

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA CON EL CONTENIDO DE HUMEDAD PARA MUESTRAS DE YESO

S. Flores, G. Lesino  
INENCO, CIUNSA<sup>(\*)</sup>

Universidad Nacional de Salta

Buenos Aires 177 - 4400 Salta - República Argentina

Tel: 54-87-255423 - Fax: 54-87-255489 - Email: seflores@ciunsa.edu.ar

### RESUMEN

En muchas situaciones es necesario medir el contenido de humedad de una muestra, y esta determinación se hace indispensable en el caso de restauración de monumentos históricos, construcciones, obras pictóricas, etc., en los que el análisis debe ser, además, no destructivo. La humedad influye directamente en las propiedades térmicas del material, por lo cual mediciones sobre estas propiedades brindan información sobre el contenido de agua. El conocimiento de la difusividad térmica es el paso preliminar para luego realizar la determinación de la conductividad térmica  $k$  y del contenido de humedad presente en la muestra estudiada. En este trabajo se describe un método con técnica láser no destructivo utilizado para determinar el comportamiento de la difusividad con el contenido de humedad en muestras de yeso.

### INTRODUCCIÓN

La difusividad térmica  $\alpha$  ( $m^2/s$ ) se define como:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (1)$$

donde  $\rho$  es la densidad del sólido en  $kg/m^3$ ,  $k$  su conductividad térmica en  $W/m^\circ C$  y  $c_p$  la capacidad calorífica a presión constante en  $J/kg^\circ C$ .

La difusividad térmica mide la velocidad con que los cambios de temperatura ocurren en la muestra, por lo que es esencial en el proceso de transmisión de calor en régimen transitorio. Así como la conductividad térmica es un factor que indica la capacidad del sólido para conducir el calor, la difusividad es la medida de su inercia térmica.

La humedad de la muestra influye sobre la difusividad térmica: como  $\alpha$  es la relación de la conductividad térmica a la capacidad calorífica y a la densidad, el comportamiento de la difusividad en un sólido es el resultado de la variación de estas propiedades con el contenido de humedad.

### MODELO MATEMÁTICO

La superficie del material, considerado homogéneo e isotrópico, recibe un flujo de calor  $Q$  constante proveniente de un haz láser, que incide en un área circular de radio  $a$ . Como el cuerpo absorbe sólo una parte de la radiación incidente, el flujo a ser considerado es  $q = \gamma Q$ , en donde  $\gamma$  es la absorptividad del material en la longitud de onda correspondiente a la de la radiación láser. Si, como primera aproximación al problema, se supone que el contenido de humedad de la muestra permanece constante, entonces la disipación de calor se llevará a cabo por dos mecanismos: por conducción radial y axial, por lo cual la muestra sufrirá un incremento de temperatura, y por pérdidas convectivas y radiativas hacia el ambiente a través de un coeficiente global  $h$  que se supone constante durante el calentamiento.

El problema queda determinado, entonces, por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (2)$$

con las siguientes condiciones iniciales y de contorno:

<sup>(\*)</sup> Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta.

$$\begin{aligned}
T(r, z, t = 0) &= T_{amb} \\
-k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} &= \begin{cases} q - h(T|_{r,z=0,t} - T_{amb}) & \text{si } r \leq a \\ -h(T|_{r,z=0,t} - T_{amb}) & \text{si } r \geq a \end{cases} \quad (3) \\
-k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L} &= -h(T|_{r,z=L,t} - T_{amb}) \\
T(r \rightarrow \infty, z, t) &= T_{amb}
\end{aligned}$$

Este sistema puede resolverse por el método de diferencias finitas, entre cuyos parámetros estará la difusividad térmica  $\alpha$ . Experimentalmente se obtiene una curva de calentamiento que será aproximada por este método haciendo variar los parámetros intervinientes hasta encontrar los que mejor la ajustan (método de cuadrados mínimos).

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

### Montaje de la experiencia

En la Figura 1 se pueden observar los elementos que intervienen en una sesión de medición:

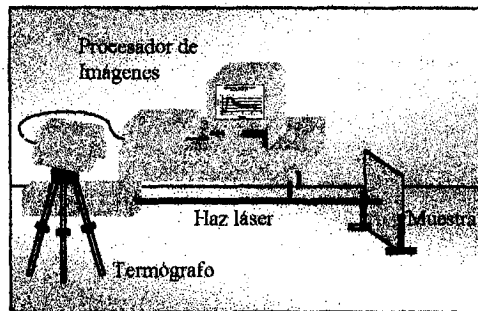


Figura 1: Disposición de los elementos de la experiencia

La muestra, colocada en un soporte (si es pequeña) o irradiada directamente (si es extensa), debe colocarse perpendicularmente al haz láser. El termógrafo (Inframetrics Model 600) se coloca frente a la muestra, a una distancia no superior a 1.5 m. Los datos obtenidos por el termógrafo son enviados a un procesador de imágenes ITEX-MFG y procesados por un programa (TERMO) especialmente desarrollado para el tratamiento de imágenes, cuya descripción se encuentra en trabajos anteriores (1).

Para la irradiación se utilizó un láser de potencia de argón, en la longitud de onda de 514 nm (verde), que es la línea más potente que puede obtenerse del equipo, con potencias comprendidas entre 0.5 W y 1.5 W. El equipo cuenta con una abertura graduada de 0 a 12, que permite variar el diámetro efectivo del haz.

Se utilizó yeso proveniente de placas Durlock del tipo que se utiliza en la construcción. Al ser el yeso muy higroscópico, es especialmente útil para obtener muestras con distintos contenidos de humedad, lo cual permite hacer un estudio de la variación de la difusividad térmica con el contenido de humedad.

Para tal fin se cortaron 6 muestras de 10cm x 10 cm y se las sumergió en un recipiente con agua durante 1 minuto. A continuación se retiraron las muestras y se las colocó a secar en un horno a 100°C. Para obtener distintos contenidos de humedad, las muestras se fueron retirando a distintos intervalos de tiempo, colocándolas inmediatamente en una bolsita plástica para impedir cualquier tipo de variación del contenido de agua presente.

Luego de haber realizado la experiencia, las muestras se colocaron en el horno durante 8 horas para extraer la humedad restante. Todas las muestras se pesaron con balanza electrónica, obteniéndose el contenido de humedad como:

$$w = \frac{P_{húmedo} - P_{seco}}{P_{seco}} \quad (4)$$

Las muestras fueron irradiadas de la forma descrita anteriormente, y los valores de difusividad térmica se obtuvieron por el método de aproximación por cuadrados mínimos.

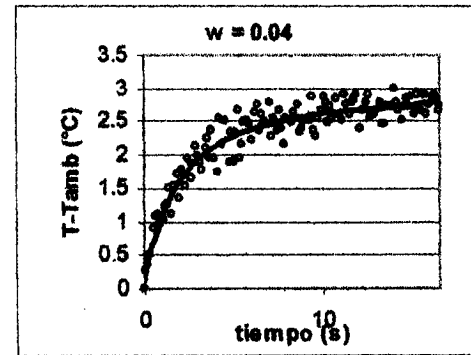
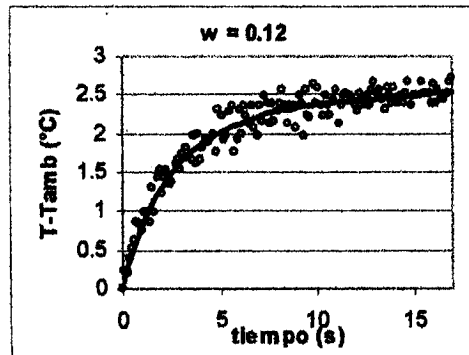
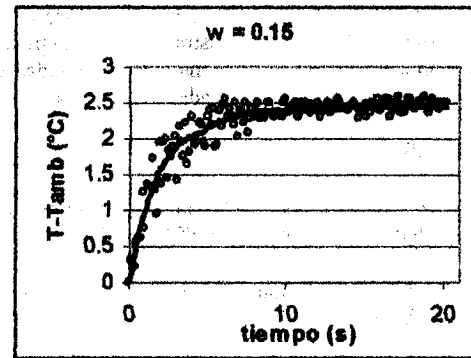
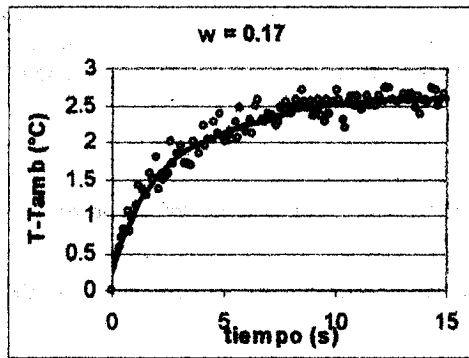
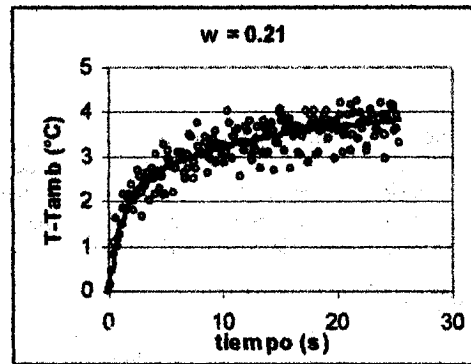
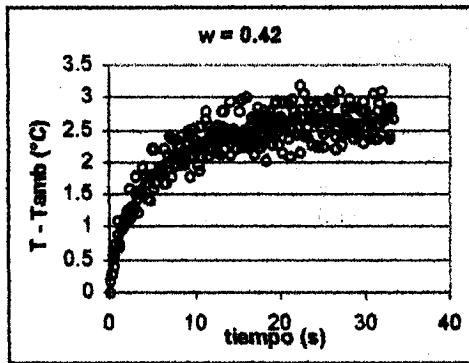
## Resultados experimentales

Los valores medidos del peso, tiempo de secado, contenido de humedad y difusividad térmica resultantes para cada una de las muestras están presentados en la siguiente tabla:

Nº Muestra	Tiempo secado (h)	P <sub>húmedo</sub> (g)	P <sub>seco</sub> (g)	W	$\alpha$
1	30'	21.20	14.90	0.42	$2,13 \cdot 10^{-7}$
2	1 h	18.23	15.05	0.21	$3,21 \cdot 10^{-7}$
3	1 h 50'	17.65	15.10	0.17	$3,40 \cdot 10^{-7}$
4	2 h 10'	15.65	13.65	0.15	$4,48 \cdot 10^{-7}$
5	2 h 50'	14.55	12.98	0.12	$2,90 \cdot 10^{-7}$
6	4 h 50'	17.58	16.87	0.04	$4,95 \cdot 10^{-8}$

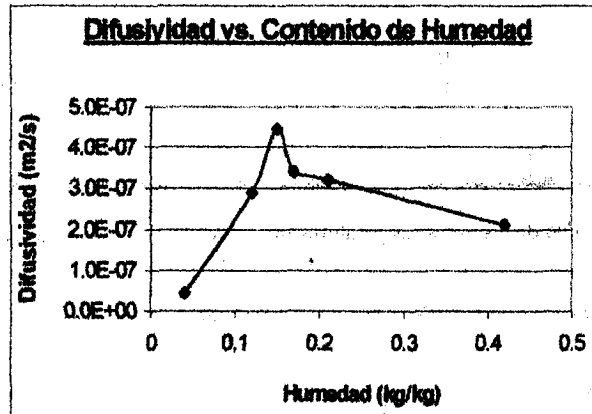
Tabla 1 : humedad de las muestras y valores medidos de las difusividades térmicas

Los datos experimentales y las curvas ajustadas pueden verse en las siguientes figuras:



Se observa que el aumento de temperatura no supera los 4°C que, en la mayoría de los casos, es menor que las propias variaciones ambientales que sufre la muestra a lo largo del año.

Para observar la variación de la difusividad térmica con el contenido de humedad se graficó  $\alpha$  vs.  $w$ , obteniéndose lo siguiente:



Se observa que al principio la difusividad térmica sufre un fuerte incremento con el contenido de humedad, llegando a un pico máximo en alrededor del 15% de humedad, y decrece más lentamente al pasar este pico. Debido a que la conductividad térmica y la densidad aumentan con el contenido de humedad, se puede concluir que la adición de agua incrementa la conductividad térmica relativamente más que a la capacidad calorífica si la humedad es menor del 15%, y lo contrario es cierto para una adición posterior de agua en el sólido.

## CONCLUSIONES

El método descripto permite determinar la difusividad térmica de un material mediante un ensayo no destructivo, debido a que la variación de temperatura que sufre la muestra durante la medición no la daña ni altera en ningún sentido. Además, el método puede ser utilizado in situ y/o para muestras en lugares de difícil acceso. La variación de la difusividad térmica con el contenido de humedad (de alrededor del 900% entre los casos extremos) permite inferir que es un buen parámetro para indicar esta variación cuando las muestras son muy higroscópicas. El comportamiento de otros materiales diferentes del yeso será similar, aunque la variación máxima de la difusividad y la forma de alcanzar este máximo dependerán en gran medida de la higroscopicidad y compactidad de cada uno de ellos.

## REFERENCIAS

Hoyos D. et al., "Sistema de medición y procesamiento de temperatura usando un termógrafo", Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol.1 N°2, pp.21-23, 1997.

Grinzato E. Et al., "Evaluation of moisture content in porous material by dynamic energy balance", SPIE Vol. 1682, Thermosense XIV, Italia, 1992.

Carlslaw J. Et al., "Conduction of Heat in Solids", Oxford University Press, Inglaterra, 1959.