

METODOLOGIA PARA MEDIR LA
CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL SUELO

Luis Giobergia*, Vicente Volantino*
Departamento de Construcciones - INTI
Av. Leandro N. Alem 1967, 5°6°y 7°Piso
1001 - BUENOS AIRES

RESUMEN

En la determinación del coeficiente volumétrico de pérdidas de calor de edificios, se debe considerar el término que contempla las pérdidas por el piso. En el mismo intervienen no sólo las características del material utilizado en cada caso, sino la conductividad térmica del terreno. /1/ /2/.

Es difícil obtener a partir de la bibliografía valores que puedan realmente caracterizar el terreno bajo estudio debido a la gran variedad de alternativas posibles y los valores tabulados presentan entre sí una gran dispersión.

El coeficiente de conductividad térmica es una propiedad térmica básica del suelo. Este depende de muchos factores tales como la temperatura, densidad, contenido de agua y estado de fase en que se halla el agua del suelo; todos los cuales cambian con las estaciones climáticas.

Por lo expuesto, surgió la necesidad de disponer de un método de determinación de este parámetro. Para ello se implementó un sensor que está compuesto por una fuente de calor lineal (sonda), la que detecta variaciones en la temperatura en régimen no estacionario de transmisión de calor.

Este método permite determinar fundamentalmente la conductividad térmica del suelo, pero también se ha verificado que es válido para otros tipos de materiales: en polvo, granulados, aislantes, etc.

El presente trabajo describe los detalles constructivos del dispositivo de medición y se dan algunos resultados obtenidos de las mediciones.

En todos los casos se presentan, a modo de comparación, los valores correspondientes a mediciones realizadas por sistemas normalizados que determinan la conductividad térmica en régimen permanente de transmisión de calor.

Por sus características este sistema de medición permite ser empleado tanto para determinaciones en el laboratorio como en el campo (mediciones "in situ")

*Investigador asociado
(por orden alfabético)

INTRODUCCION

Para la medición de conductividad térmica de los materiales, se pueden emplear también, sistemas basados en métodos dinámicos de transmisión de calor.

Estos se refieren a aquellos que funcionan mediante fuentes lineales de calentamiento, como el del alambre calefactor, o bien por el método de la sonda.

En ambos casos, el elemento en cuestión, debe estar inmerso dentro del material a ensayar, asegurando buen contacto, lo mejor que sea posible.

El método consiste en determinar la conductividad térmica (λ), obtenida a través de una proporcionalidad de la velocidad de elevación de la temperatura que experimenta la muestra, producida por una fuente de calor lineal, invariable en el tiempo y constante a lo largo de toda su extensión.

Estos sistemas de medición son mucho más rápidos que los métodos que utilizan la transmisión de calor en régimen permanente, y además requieren técnicas de implementación más sencillas.

Además, debido a que el ensayo es de poca duración, normalmente inferior a los 1200 segundos (dependiendo esto de las condiciones de borde), se puede decir que estos métodos no están limitados a determinar valores de conductividad de materiales secos. Es decir, que se pueden obtener resultados que respondan a las características reales de la muestra, la que se ensaya con el contenido de humedad que

efectivamente posee.

El método de sonda, que es el que se presenta en este trabajo, tiene antecedentes vastísimos y de considerable antigüedad. Fue desarrollado originalmente por vander Held y Drumen (1949) que le siguieron una serie de mejoras y estudios más de tallados propuestos por Hooper y Lepper (1950), Hooper y Chang (1952), D'Eustachio y Schreiner (1952), vander Held (1953), Blackwell (1954 y 1956), Jaeger (1956), etc entre otros.

Los resultados de las mediciones efectuadas por este método, pueden ser analizadas de dos maneras, dependiendo de si se considera una fuente lineal de calentamiento (Carslaw y Jaeger, 1959) o bien una fuente cilíndrica de calentamiento (Blackwell, 1954; Jaeger, 1956).

Si el diámetro de la sonda es muy pequeño, comparado con el largo de la misma, puede considerarse entonces, como una fuente lineal de calentamiento (Penner, 1970).

TEORIA

Si se considera que la aplicación de calor se efectúa a través de un alambre fino e infinitamente largo, inmerso en un medio homogéneo e infinito, inicialmente en equilibrio térmico, entonces, la elevación de temperatura de la muestra está dada por:

$$T = \frac{Q}{4 \pi \lambda} E_i \left(-\frac{r^2}{4 k t} \right) \quad (1)$$

donde:

Q : flujo de calor por unidad de longitud de sonda

T : elevación de temperatura

λ : conductividad térmica del material

E_i : integral exponencial

r : distancia radial desde la fuente lineal de calor

k : difusividad térmica del material

t : tiempo

Para grandes valores de tiempo la integral exponencial puede ser aproximadamente por una función logarítmica y la elevación de temperatura de cualquier punto del medio estará dada por:

$$T = \frac{Q}{4 \pi \lambda} \ln \left(\frac{4 k t}{r^2 \cdot D} \right) \quad (2)$$

donde D = 1,7811 (antilogaritmo natural de la constante de Euler)

Para un intervalo ($t_2 - t_1$), la elevación de temperatura será

$$\Delta T = T_2 - T_1 = \frac{Q}{4 \pi \lambda} \ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad (3)$$

De manera que si graficamos la elevación de temperatura en función del logaritmo del tiempo, dará una línea recta con pendiente igual a $Q/4\pi\lambda$

Así, el valor de λ se puede obtener conociendo dicha pendiente y habiendo aplicado una cantidad de calor por unidad de tiempo y longitud conocida.

Si bien la ecuación (3) permite una fácil manera de resolver el problema de medición, no siempre es realmente aplicable, principalmente cuando se trata de un método como el de la sonda, en la que es difícil asimilarla a una fuente lineal de calor.

De acuerdo con esto, Blackwell (1954) resolvió el más complicado problema que presenta la sonda, al ser tomada como fuente cilíndrica de calor. Consideró que la sonda tiene radio finito y posee capacidad calorífica, y que existe resistencia de contacto entre ella y el medio que la rodea (material). En el instante inicial, si el calor es suministrado a una velocidad constante, la temperatura de calentamiento estará dada por la expresión enunciada por Jaeger (1956).

$$T = \frac{Q}{\lambda} G \left(\frac{\lambda}{b \times \Lambda}, \frac{2 \pi b \delta c}{M \times C}, \frac{k t}{b^2} \right) \quad (4)$$

donde: T, Q, λ , k y t fueron definidos para la expresión (1).

G: es una función integral

b: radio de la sonda

Λ : conductancia de la capa de contacto

δ : densidad del material

c: calor específico del material

C: capacidad calorífica de la sonda

M: masa de la sonda por unidad de longitud

La función G puede ser expandida en serie ascendente para las funciones modificadas de Bessel y por eliminación de términos que rápidamente se hacen despreciables, la elevación de temperatura de la sonda puede escribirse:

$$T = \frac{Q}{4 \pi \lambda} \left[\ln \left(\frac{4 k t}{b^2 D} \right) + \frac{2 \lambda}{b \cdot \Lambda} \right] \quad (5)$$

Las propiedades térmicas de la sonda no están consideradas en esta ecuación (5), pero sí está presente el efecto de la capa de contacto. Si se toman las temperaturas dentro de la sonda, en dos instantes t_1 y t_2 , la conductividad puede calcularse como:

$$\lambda = \frac{Q}{4 \pi (T_2 - T_1)} \ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad (6)$$

que es idéntica a la expresión (3)

La ecuación (6) muestra que el valor medido no depende ni de las propiedades térmicas de la sonda ni de la resistencia térmica de la capa del material en contacto, ni de la posición radial del elemento sensor de temperatura, ubicado dentro de la sonda.

En el desarrollo de la ecuación (6), se asumió que la fuente cilíndrica de calor posee longitud infinita y que se encontraba en una muestra de diámetro infinito. Blackwell (1956) demostró que si bien las sondas tienen una longitud finita y se apartan de esas condiciones, los errores que se cometen en la medición de la conductividad térmica son muy pequeños (menores que el 1%), si la relación longitud-diámetro de la sonda es mayor que 25. Este error, debido al flujo de calor axial en la sonda, aumenta con el tiempo.

De acuerdo a la expresión (3), la respuesta de la elevación de temperatura en función del logaritmo natural del tiempo, es una línea recta.

Sin embargo, en la práctica esta función lineal se observa después de cierto instante τ_1 , ya que en la parte inicial se observaría un tramo curvo, si lleváramos los valores medidos a un gráfico semi-logarítmico. Esta curvatura es debida a los efectos producidos por el tamaño de la sonda, sus propiedades térmicas y a la resistencia de contacto con el material.

Para tiempos mayores que τ_1 , la curva que se observa en el mismo gráfico es debida a la pérdida de calor axial, mencionada anteriormente.

En la discusión previa, también se consideró que la muestra a ensayar, tenía radio infinitamente grande.

Si la sonda se introduce en el suelo para determinar su conductividad térmica, esta condición puede darse por válida. Pero para cualquier otro caso, la muestra posee un radio finito y por lo tanto, existe cierto pasaje de flujo de calor a través de su superficie lateral.

Wechsler (1966), recomendó un criterio para establecer cual debe ser el diámetro de la muestra a ensayar. Asumió que si el calor que fluye a través de la superficie lateral de la muestra o el que es reflejada por ella, es mucho menor que la energía aportada por la sonda, el valor de la conductividad térmica medida tiene un error insignificante.

Este criterio puede expresarse por:

$$e = \frac{R^2}{4 k t} \leq 0,02$$

donde R = radio de la muestra requerida, depende de la difusividad térmica del material y del tiempo necesario para realizar el ensayo.

DESCRIPCION DEL SENSOR

En la figura 1 se puede ver un diagrama esquemático de la sonda. La misma está constituida por un hilo calefactor, realizado con alambre de Kanthal esmaltado, de diámetro muy fino (0,0002 m) el que se arrolló sobre un tubo cerámico. Dentro de este tubo se instaló el sensor de temperatura, utilizándose una termocupla de cobre-constantan, colocada en la mitad de la longitud de dicho cilindro cerámico.

Este conjunto se halla ubicado dentro de una vaina de acero inoxidable. El espacio que queda entre la vaina y el arrollamiento calefactor, se llenó completamente con resina epoxi de alta conductividad térmica.

La mencionada vaina que es la cubierta exterior de la sonda, se continúa a través de un mango de plástico, que le da posibilidad de mejor manipuleo y le sirve de contenedor de los alambres terminales.

Las dimensiones de la sonda se observan también en la figura 1.

De la misma, puede calcularse la relación longitud-diámetro implementada, igual

a 30, de modo que esta sonda puede ser consi
derada, a los fines teóricos (de acuerdo con
Blackwell), como una fuente lineal de calenta
miento.

METODOLOGIA DE LA MEDICION

Imponiendo una dada intensidad de co-
rriente constante, a través de la resisten-
cia calefactora (arrollamiento de Kanthal),
se produce un aumento de temperatura que es
detectado por la termocupla. Se lleva un re
gistro de los valores alcanzados por esta
para diferentes tiempos, tomados a iguales
intervalos y se grafican los aumentos de tem
peratura en función del tiempo. Se ha obser
vado que la primera parte de la función ob-
tenida, responde más a las características
constructivas de la sonda, que a las propie
dades del material que se desea medir. Por
esta razón, se utilizan para la determina-
ción de la conductividad térmica, los valo
res medidos a partir de los 180 segundos.

A partir de ese instante, la función
representada es lineal y la pendiente es
proporcional al valor de conductividad tér
mica buscado.

Cualquier anomalía detectada en la
parte lineal de la función (valores con mu
chas oscilaciones respecto de la recta tra
zada, saturación prematura de la curva de
calentamiento, etc.) es suficiente para no
validar el ensayo, y se deberá efectuar nue
vamente, una vez que la temperatura de la
muestra se establezca a la de ambiente.

De no ocurrir ninguna irregularidad,
transcurridos 600 segundos se da por fin
lizado el ensayo procediéndose al cálculo
de la conductividad térmica por medio de
 $\lambda = C \times t^2 / \Delta T$, donde C es la constante
de proporcionalidad que está vinculada a
las características de la sonda, ΔT re-
presenta la diferencia de temperaturas co
rrespondientes a $t = 1200$ segundos y $t =$
120 segundos e I es la intensidad de co-
rriente que circula a través del arrolla-

miento. Dicha corriente puede adoptar dife-
rentes valores de acuerdo a las característi-
cas del material a ensayar. Por ejemplo para
materiales aislantes y maderas, el valor de
I está comprendido entre 0,1 y 0,25 mA, y pa-
ra materiales en polvo de 0,25 a 0,5 mA.

CALIBRACION

El método patrón recomendado para la de-
terminación de conductividad térmica de un
material es el denominado placa caliente con
placa de guarda, que se ajusta a las especi-
ficaciones dadas en las Normas ASTM C 177 e
ISO 2585 (7). Conjuntamente a este sistema
se empleó además otro método que se basa en
la medición de caudal térmico (Norma ASTM C 518)
(8), los que fueron seleccionados para pro-
ceder a la calibración de la sonda. Ambos
métodos se desarrollan en condiciones de me
dición a régimen permanente.

Los procedimientos, equipos, materia-
les usados y resultados obtenidos durante
la calibración se discutirán más adelante.

PREPARACION DE LAS MUESTRAS UTILIZADAS

Todas las muestras utilizadas son com
ponentes de suelo como se puede observar en
la tabla 1. Dichas muestras fueron tamizadas
(30-35) y luego secadas en estufa a tempera-
tura constante hasta que no se observase va-
riación en el peso, para asegurar contenido
de humedad nulo. Esto es a los efectos de
poder efectuar la comparación de los valores
obtenidos mediante los métodos de medición
que funcionan a régimen permanente, ya que
dichos métodos de medición modifican el por
centaje de humedad debido al constante apor
te de calor, cosa que no sucede con los mé-
todos de medición dinámicos (sonda e hilo
calefactor).

CONDICIONES DE ENSAYO

A. Sonda e hilo calefactor

Las muestras se han colocado dentro de un molde cuyas dimensiones son 300 x 200 x 200 mm a una temperatura ambiente que osciló entre 19 y 20 C, el tiempo de medición es de 10 min. y los resultados obtenidos se vuelcan en papel semi-logarítmico.

B. Placa caliente y medición del caudal térmico.

En el primer método las muestras se han colocado en dos moldes de 600 x 600 x 50 mm y en el segundo en un solo molde de 300 x 300 x 50 mm. Los ensayos se ejecutaron con T_H (temperatura de placa caliente) = 37 C, T_C (Temperatura de placa fría) = 13 C, es decir con un $\Delta T = 24$ C y T_M (Temperatura media) = 25 C. La duración del ensayo es función del tiempo de material y puede oscilar en el método de medición del caudal térmico entre 4 y 8 horas y en el método de la placa caliente entre 1 y 3 días.

NOTA:

Mediante el método de la placa caliente se efectuó solo un ensayo debido a la necesidad de poseer muestras en gran cantidad y a su tiempo de ensayo muy extenso. De cualquier manera sirvió para verificar las cualidades del equipo medidor de flujo de calor.

RESULTADOS OBTENIDOS:

Los resultados obtenidos de las mediciones son los que se presentan en la Tabla 1.

En el apéndice 1 se muestran los gráficos obtenidos para cada muestra resultantes de los ensayos correspondientes al método de la sonda y del hilo calefactor. En el apéndice 2, pueden observarse valores obtenidos de ensayos realizados en algunos materiales sólidos.

La función de la curva de calibración resultó ser:

$$\lambda_{fc} = 0.0362 + 0.72106 \times \lambda_s$$

donde: λ_s y λ_{fc} representan las conductividades medidas con la sonda y con el medidor de flujo de calor, respectivamente.

La determinación de los valores para el trazado de la curva de calibración fueron obtenidos realizando sobre cada muestra una serie de cinco ensayos, cuyos valores promedios son los que figuran en la tabla 1.

CONCLUSIONES

Puede observarse que los valores de conductividad térmica obtenidos mediante los métodos de medición a régimen permanente dan ligeramente inferior a los determinados por medio de la sonda o del hilo calefactor.

Esto puede deberse a que en estos últimos se hace presente el efecto de capacidad que poseen los métodos no estacionarios.

Esto afirma la teoría expuesta al comienzo, sobre la ventaja que presentan los métodos de medición dinámicos sobre los otros, al poder realizar determinaciones sobre muestras húmedas y permiten, indirectamente, el conocimiento del contenido de humedad de las mismas.

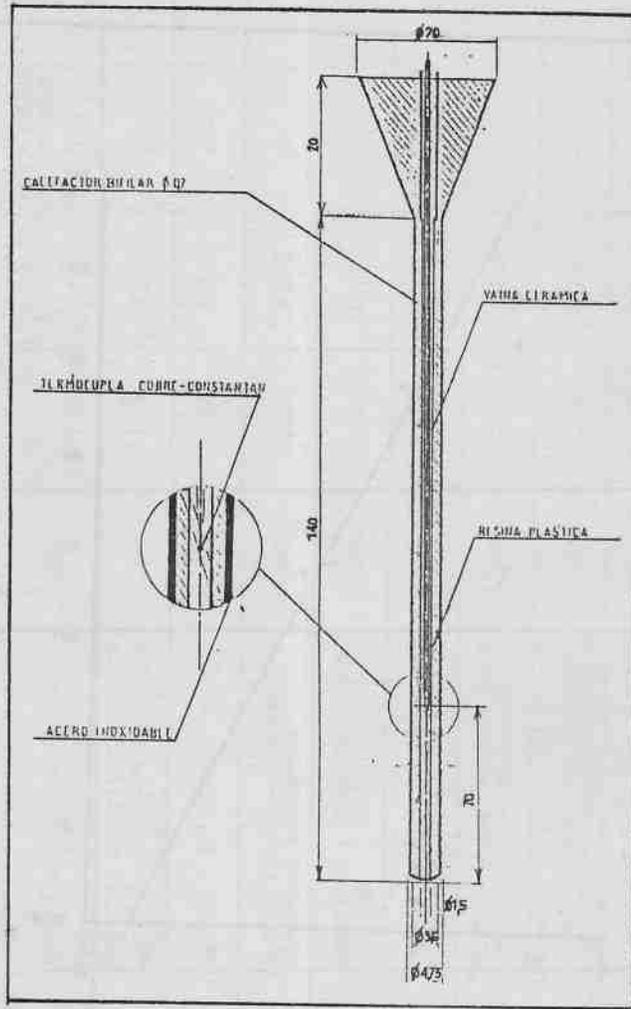
Cabe el hacer notar que, el método de la sonda es apto para convertirse en equipo de medición portátil y efectuar por ende mediciones de campo.

Además, la precisión de los valores de terminados por la sonda puede mejorarse cuando se usa la curva de calibración hallada.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su reconocimiento por el interés y la colaboración prestada a lo largo de todo el trabajo de los señores Wenceslao T. Moreno y Roberto A. Montes, de la División Habitabilidad Higrotérmica.

FIGURA 1



Todas las dimensiones están expresadas en mm

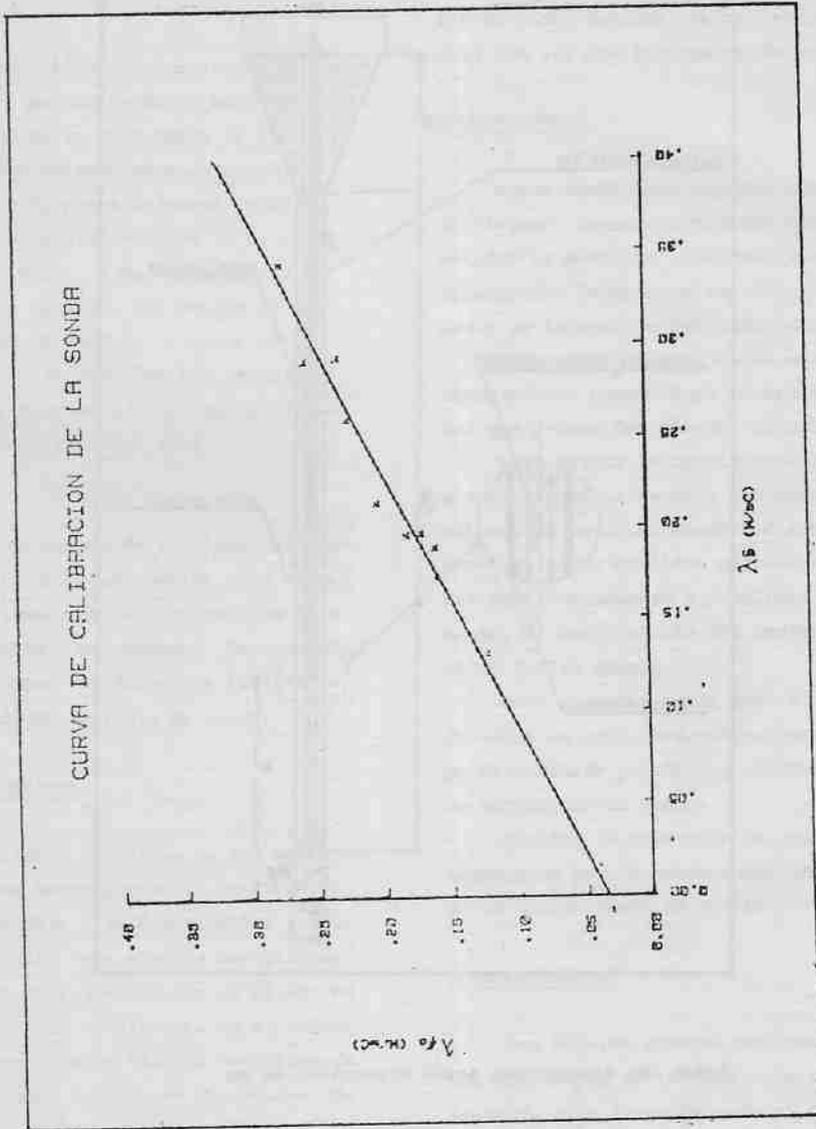


FIGURA 2

TABLA 1

* MATERIAL	COMPOSICION MINERALOGICA	METODO DE MEDICION DE CONDUCTIVIDAD TERMICA λ (w/mc)					DENSIDAD δ (g/m ³)
		SONDA	HILO CALEF. (DIN 51046)	VEDIDOS DE LOR (ASIN C518)	PLACA CALEF. TE CON GAR DA (ASTM C177)		
Toba en polvo	Material cuneítico - vidrio en 95 % - Clastos de plagioclasa y cuarzo.	0,130	0,142	0,124	0,125	914	
Arena Misionera	Cuarzo - areniscas - mica	0,292	0,283	0,234	---	1462	
Arena del Paraná	Cuarzo (95 %) - feldespatos - minerales accesorios	0,342	0,333	0,276	---	1513	
Arena de la Patagonia (Neuquén)	Andesitas - basaltos - gra- níticas	0,196	0,206	0,172	---	1331	
Arena	Mezcla de basalto triturado y arena silíceas	0,259	0,256	0,227	---	1517	
Limo	Cuarzo (~85%) - calcedonia- feldespato - areniscas	0,195	0,204	0,163	---	1196	
Arena El Dorado (Misiones)	Cuarzo (~90%) - feldespatos (~5%) areniscas ferruginos- as (~3%) magnetita y ace- sorios.	0,290	0,355	0,259	---	1530	
Arena de trituración	Andesitas (~70 %) - Graníti- cas (~30 %) - cuarzo <<	0,213	0,208	0,205	---	1441	
Tierra	Cuarzo - Plagioclasa - Mate- ria org. Arcilla Montmorillon- ítica.	0,188	0,182	0,162	---	1277	
Avilla	Caolinita	0,172	0,136	0,162	---	1289	

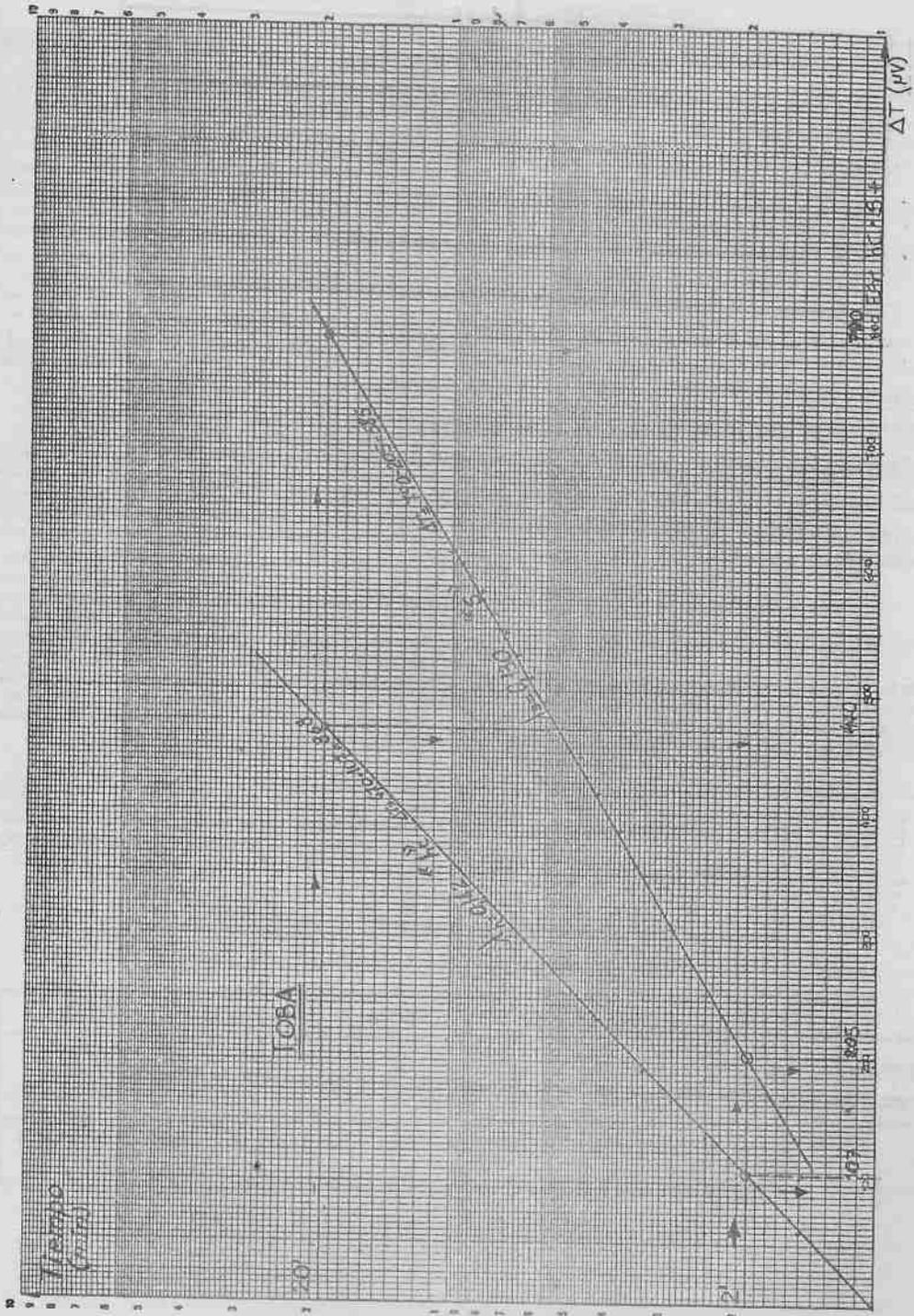
También se agradece a la Lic. Beatriz P. de De Maio, de la Div. Rocas y Agregados, por la colaboración brindada en la selección y caracterización de las muestras ensayadas.

REFERENCIAS:

1. "REGLES DE CALCUL DE CARACTERISTIQUES
THERMIQUES UTILES DES PAROIS DE CONSTRUCTION"
Document Technique Unifié. CSTB. 1977
2. "NORMA IRAM N° 11604"
Noviembre 1985
3. "THERMAL CONDUCTIVITY LABORATORY STUDIES
OF SOME MACKENZIE HIGHWAY SOIL"
E. Penner, G. H. Johnston, L. E. Goodrich
National Research Council of Canada. DBR
1975
4. "THERMAL CONDUCTIVITY OF SOME ICE RICH
PERMAFROST SOILS"
W. A. Slusarchuk, G. H. Watson
National Research Council of Canada. DBR
1975
5. "A PROBE FOR MEASURING BOTH THERMAL
CONDUCTIVITY AND WATER CONTENT OF SOILS"
T. H. W. Baker, L. E. Goodrich
National Research Council of Canada. DBR
1984
6. "DEVELOPMENT AND CALIBRATION OF THERMAL
CONDUCTIVITY PROBE APPARATUS FOR USE IN
THE FIELD AND LABORATORY"
W. A. Slusarchuk, P. H. Foulger
National Research Council of Canadá. 1973
7. ANSI/ASTM C 177. "STEADY-STATE THERMAL
TRANSMISSION PROPERTIES BY MEANS OF THE
GUARDED HOT PLATE"
8. ANSI/ASTM C 518 "STEADY-STATE THERMAL
TRANSMISSION PROPERTIES BY MEANS OF THE
HEAT FLOW METER"

GRAFICOS CORRESPONDIENTES A LAS MEDICIONES EFECTUADAS MEDIANTE LA SONDA Y EL HILO CALEFACTOR.

Material: TOBA (en polvo)



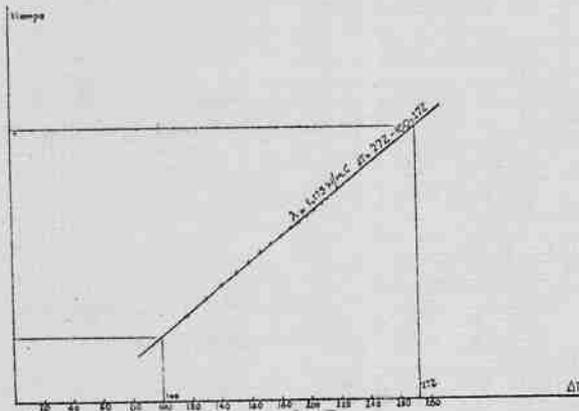
APENDICE 2

TABLA 2: Valores de conductividad térmica de materiales sólidos

MATERIAL	DENSIDAD (kg/m ³)	MÉTODOS DE MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA λ (W/mC)		
		SONDA	HILO CALEF. (DIN 51046)	MEDIDOR DE FLUJO DE CALOR POR ASTM C518
Poliuretano rígido	40	0,0224	0,0213	0,0205
Poliestireno expandido	15	0,0425	0,042	0,0407
Poliestireno expandido	20	0,034	0,037	0,0362
Madera (Pino)	540	0,112	0,127	---

MEDICIÓN "IN SITU"

El resultado del ensayo que se observa en el gráfico, fue efectuado "in situ". En el mismo se puede divisar que a partir de los 3 minutos los puntos obtenidos definen perfectamente una recta y que mediante la fórmula definida anteriormente se puede obtener la conductividad térmica del terreno en cuestión, siendo este el objetivo primario de la sonda.



Resultado obtenido: Conductividad térmica (λ) = 1,175 W/m C

ACLARACION:

La medición se realizó sobre un terreno que contenía alto porcentaje de humedad.