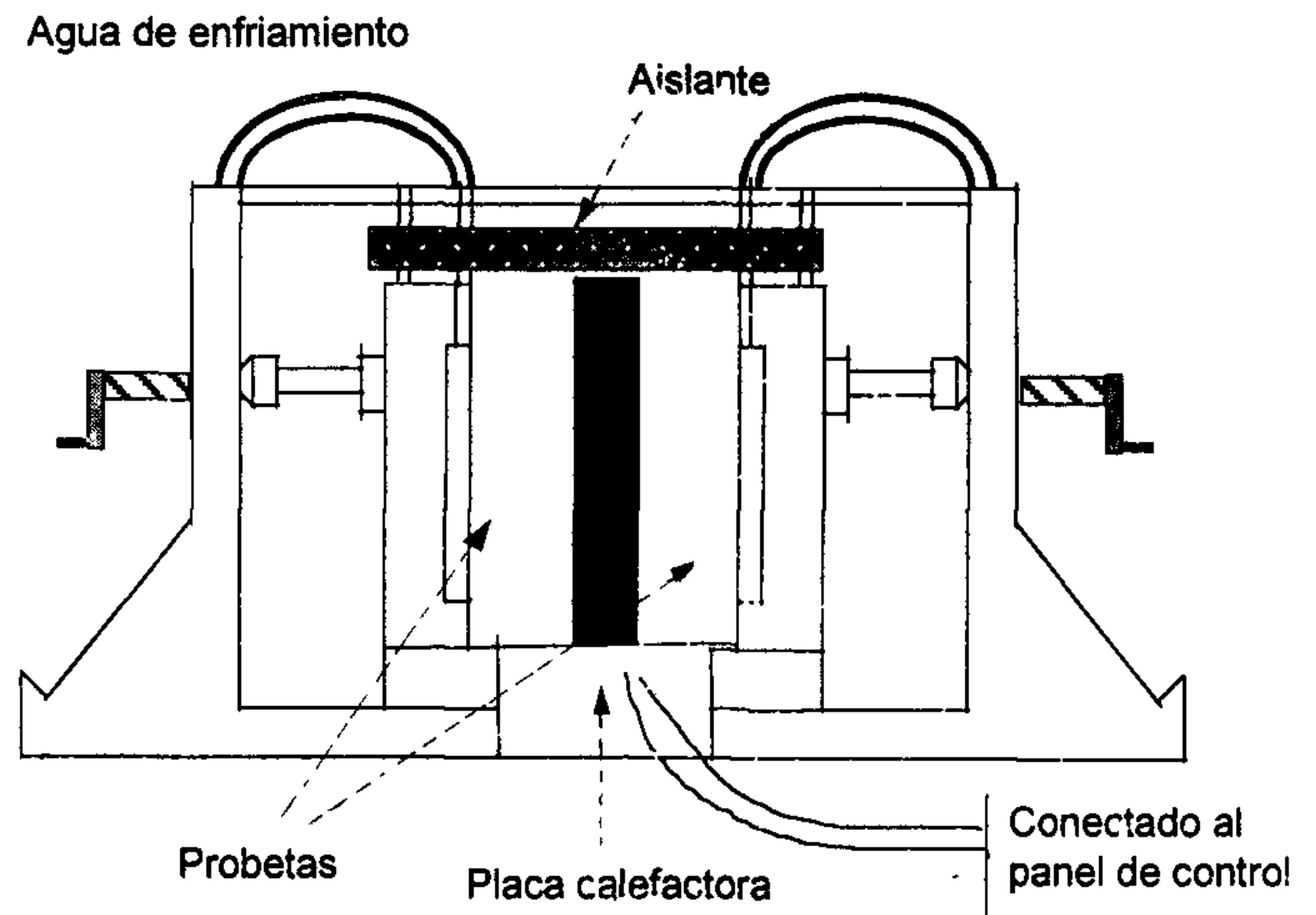


FIGURA 1. Diagrama del equipo utilizado.

de espesor de material aislante (fibra de vidrio) alrededor del emparedado formado por las placas conductoras y las del material a ensayar. Las pérdidas por convección se redujeron al efectuar el vacío en la cámara que confina al equipo, esto permitió que la determinación del calor transferido fuera más confiable, ya que al no haber corrientes convectivas las pérdidas de calor por este renglón serán menores y por lo tanto más cercanas a lo que se obtiene al calcular el calor suministrado por medio de la resistencia eléctrica. La cámara de vacío se fabricó con placa de acrílico de 1.2 cm de espesor. El vacío en la cámara se logró conectando una bomba para tal fin y se midió con un vacuómetro, cuya escala permite realizar una medición mínima de 0.2 cm de columna de mercurio.

De acuerdo con la ley de Fourier, es necesario determinar las temperaturas a ambos lados de las placas a examinar, para lograrlo se emplearon cuatro termopares tipo K en cada lado de las muestras, para un total de 16 termopares, los cuales fueron colocados simétricamente, para obtener uniformidad en las mediciones realizadas, se tuvo especial cuidado en que la punta de éstos hiciera un buen contacto con las paredes de las probetas de ensayo en el lugar indicado y no con la placa calefactora por un lado, o con la placa enfriadora por el otro. Todos los termopares fueron calibrados para evitar, en la medida de lo posible, errores en la medición.

La placa calentadora está formada por una placa cuadrada de aluminio de 30.0 cm de lado y 0.9 cm de espesor, la cual tiene embebida una resistencia eléctrica de Nicromel de 500 W en el cuadrado de 15.0 cm central y otra igual en la periferia de éste, ambas se controlan utilizando un reóstato. La función de la resistencia periférica es de propiciar la unidireccionalidad del flujo de calor de la resistencia central. La determinación de la energía transferida a la placa calentadora, se logra con la medición del voltaje y el amperaje.

Los materiales evaluados son los que más se utilizan en la construcción en México, a saber el concreto, el ladrillo cocido, el adobe y el yeso. Los dos primeros se fabricaron de acuerdo a la normalización existente y los dos últimos bajo la práctica tradicional.

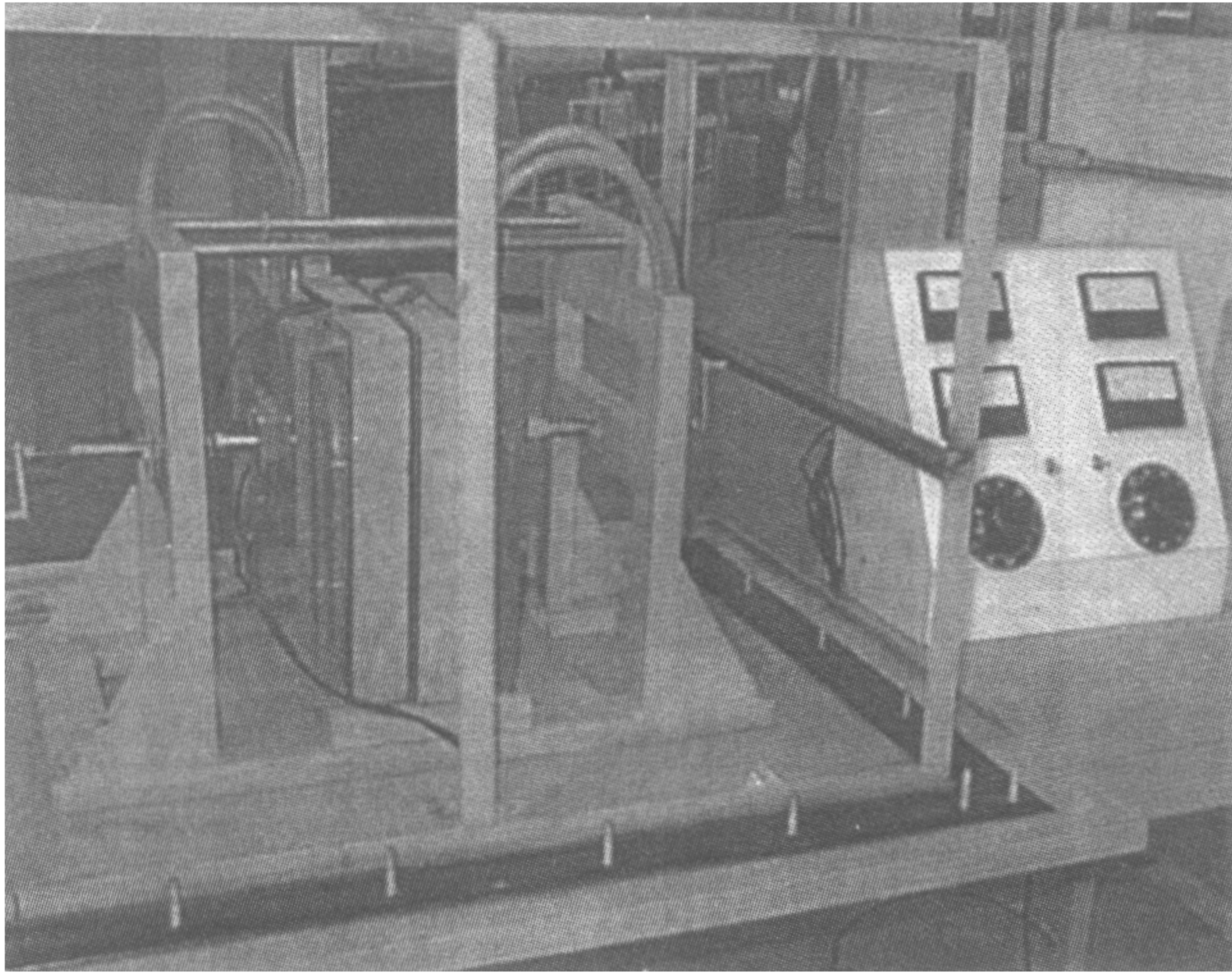


FIGURA 2. Fotografía del prototipo empleado, las probetas mostradas son de concreto.

La Fig. 2, muestra una fotografía del aparato armado e instrumentado. Las probetas mostradas son de concreto y se les sometió a un proceso de secado al que se hace referencia en la siguiente sección.

3. Procedimiento de ensayo

Cada una de las muestras se manufacturaron con la misma área de las placas calefactora y enfriadora; cuadradas de 30.0 cm de lado y 4.0 cm de espesor: se fabricaron por pares con el mismo material para garantizar la homogeneidad. El proceso de secado consistió en dejarlas durante 30 días dentro del ambiente del laboratorio y luego se introdujeron durante 48 horas a una mufla a una temperatura de 120°C, con el fin de obtener un mismo nivel de referencia respecto del contenido de humedad de cada conjunto de probetas del mismo material.

Posteriormente, éstas se montaron en el equipo, se instalaron los termopares, en los lugares previstos para ello y por

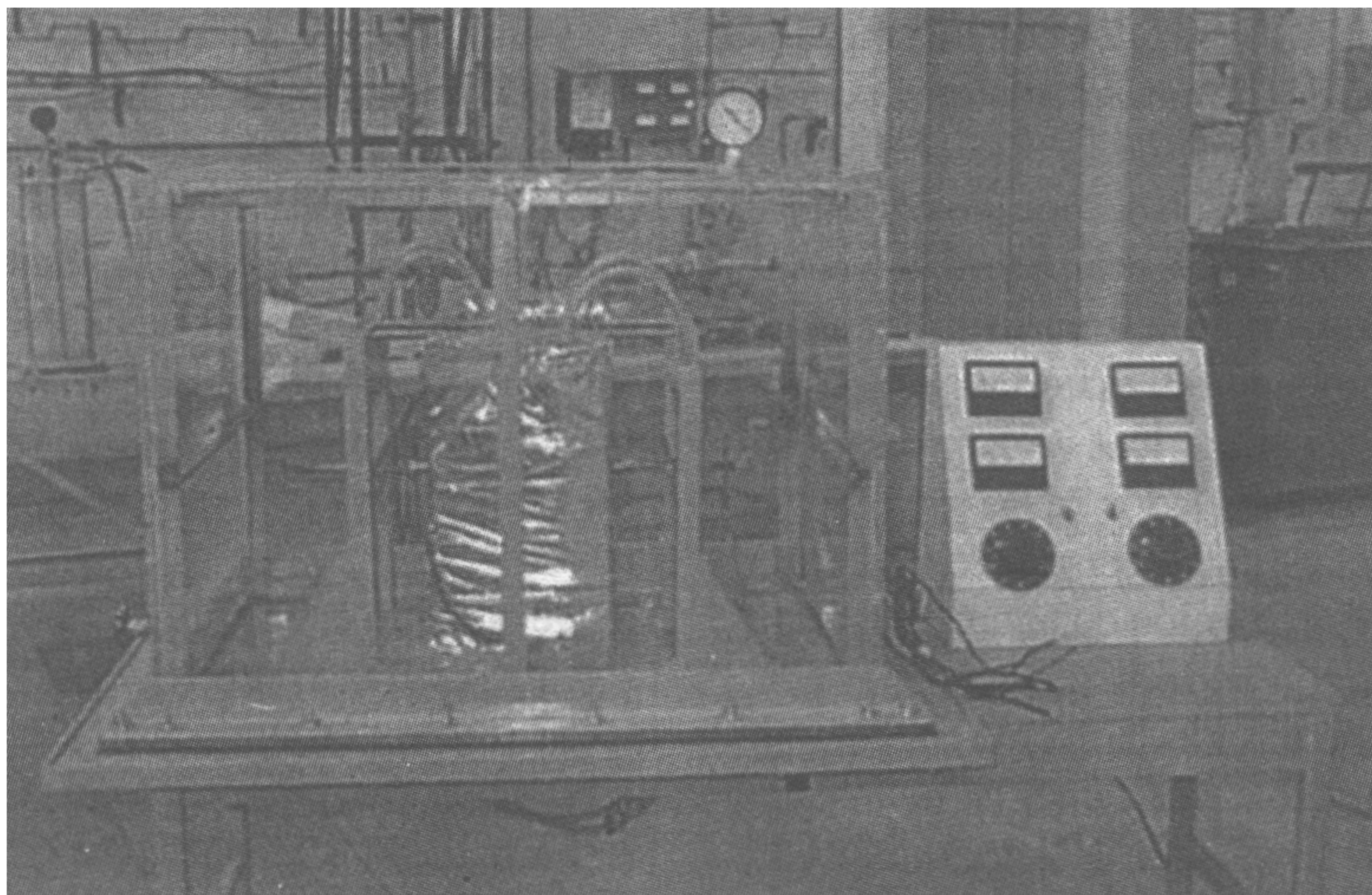


FIGURA 3. Equipo de pruebas con la cámara de vacío, la probeta se encuentra forrada con material aislante.

medio de tornillos colocados en los extremos del aparato se apretó todo el conjunto para formar un emparedado. Finalmente el bloque se cubrió con placas de fibra de vidrio de 5.0 cm de espesor y se realizó la experimentación en esta condición.

La fotografía de la Fig. 3 muestra la forma en que se instaló el equipo de prueba. Por medio de los interruptores se canalizó la corriente eléctrica al reóstato y se le fue proporcionando energía a la resistencia de la placa calefactora que gradualmente se fue calentando. La máxima energía suministrada a la placa calefactora en todas las experiencias siempre fue la misma de 100 Volts y 4 Amperes, controlada por el reóstato. Cuando se alcanzó la temperatura adecuada y el extremo opuesto de la placa comenzó a calentarse, se hizo circular agua de enfriamiento para mantener la diferencia de temperatura constante. Cuando la variación del flujo de agua

y la cantidad de energía se estabilizaron y la diferencia de temperatura acusaba una constancia aceptable se registraron estos datos. Este procedimiento se repitió varias veces.

El experimento se repitió, colocando la cámara de acrílico alrededor del equipo, la cual se selló perfectamente con la base para evitar las fugas. En esta condición se le practicó un vacío del 50% (para la Ciudad de México, 293 mm de Hg).

La composición química de los materiales ensayados puede resumirse como sigue:

- Adobe: 36.9% SiO₂, 31.8% Al₂O₃, 20.2% material orgánico, y 8.0% de humedad.
- Tabique: 45.5% SiO₂, 37.4% Al₂O₃, 1.5% Fe₂O₃, 1.3% TiO₂ y 6.0% de humedad.

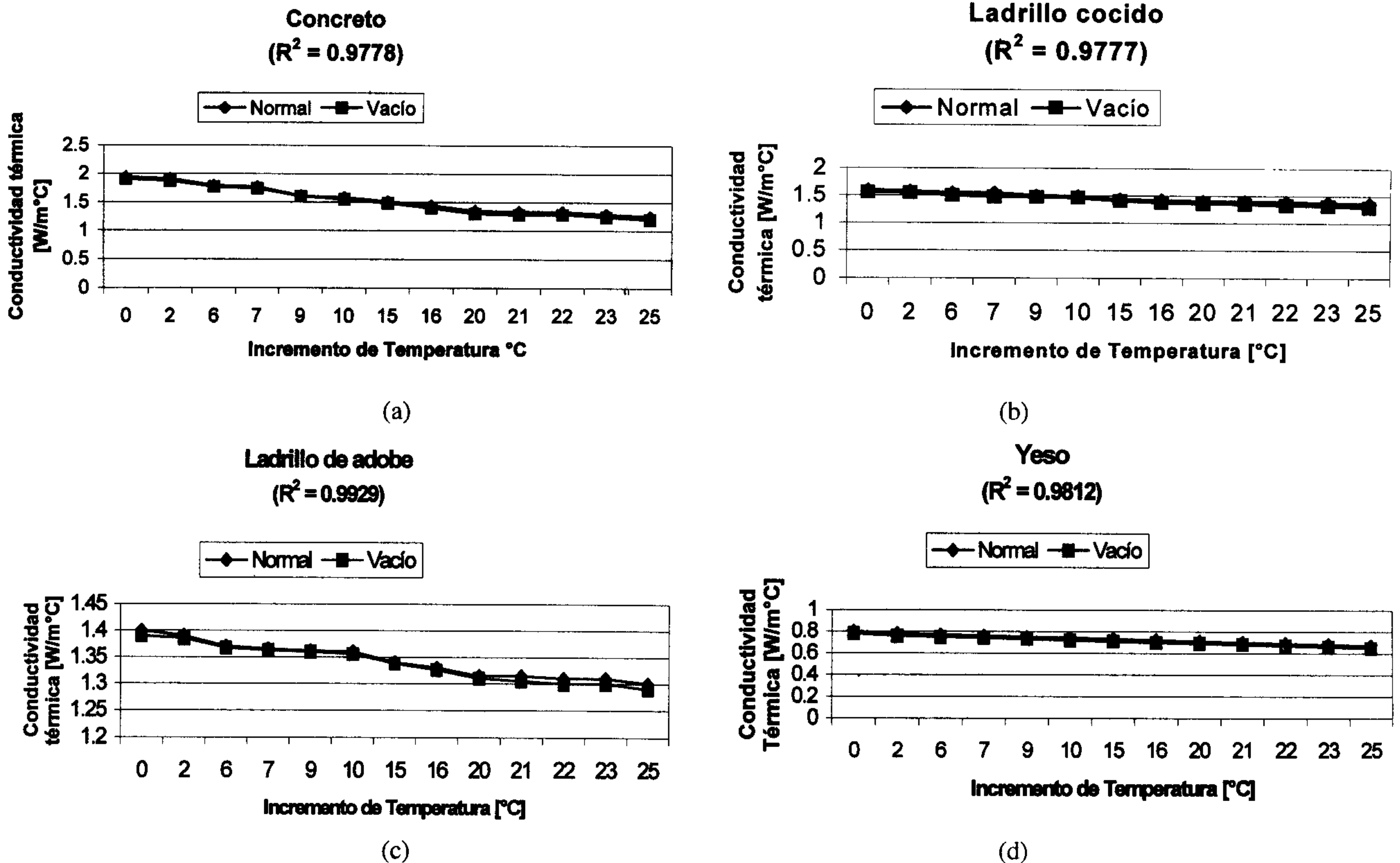


FIGURA 4. Resultados obtenidos para la probeta de (a) concreto, (b) ladrillo cocido, (c) ladrillo de adobe y (d) yeso.

- Yeso: 1.6% SiO_2 , 51.5% SO_3 , 38.3% CaO , 1.9% MgO , 4.2% de humedad.
- Concreto: 22.9% CaO , 19.6% SiO_2 , 15.7% $\text{K}(\text{AlSiO}_8)$, 13.1% $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7)$, 12.3% CaCO_3 , 8.0% $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$, 2.8% Al_2O_3 , 1.5% Fe_2O_3 , 1.3% CaSO_4 , 2.0% humedad.

Los minerales fueron determinados por duplicado mediante difracción de rayos X, empleando un difractor SIEMENS 500 Kristalloflex, acoplado a un tubo de rayos X de ánodo de cobre. Se seleccionó una longitud de onda de $K\alpha$ con un monocromador de haz difractado y patrones estándar. También se empleó microscopía electrónica de barrido con un equipo XL30 PHILIPS y un detector EDAX CDUTM LEAPTM.

4. Resultados y discusión

El equipo diseñado permitió verificar el orden de magnitud de las posibles pérdidas, de conducción y convección, atribuibles al tipo de aislamiento. La experimentación con un valor mayor al 50% de vacío no se justifica a la luz de los datos obtenidos.

Para cada una de las muestras las mediciones se realizaron en condiciones de flujo de calor permanente. Los resultados obtenidos se presentan en las Figs. 4a a 4d, el valor de la conductividad térmica fue determinado desde la temperatura

de 20°C hasta los 45°C, y se grafica en función del incremento de temperatura existente entre el lado caliente y el frío de la muestra. La placa enfriadora se mantuvo a temperatura constante de 20°C, utilizando un flujo constante de agua a esa temperatura, que también es la del medio ambiente.

Para el caso del concreto, la conductividad térmica obtenida se muestra en la Fig. 4a, el valor máximo es de 1.94 $\text{W/m}^\circ\text{C}$ y el mínimo de 1.2 $\text{W/m}^\circ\text{C}$, con lo cual el promedio es de 1.546 $\text{W/m}^\circ\text{C}$, el coeficiente de correlación tiene un valor de $R^2 = 0.9778$. Las variaciones existentes entre el experimento con vacío y sin él, 2.3%, indican que las pérdidas de energía por convección son mínimas y por lo tanto se pueden despreciar.

Los resultados obtenidos para el ladrillo cocido se muestran en la Fig. 4b, en este caso los valores son de 1.6 $\text{W/m}^\circ\text{C}$ para el máximo y 1.35 $\text{W/m}^\circ\text{C}$ el mínimo, el valor promedio es de 1.465 $\text{W/m}^\circ\text{C}$, la diferencia con respecto al valor del experimento con vacío es de 3.1%, la cual es despreciable, y del coeficiente de correlación es de $R^2 = 0.9777$.

Para el ladrillo de adobe, mostrado en la Fig. 4c, los valores son 1.4 $\text{W/m}^\circ\text{C}$ y 1.3 $\text{W/m}^\circ\text{C}$, con una diferencia del 1% con respecto al vacío. El valor promedio es de 1.35 $\text{W/m}^\circ\text{C}$, la correlación $R^2 = 0.9929$.

Finalmente la probeta de yeso arrojó los resultados mostrados en la Fig. 4d, 0.8 $\text{W/m}^\circ\text{C}$ y 0.62 $\text{W/m}^\circ\text{C}$, con un valor promedio de 0.72 $\text{W/m}^\circ\text{C}$, la diferencia con respecto al experimento con vacío es del 2.7% y la correlación $R^2 = 0.9812$.

TABLA I. Valores obtenidos.

Probeta	k_{atmos} W/m°C	$k_{vacío}$ W/m°C	% dif
Concreto	1.546	1.510	2.3
Ladrillo cocido	1.465	1.420	3.1
Adobe	1.350	1.337	1.0
Yeso	0.720	0.700	2.7

En la Tabla I se anotan los valores experimentales obtenidos, en la cual k_{atmos} , es la conductividad térmica a la presión atmosférica, $k_{vacío}$, es el valor al 50% de vacío y % dif. es el porcentaje de diferencia que existe entre ambos valores, con respecto al obtenido en condición atmosférica. En ningún caso dicho porcentaje fue mayor al 3%, es tan pequeña esta desigualdad, que las pérdidas de calor por convección al medio ambiente son prácticamente despreciables, es decir, el material que se utiliza como aislante y que cubre a las probetas es suficiente para evitar las pérdidas de energía al medio que rodea al equipo.

Los valores obtenidos en forma experimental difieren de los publicados en la literatura especializada [3, 4]. El dato publicado para la conductividad del concreto es de 1.37 W/m°C, el cual es 13% menor; para el ladrillo cocido 1.32 W/m°C, 11% inferior al determinado; para el caso del adobe 1.04 W/m°C que es 30% inferior al obtenido y finalmente para el yeso se tiene un valor de 0.48 W/m°C, 50% inferior.

La diferencia encontrada entre los valores consignados en la literatura especializada respecto a los obtenidos se puede atribuir a diferencias intrínsecas, tanto de las características de sus componentes como del proceso de fabricación, de los

materiales que se utilizan en la construcción de las casas habitación en México.

La necesidad de contar con coeficientes que correspondan a los materiales utilizados, mejoraría el uso y ahorro de la energía en el acondicionamiento del hábitat para cada situación geográfica del país.

5. Conclusiones

Se ha diseñado, construido y evaluado un equipo que permite obtener el coeficiente de conductividad térmica de los materiales más empleados en la construcción de casas habitación de México, en condiciones de presión atmosférica normal y al 50% de vacío.

La suposición establecida respecto a la influencia de las pérdidas de calor por convección no se ve corroborada por los resultados obtenidos, ya que, el porcentaje de diferencia entre una y otra experiencia arroja un máximo del 3%.

La experimentación realizada a presión atmosférica, para el caso del concreto y de ladrillo cocido difieren en una cantidad pequeña, menor al 13% del publicado en la literatura especializada. Pero para el caso del adobe y del yeso la diferencia es bastante notable, hasta del 50% en el segundo material.

Estos resultados refuerzan la suposición sobre la existencia de diferencias sensibles entre los coeficientes de conductividad térmica, típicamente utilizados (provenientes de la literatura especializada), contra los obtenidos en esta experiencia.

Finalmente el ahorro de energía y el aprovechamiento racional de los materiales de construcción esta intrínsecamente ligado al uso de este tipo de equipo para determinar la conductividad térmica de los materiales de cada localidad en particular.

1. ASTM, *Standard Method for Steady-State Heat Flow Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus*, C-177-97 (1997).
2. J. Fourier, "Analytical Theory of Heat", *Britannica Great Books of the Western World* (1952).
3. Holman, *Heat Transfer*, SI edition, (Mc Graw Hill, New York, 1989).
4. Karlekar, *Transferencia de Calor*, (Mc Graw Hill, México, 1990).
5. C. López *et al.*, "Equipo para evaluar en forma experimental el coeficiente de conductividad térmica de los materiales de construcción". VII Congreso Latinoamericano De Transferencia de Calor y Materia 98, (Salta, Argentina, 1998).
6. N. Ozisik, *Heat Transfer, a basic Approach*, (Mc Graw Hill, New York, 1985).