

ESTUDIO FOTOACÚSTICO DE LOS PROCESOS DE MOJADO Y DE EVAPORACIÓN DE UN LIQUIDO EN UN MEDIO POROSO

R. Bernal¹, F. J. Espinoza-Beltrán^{†2,3}, R. Ramírez-Bon², and S. Sekerj-Zenkovitch⁴

¹ Programa de Posgrado en Física de Materiales del CICESE,
Km 107, carretera Tijuana-Ensenada, Ensenada B. C., México.

² Centro de Investigación en Física de la Universidad de Sonora,
Apdo. Postal 5-88, 83190 Hermosillo, Sonora, México.

³ Laboratorio de Investigación en Materiales del CINVESTAV,
Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Química,
Centro Universitario Cerro de las Campanas S/N, 76010 Querétaro, Qro., México.

⁴ Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences,
101 Vernadsky Ave., Moscow 117526, Russia

Resumen

En este trabajo utilizamos la técnica fotoacústica para estudiar los procesos de difusión y posterior evaporación de un líquido (alcohol isopropílico) en un medio poroso (cartón de papel convencional). Encontramos que la amplitud de la señal fotoacústica es bastante sensible a los cambios de las propiedades térmicas del composito medio poroso - aire - líquido. Se trabaja en condiciones tales que la muestra se considera térmicamente gruesa y ópticamente opaca, de manera que a partir de la señal fotoacústica se obtiene directamente la efusividad térmica del material como función del tiempo. Proponemos un modelo sencillo de dos capas para describir el cambio de la efusividad térmica efectiva del composito a medida que cambia la proporción de líquido en el medio poroso. A partir de los parámetros térmicos de los componentes del composito calculamos el valor de la porosidad del material.

Abstract

In this work we use the photoacoustic technique to study the diffusion and evaporation processes of a liquid (isopropilic alcohol) in a porous media (cardboard). We found that amplitude of photoacoustic signal is very sensitive to changes in thermal properties of the porous media - air - isopropilic alcohol composite. The sample is thermally thick and optically opaque so that we can obtain directly the thermal effusivity of it as a function of time from the photoacoustic signal. To depict the changes of the effective thermal effusivity during the change of liquid proportion in the composite we proposed a simple model of a system of two layers. By using the thermal parameters of the composite we calculated the porosity of the material.

Introducción

Durante las dos últimas décadas la técnica fotoacústica (TFA) se ha convertido en una herramienta de gran utilidad para la investigación de propiedades ópticas y térmicas de materiales, tanto líquidos como sólidos y gases [1]. Así mismo, esta técnica ha probado ser útil para el monitoreo de procesos de transición de fase y en el estudio del comportamiento de las propiedades térmicas de materiales como función de algún parámetro físico como el tiempo, la temperatura, el campo eléctrico, etc. [2-4]. El efecto fotoacústico, fenómeno fundamental de la técnica fotoacústica, detecta

directamente el calor generado en la muestra debido a los procesos de decaimiento no-radiativos posteriores a la excitación con luz. En un arreglo convencional, la muestra se coloca dentro de una celda cerrada y sellada herméticamente. Un haz de luz modulada por un modulador óptico ("chopper") incide sobre la muestra a través de una ventana transparente de la celda. La absorción periódica de la luz por la muestra produce un calentamiento periódico del aire contenido por la celda generando fluctuaciones de la presión a la misma frecuencia que el modulador óptico. Un micrófono en contacto con el aire de la celda detecta estas oscilaciones de la presión como una señal fotoacústica. El

[†] e-mail: fespino@spin.cifus.uson.mx

calentamiento por el haz incidente depende del coeficiente de absorción óptica de la muestra, y también de como este calor se difunde a través de la misma. Esto permite que a partir de la medición de la señal fotoacústica puedan obtenerse tanto espectros de absorción óptica como valores de propiedades térmicas de la muestra. En particular, si en la muestra ocurre algún proceso que lleve como resultado al cambio de sus propiedades térmicas en el tiempo, este proceso deberá ser detectado como cambios en la señal fotoacústica. Recientemente la TFA ha sido utilizada para estudiar fenómenos transientes tales como la evaporación y contracción simultánea de una gota de líquido que moja una superficie [4], o mediciones de permeabilidad en muestras de diferentes maderas [5]. Usando la TFA es posible obtener la medición simultánea de algunos parámetros térmicos como calor específico y conductividad térmica durante una transición de fase, cuando la muestra cumple con las condiciones de térmicamente gruesa y ópticamente opaca [3]. En este trabajo estamos interesados en estudiar con la TFA los procesos de mojado y posterior evaporación de un líquido en un medio poroso. Se trabaja en condiciones experimentales tales que se garantiza que la luz incidente es completamente absorbida en la superficie de la muestra (muestra opaca), y con espesores de muestra varias veces mayor que la longitud de difusión térmica del material (muestra térmicamente gruesa), lo que nos permite obtener mediciones de la difusividad térmica efectiva del composito medio poroso - aire - líquido durante los procesos de mojado y evaporación. Como medio poroso usamos cartón de papel, y como líquido alcohol isopropílico. Proponemos, como una aproximación a las propiedades térmicas del medio poroso, un modelo teórico sencillo de medio efectivo donde consideramos al sistema formado por dos capas, una de cartón seco y otra de cartón mojado con espesores variables en el tiempo. Asumimos que los valores de las propiedades térmicas efectivas en función del tiempo obtenidas por el modelo son válidos en todos los puntos de la muestra.

Desarrollo Experimental

El arreglo experimental utilizado en este trabajo se presenta en la figura 1.a. La muestra se coloca en la abertura superior de la celda fotoacústica. La otra abertura esta cerrada por una ventana de cuarzo. La muestra se calienta con una fuente de luz monocromática de un láser de HeNe (632 nm) de 30 mW de potencia (Melles Griot modelo 05-LMR-981). Un micrófono de alta sensibilidad (ACO Pacific Inc., modelo MK224) está en contacto con la celda por medio de un conducto de 1.0 mm de diámetro y 3.0 cm de longitud. La señal eléctrica del micrófono se dirige a un amplificador lock-in (Stanford Research modelo SR530), el cual limpia y

amplifica la señal y permite obtener la amplitud y la fase de la señal fotoacústica a intervalos de tiempo prefijados. El amplificador lock-in es controlado por una computadora personal lo que permite controlar los

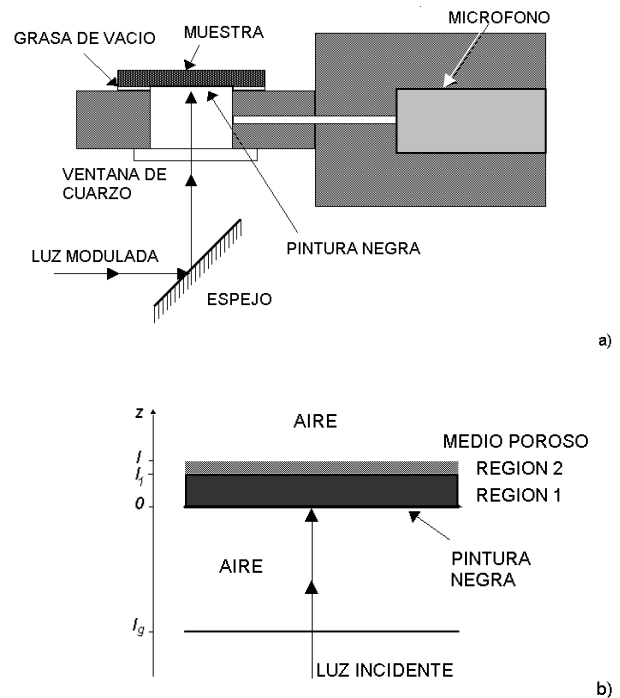


Fig. 1. a) Arreglo esquemático del sistema experimental utilizado en las mediciones. La muestra ocupa una de las aberturas de la celda fotoacústica. b) Diagrama esquemático unidimensional al que aplicamos el modelo de Rosencwaig y Gersho. El composito medio poroso - líquido - aire se modela como un sistema de dos capas, una capa con las cavidades completamente ocupadas por el líquido (capa mojada o región 1), y otra capa con aire en las cavidades (capa seca o región 2). La capa de pintura negra se asume de un espesor muy pequeño, de manera que se desprecia.

parámetros de éste y capturar y graficar los datos de amplitud y de la fase de la señal fotoacústica en función del tiempo.

Las muestras utilizadas fueron trozos cuadrados de cartón de papel comercial de $2.0 \times 2.0 \text{ cm}^2$ de área y aproximadamente $560 \mu\text{m}$ de espesor. Uno de las caras de la lámina de cartón tiene una película de esmalte color negro de un espesor menor a $10 \mu\text{m}$. La muestra de cartón se coloca en la abertura superior de la celda fotoacústica (ver figura 1) de manera tal que la cara pintada quede hacia el interior. Esta película negra permite sellar una de las superficies del material poroso, además de asegurar que la luz de láser que incide sobre la muestra sea casi completamente absorbida en esa superficie. Para que la muestra selle la celda se utiliza grasa de vacío como adherente, además de un opresor de aluminio con una abertura similar a la de la celda, el cual

se atornilla a ésta. Una vez colocada la muestra, se dirige el haz de luz modulado hacia la cara oscura de la muestra por medio de un espejo cóncavo sobre un círculo de un diámetro de aproximadamente 5 mm. Esto permite considerar a la muestra como un sistema unidimensional en la dirección perpendicular a sus superficies. La frecuencia de modulación con que se trabajó fue de 40 Hz. Las cantidades de líquido que se colocaron sobre el medio poroso fueron medidas con una micropipeta con una precisión de 10^{-3} ml. Una cantidad de 1.0×10^{-3} ml de líquido se coloca en forma de gota sobre la superficie superior de la muestra porosa. El líquido es rápidamente absorbido por el medio poroso, manifestándose como una caída brusca de la amplitud de la señal fotoacústica.

Resultados y Discusión

La figura 2.a muestra el cambio de la señal fotoacústica como función del tiempo. Este comportamiento puede dividirse en cuatro regiones importantes. La primera región corresponde a la muestra seca, donde la señal fotoacústica es constante. Esta región sirve como referencia, ya que su valor está determinado por las propiedades térmicas de la muestra de cartón seco. La segunda región, que muestra una rápida caída de la señal fotoacústica, corresponde al proceso de mojado del medio poroso. El líquido (alcohol isopropílico) se difunde rápidamente al cartón llenando sus cavidades. Los valores de las propiedades térmicas efectivas del compuesto cartón - alcohol - aire se modifican de manera tal que llevan a una reducción de la señal fotoacústica. La tercera región inicia con la evaporación del líquido libre (es decir, el líquido cuya fuerza de unión con las paredes de las cavidades es débil), y lleva a un aumento de la señal fotoacústica que tiende al valor correspondiente al de la muestra seca. En este proceso el líquido ubicado en las cavidades del medio poroso se evapora gradualmente. El alcohol ubicado en los poros cercanos a la superficie superior de la muestra es el que se evapora primero, generando un gradiente de concentración de líquido, lo que lleva a que parte del líquido de las cavidades inferiores suba por capilaridad. Estos procesos simultáneos de evaporación y de difusión de alcohol definen un perfil de distribución del líquido a lo ancho de la muestra, de manera que la menor cantidad de alcohol se encuentra cerca de la superficie superior, y la mayor en la inferior. En esta región la señal fotoacústica no alcanza el valor inicial del cartón seco, debido a que una pequeña parte del líquido queda ligado al cartón. La evaporación del líquido ligado es la que se observa en la última región, la región cuatro. En la figura 2.a se hicieron ajustes a los datos experimentales con funciones exponenciales, con el fin de obtener una estimación de los tiempos característicos de cada uno de los procesos que se suceden durante el mojado y secado del material poroso. Las líneas sólidas mostradas

corresponden a cada uno de los ajustes, y los tiempos correspondientes son mostrados en la figura. Los valores de estos tiempos son: 7.9, 62.8 y 61.8 s, para los

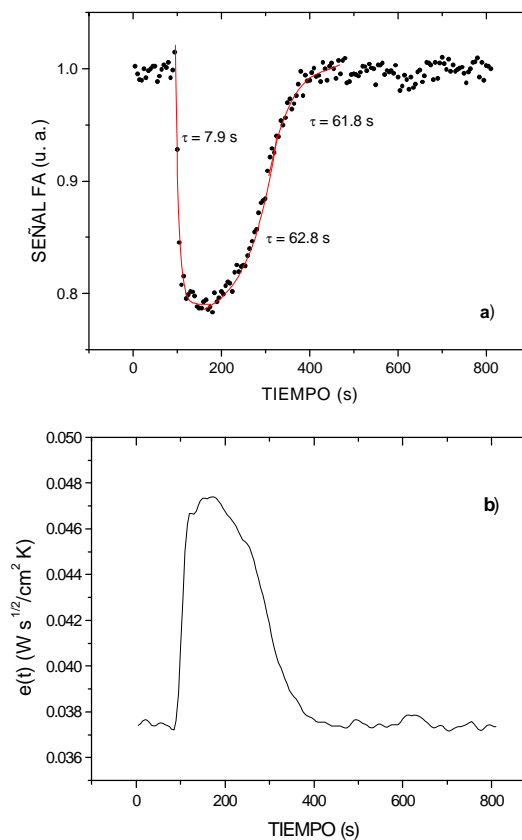


Fig. 2. a) Gráfica de la amplitud de la señal fotoacústica en función del tiempo. La amplitud está normalizada al valor de la muestra seca. Los ajustes corresponden a comportamientos exponenciales que dan como resultados los tiempos característicos de cada uno de los procesos: 7.9 s (mojado), 62.8 s (evaporación del líquido libre), y 61.8 s (evaporación de líquido ligado). b) Gráfica de la efusividad térmica efectiva en función del tiempo obtenida a partir de los datos experimentales de la amplitud de la señal fotoacústica

procesos de mojado, evaporación de líquido libre, y evaporación de líquido ligado, respectivamente.

Consideraremos el diagrama esquemático mostrado en la figura 1.b, el cual describe la situación física de nuestro experimento, y aplicaremos el modelo de Rosencwaig y Gersho [6]. Los valores utilizados de las propiedades térmicas de la muestra son todos valores efectivos obtenidos por el modelo que se describe más adelante. La muestra está en contacto con aire en ambas superficies es iluminada por un haz de luz monocromática modulada periódicamente con intensidad $I(t) = I_0 \exp(i\omega t)$, con $\omega = 2\pi f$, y f es la frecuencia de modulación medida en unidades de Hz. En tal configuración, la amplitud de oscilación de la

temperatura compleja detectada para una muestra ópticamente opaca es dada por [6]

$$q = \frac{bI_0}{2\sqrt{pf}e_s(1+i)} \frac{e^{l_s s_s} + e^{-l_s s_s}}{e^{l_s s_s} - e^{-l_s s_s}}, \quad (1)$$

donde b es el coeficiente de absorción óptica de la superficie interna de la muestra, I_0 es la amplitud del haz de luz incidente, $e = \sqrt{rc/k}$ es la efusividad térmica de la muestra, l es el espesor total de la muestra, $s = (1+i)a_s$, $a_s = \frac{1}{m} = \sqrt{\frac{pf}{a}} = \sqrt{\frac{pfrc}{k}}$ el coeficiente de difusión térmica. Los parámetros, m , k , r , y c son, respectivamente, la longitud de difusión térmica, la conductividad térmica, la densidad, y el calor específico de la muestra. La señal fotoacústica, que es producida por el efecto pistón de una delgada capa de aire en contacto con la muestra que es calentada periódicamente, es proporcional a la oscilación de la temperatura y puede ser detectada por un micrófono.

En la ecuación (1) hemos asumido que la superficie de la muestra es ópticamente opaca y que el flujo de calor hacia el aire de los alrededores es despreciable. Si asumimos también que la muestra es térmicamente gruesa (que sucede cuando $l \gg m$), lo cual se garantiza para una muestra de cartón con espesor mayor de 560 μm y trabajando con una frecuencia de modulación de 40 Hz, la ecuación (1) se reduce a la expresión

$$q = \frac{bI_0}{2\sqrt{pf}e_s(1+i)} \quad (2)$$

Esto muestra que para una muestra térmicamente gruesa y ópticamente opaca la señal fotoacústica de la muestra es función de su efusividad térmica. Este resultado puede ser utilizado ventajosamente para el seguimiento de procesos físicos que involucren cambios en la efusividad térmica de la muestra, por ejemplo, para monitoriar el mojado y el posterior secado de una muestra porosa. De acuerdo con la ecuación (2), podemos obtener, del comportamiento con el tiempo de la señal fotoacústica, la evolución con el tiempo de la efusividad térmica del material como se muestra en la figura 2.b, donde a partir de los datos experimentales de la amplitud de la señal fotoacústica en función del tiempo, y del conocimiento previo del valor de la efusividad térmica del cartón seco, hemos calculado la efusividad térmica efectiva del material en función del tiempo.

Con el propósito de obtener los valores efectivos de las propiedades térmicas del composito medio poroso - aire - líquido, en términos de los valores de las propiedades térmicas del cartón seco, del aire y del líquido, hemos desarrollado un modelo teórico de medio efectivo sencillo. En este modelo asumimos que la muestra es una capa plana de espesor l , formada a su vez

de dos capas; una capa mojada de espesor l_1 , donde todas las cavidades de sus poros están llenas del líquido con propiedades térmicas k_1 , r_1 , y c_1 , y otra capa seca de espesor l_2 (tal que $l_1 + l_2 = l$) donde las cavidades están llenas de aire con propiedades térmicas k_2 , r_2 , y c_2 . Durante el proceso de mojado, que experimentalmente se realiza colocando una gota del líquido en la superficie superior del medio poroso, se define una capa mojada cuyo espesor l_1 varía de 0 a l . Al alcanzar el valor máximo ($l_1 = l$), las cavidades de la muestra están completamente llenas de líquido. Posteriormente, debido a la evaporación del líquido, el espesor de la capa mojada disminuye hasta que la muestra queda completamente seca. Trabajando de manera similar al modelo de dos capas desarrollado por A. M. Manzanares et. al. [7], asumimos una resistencia térmica efectiva, R , y una conductividad térmica efectiva, k , del sistema de dos capas de la forma

$$R = \frac{l}{k} = R_1 + R_2 = \frac{l_1}{k_1} + \frac{l_2}{k_2} \quad (3)$$

$$k = \frac{k_1 k_2}{x k_2 + (1-x) k_1} \quad (4)$$

R_j y k_j son, respectivamente, la resistencia la conductividad térmica de la capa j , y $x = l_1/l$ es la fracción del espesor l que corresponde a la capa mojada. Por otro lado, la capacidad calorífica efectiva de la muestra, rcV , es de la forma

$$rcV = r_1 c_1 V_1 + r_2 c_2 V_2 \quad (5)$$

considerando que ambas capas tienen la misma sección transversal, A , tal que $V = A l$, obtenemos

$$rc = r_1 c_1 x + r_2 c_2 (1-x) \quad (6)$$

Entonces, la efusividad térmica efectiva puede ser expresada de la siguiente manera

$$e(x) = \sqrt{krc} = e_2 \sqrt{\frac{I dx + I(1-x)}{I(1-x) + x}} \quad (7)$$

donde $e_2 = \sqrt{k_2 r_2 c_2}$ es la efusividad de la muestra seca, $I = k_1/k_2$, y $d = r_1 c_1/r_2 c_2$. De acuerdo a la ecuación (7), cuando el líquido satura las cavidades del medio poroso, $x = l$, la efusividad toma el valor de $e = e_2 \sqrt{I d}$. Como la efusividad del alcohol isopropílico es mayor que la del aire, la función $e(x)$ alcanza su máximo valor cuando $x = l$.

Las propiedades térmicas de cada medio, ya sean de la capa seca o de la mojada, son a su vez propiedades

térmicas efectivas. Sus valores dependen de la porosidad f del material, de manera que una fracción f del volumen de la capa seca (mojada) es ocupada por el aire (líquido), y el resto $(1-f)$ es el volumen ocupado por el sólido rígido del material poroso. Podemos expresar la conductividad térmica de la capa mojada, k_1 , en términos de la conductividad de la capa seca, k_2 , de manera que obtenemos una expresión para I de la forma

$$I = \frac{k_1}{k_2} = 1 + \frac{(k_{\text{liquido}} - k_{\text{aire}})}{k_2} f \quad (8)$$

de manera similar, para la razón de capacidades caloríficas entre los dos medios, d , tenemos

$$d = \frac{r_1 c_1}{r_2 c_2} = 1 + \frac{(r c_{\text{liquido}} - r c_{\text{aire}})}{r_2 c_2} f \quad (9)$$

Estas dos últimas expresiones muestran como la efusividad térmica efectiva, ecuación (7), depende de la porosidad f de la muestra. Haciendo uso de estas expresiones y de resultados experimentales donde se mide el cambio de efusividad térmica efectiva es posible obtener una medida de la porosidad f del material. La efusividad térmica efectiva relativa a e_2 para el caso completamente mojado (cuando $x = l$) es

$$\frac{e(x=l)}{e_2} = \frac{e_1}{e_2} = \sqrt{Id} = \sqrt{1 + (a+b)f + abf^2} \quad (10)$$

donde $a = \frac{(k_{\text{liquido}} - k_{\text{aire}})}{k_2}$, y $b = \frac{(r c_{\text{liquido}} - r c_{\text{aire}})}{r_2 c_2}$.

Despejando f de la expresión (10) obtenemos

$$f = -\frac{a+b}{2ab} \pm \sqrt{\left(\frac{a+b}{2ab}\right)^2 - \frac{1}{ab} \left(1 - \left(\frac{e_1}{e_2}\right)^2\right)} \quad (11)$$

Esta es, si conocemos los parámetros térmicos del líquido, del gas y del cartón seco, es posible calcular la porosidad del material usando la ecuación (11). A partir de la figura 2.b, de donde se puede obtener el valor relativo de la efusividad del cartón completamente mojado, $e(x=l)/e_2 = 1.27 \pm 0.02$, y tomando de la literatura

[4] los parámetros del alcohol isopropílico ($k_{\text{liquido}} = 1.4$ mW/cm K y $r c_{\text{liquido}} = 1.96$ J/cm³ K), del aire ($k_{\text{aire}} = 0.2588$ mW/cm K y $r c_{\text{aire}} = 0.0012$ J/cm³ K), y del cartón seco ($k_{cs} = 0.001$ mW/cm K y $r c_{cs} = 1.396$ J/cm³ K), obtuvimos la porosidad del cartón como: $f = 0.213 \pm 0.003$.

El espesor de la muestra, que debe ser mucho mayor que la longitud de difusión térmica tanto del cartón seco como del cartón mojado (aproximadamente 24 μ m a 40

Hz en ambos casos) para cumplir la condición fotoacústica de muestra térmicamente gruesa, debe ser lo suficientemente delgado tal que asegure que la diferencia de concentraciones de líquido entre ambas superficies del cartón sea pequeña en todo tiempo. Esto último con el fin de que los valores de las propiedades térmicas efectivas sean una buena aproximación en cada punto de la muestra. Experimentalmente se observa que la capilaridad del cartón, cuando se usa alcohol isopropílico como líquido, permite que el líquido ascienda varios milímetros por las cavidades del medio poroso. De manera que para espesores de muestra menores a 1 mm la distribución del líquido en la dirección vertical es aproximadamente uniforme en todo momento. Esto evidentemente muestra que el modelo de medio efectivo de dos capas propuesto se utiliza solo para dar una estimación de los valores de las propiedades térmicas efectivas del composito, no para describir la dinámica de mojado y secado del medio poroso. El espesor de sensibilidad de la técnica fotoacústica es de solo unos 150 μ m ($\sim 2\pi\mu$), medido desde la superficie inferior hacia el interior de la muestra, esto es, solo de una cuarta parte de su espesor total. La capilaridad del medio poroso provoca que, desde que se inicia la evaporación del líquido en la superficie superior de la muestra, el líquido de las cavidades de la región fotoacústicamente sensible se difunda hacia la parte superior de la muestra tendiendo a una distribución del líquido aproximadamente uniforme a todo lo ancho de la muestra. De manera similar sucede durante el proceso de mojado, donde el líquido se difunde a todas las cavidades del cartón. Por esta razón, en todo momento la técnica fotoacústica es sensible a los procesos de mojado y evaporación del medio poroso.

Con el fin de obtener una mediada alternativa al valor de la porosidad del cartón, se realizó un experimento sencillo. Este consintió en medir la masa de trozos de cartón secos y completamente mojados (tomando la precaución, para el cartón mojado, de permitir la completa difusión del líquido en todas las cavidades y de eliminar el exceso de líquido de las superficies). Las medidas de masa se realizaron en una balanza analítica con una precisión de 0.0001 g. El cálculo de la porosidad se hizo usando la siguiente formula:

$$f = \frac{m_{cm} - m_{cs}}{m_{cm}} \quad (12)$$

donde m_{cs} y m_{cm} son las masas de cartón seco y mojado, respectivamente. El valor de porosidad obtenido fue $\phi = 0.214 \pm 0.009$. Podemos ver que los valores de la porosidad obtenidos por ambas técnicas son muy próximos, lo cual indica también que el modelo de medio efectivo de dos capas aplicado para la obtención de la efusividad térmica efectiva es adecuado.

En la figura 3 se muestra la gráfica de la efusividad térmica efectiva teórica a partir de la ecuación (7) para

los parámetros térmicos correspondientes a alcohol isopropílico ($k_{\text{liquido}} = 1.4 \text{ mW/cm K}$ y $r_{\text{liquido}} = 1.96 \text{ J/cm}^3 \text{ K}$) como líquido, aire ($k_{\text{aire}} = 0.2588 \text{ mW/cm K}$ y $r_{\text{aire}} = 0.0012 \text{ J/cm}^3 \text{ K}$), y proponemos los valores para el sólido rígido del medio poroso $k_{\text{sol}} = 1.18 \text{ mW/cm K}$ y $r_{\text{sol}} = 1.7381 \text{ J/cm}^3 \text{ K}$. La porosidad f toma los

donde se tomaron los valores $a_1 = 8$, $a_2 = 30$ y $t_0 = 200$, para todos los casos.

Conclusiones

Hemos aplicado la técnica fotoacústica para estudiar los procesos de mojado y secado de un medio poroso en función del tiempo. Encontramos que la técnica permite seguir la evolución de la efusividad térmica efectiva del material. Propusimos un modelo sencillo de dos capas para describir el efecto de los procesos de mojado y secado, y calcular la efusividad térmica efectiva del compuesto en términos de las propiedades térmicas de sus componentes. El modelo obtenido nos permitió obtener un valor para la porosidad del medio poroso. Se propuso un experimento adicional para obtener un valor de la porosidad del material alternativo, el cual es prácticamente el mismo que se obtiene por la medida fotoacústica.

Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente apoyado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) de México por medio una cátedra patrimonial otorgada al Dr. *Sekerj-Zenkovitch* y por el del proyecto de investigación no. 3874P-E9607.

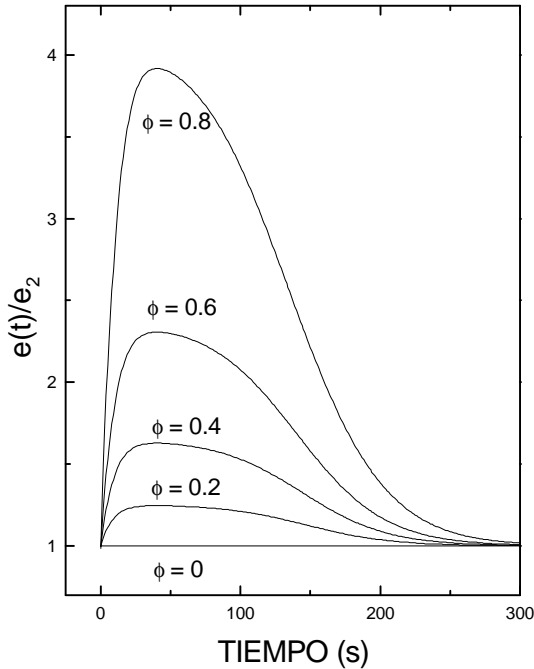


Fig. 3. Gráfica de la efusividad térmica efectiva teórica a partir de la ecuación (7) obtenida para varios valores de porosidad f : 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 0.99. Para los cálculos se utilizaron los parámetros conocidos del alcohol isopropílico, del aire, y se propusieron los siguientes valores para el sólido rígido del medio poroso: $k_{\text{sol}} = 1.18 \text{ mW/cm K}$ y $r_{\text{sol}} = 1.7381 \text{ J/cm}^3 \text{ K}$.

siguientes valores: 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 0.99. Se propuso una función arbitraria $x(t)$, que permite reproducir el comportamiento experimental observado, de la forma

$$x(t) = -e^{-\frac{t}{a_1}} + \left(1 + e^{-\frac{t-t_0}{a_2}} \right)^{-1} \quad (12)$$

REFERENCIAS

- [1] Rosencwaig, A., *Photoacoustic and Photoacoustic Spectroscopy* (John Wiley & Sons, New York, 1980).
- [2] Zamit, M. Marinelli, R. Piezoferrato, F. Scudieri, S. Martellucci, *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **21**, 935 (1988).
- [3] Gloreaux, J. Thoen, G. Bednarz, M. A. White, And D. J. W. Geldart, *Phys. Rev.* **B 52**, 12770 (1995).
- [4] C. M. Miranda and N. Cella, *Phys. Rev.* **B 47**, 3896 (1993).
- [5] J. A. Balderas-López, S. A. Tomás, H. Vargas, V. Olalde-Portugal, R. Baquero, I. Delgadillo, J. M. Yáñez-Limón, J. J. Alvarado-Gil, J. Frías-Hernández, Leia Sheinvar, C. Falcony, M. D. Silva y L. C. M. Miranda. *Forest Prod. J.* **46**, 84 (1996).
- [6] A. Rosencwaig y A. Gersho, *J. Appl. Phys.* **47**, 64 (1976).
- [7] A. M. Manzanares, A. C. Bento, H. Vargas, N. F. Leite, y L. M. C. Miranda, *Phys. Rev.* **B 42**, 4477 (1990).