Método del "Pulso Láser" para la medida de la difusividad térmica en materiales cerámicos

E. GARCÍA, R. MARTÍNEZ, M. I. OSENDI, P. MIRANZO

Instituto de Cerámica y Vidrio, CSIC. 28500 Arganda del Rey, Madrid

Entre las distintas técnicas de medida de la conductividad/difusividad térmica de materiales, destaca la técnica del pulso láser por la rapidez de medida de la difusividad térmica y la facilidad de preparación de las muestras. Sin embargo, cuando se mide la difusividad térmica en materiales porosos, aparecen problemas relacionados con la transmisión del haz láser y la subestimación del espesor de la muestra. En este trabajo, se propone un método para evitar estos problemas que consiste en formar un sistema tricapa Cu/material poroso/Cu. Este método se ha verificado experimentalmente utilizando materiales de alúmina densa y porosa. Los valores experimentales para la alúmina porosa se han explicado a partir de modelos que estiman la conductividad térmica efectiva de un material poroso en función de la conductividad del material denso, la porosidad y el tipo de microestructura.

Palabras Clave: Difusividad térmica, conductividad térmica, cerámicas porosas.

Thermal diffusivity in ceramics by laser flash method

Among the several techniques available to measure the thermal conductivity/ diffusivity, the laser flash method stands out for its low run time (less than 1 hour per temperature) and the reduced sample size required. Nevertheless, the laser flash technique is not very accurate for porous materials due to laser transmission problems and the underestimation of the total sample thickness. The attaching to the porous sample of two thin foils of an opaque and high diffusivity material (Cu) can solve these problems. This type of assembly was used to measure diffusivity in a porous alumina material. Data obtained are compared with theoretical models, which predict effective thermal conductivity of the porous material from the thermal conductivity of the dense material, the amount of porosity and the type of microstructure.

Keywords: Thermal diffusivity, Thermal conductivity, porous ceramic materials.

1. INTRODUCCIÓN

En la mayoría de las aplicaciones industriales, los materiales cerámicos están sometidos a gradientes térmicos que originan tensiones residuales y degradan su resistencia mecánica. Estos gradientes térmicos dependen de la difusividad y de la conductividad térmica del material y, por ello, es fundamental conocer dichos parámetros y su variación con la temperatura. Existen varios métodos de medida (1) dependiendo del tipo de material y del rango de difusividad o conductividad. En general, se pueden agrupar en dos clases: aquellos que miden la difusividad ("pulso láser") y los que miden directamente la conductividad ("hilo caliente", "panel", "placa caliente", "comparativo"...). Algunos métodos son dinámicos como el "pulso láser" y el método del "hilo caliente", en los que el gradiente de temperatura en la muestra varía con el tiempo, mientras que otros son métodos estacionarios y calculan la conductividad cuando el sistema se encuentra en equilibrio térmico.

Las características de los métodos comúnmente usados para medir la conductividad de materiales cerámicos se resumen en la Tabla I. Entre todos ellos, destaca el método del pulso láser por varias razones tales como la rapidez (1 h para cada temperatura), el amplio intervalo de temperaturas de medida (entre 20 y 2000 °C), el extenso rango de difusividades

TABLA I. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS DISTINTOS MÉTODOS DE MEDIDA DE DIFUSIVIDAD Y CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.

	PULSO LASER	HILO CALIENTE	PANEL	PLATO CALIENTE	COMPARATIVO
PRECISIÓN	$\alpha: \pm 5$ $\lambda: \pm 10$	$\pm 2,5$	± 2	± 4	$\pm 3-5$
PROBETAS	1 (representativa) $\varnothing=1,27\text{cm}, e=0,1\text{cm}$	2 (mecanizado) ladrillos $23 \times 11 \times 6,4\text{cm}^3$	3-6 ladrillos $23 \times 11 \times 6,4\text{cm}^3$	2 $\varnothing=20-25\text{cm}$ $e=5\text{cm}$	1 (mecanizado) $5 \times 2,5 \times 1,5\text{cm}^3$
RAPIDEZ (h/temp.)	1	6	24-48	24-48	12
RANGO λ (w/M ² K)	α $10^{-2}-10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$	0,02-14,4	<30	0,009-3,5	>0,6
RANGO T (°C)	20-2200	1500	1500	1500	1000
CONSUMO (KW/H)		30	250		25

que abarca, lo cual permite medir materiales poliméricos, metálicos y cerámicos, y finalmente, el pequeño tamaño y la facilidad de preparación de las muestras. Aunque estas características hacen que la técnica del pulso láser sea muy atractiva, el método presenta limitaciones en el caso de materiales con microestructuras groseras y/o con elevada porosidad (2,3). En concreto, para materiales porosos, los errores de medida aumentan debido a la transmisión directa del haz y al error en la determinación del espesor real de la probeta.

El objetivo de este trabajo es el diseño y evaluación de un método que permita aplicar la técnica del pulso láser para la determinación de la difusividad de materiales porosos. Dado que la técnica del pulso láser es relativamente poco conocida, se dará un abreviado descripción de la misma y de los modelos teóricos en que se basa para calcular la difusividad térmica. A continuación, se abordará el problema particular de la medida de este parámetro en muestras porosas de alúmina. Los resultados obtenidos se compararán con las predicciones teóricas recogidas de la literatura, que estiman la conductividad térmica de materiales porosos en función del porcentaje de porosidad.

2. DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA DEL PULSO LÁSER

En este método se utilizan muestras planoparalelas, generalmente de forma cilíndrica, con diámetros entorno a 10 mm y espesores entre 1 y 3 mm. Hay que tener en cuenta que cuanto menor sea la conductividad de la muestra, menor deberá ser su espesor, para que la medida sea válida (relación señal/ruido aceptable y bajas pérdidas de calor laterales). En la Figura 1 se representa un esquema general de esta técnica. Una de las caras de la muestra se calienta de forma homogénea haciendo incidir un pulso láser, el calor absorbido en la superficie se transmite a través de la muestra y se produce un incremento de temperatura en la cara opuesta. Este incremento se recoge en función del tiempo mediante un detector de infrarrojos, situado en la línea de transmisión de calor. El portamuestras está situado dentro de un horno tubular, lo que permite obtener la difusividad a distintas temperaturas. La precisión de la medida de difusividad es del 5%.

La señal de temperatura registrada se procesa usando distintos modelos matemáticos que solucionan la ecuación diferencial para la conducción del calor en régimen transitorio:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

donde "T" es la temperatura en °C, medida en la posición "x" (cm) y en un tiempo "t" (s) y "α" es la difusividad térmica del material, medida en cm²/s.

Carlslaw y Jaeger (4) resolvieron esta ecuación para el caso particular de un sólido de espesor "L", térmicamente aislado, sometido a una distribución de temperatura inicial "T(x,0)", obteniendo una distribución de temperatura en cualquier punto del sólido, dada por la ecuación:

$$T(x,t) = \frac{1}{L} \int_0^L T(x,0) dx + \frac{2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{n^2 \pi^2 \alpha t}{L^2}} \cos \frac{n\pi x}{L} \int_0^L T(x,0) \cos \frac{n\pi x}{L} dx \quad (2)$$

Si un pulso de energía radiante "Q" es instantánea y uniformemente absorbido en una pequeña lámina superficial de espesor "g", la distribución de temperatura en el instante t=0 esta dada por:

$$T(x,0) = 0, \quad g < x < L$$

$$T(x,0) = \frac{Q}{\rho C g}, \quad 0 < x < g \quad (3)$$

donde "ρ" es la densidad del material y "C" su calor específico.

Figura 1: Esquema general de la técnica de medida de la difusividad térmica por el método del pulso láser.

Asumiendo que "g" es muy pequeño, la distribución de temperatura en la cara posterior (x=L) para cualquier instante "t", viene dada por:

$$V(L,t) = \frac{T(L,t)}{T_{\max}} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n e^{-n^2 F} \quad (4)$$

donde $T_{\max} = Q/\rho C L$, $V(L,t)$ es un parámetro adimensional de temperatura y "F" se define como:

$$F = \frac{\pi^2 \alpha t}{L^2} \quad (5)$$

Parker y col. (5) representaron "V" en función de "F" y obtuvieron un valor para F de 1.38 cuando la temperatura alcanzaba la mitad de su valor máximo ($V=0.5$), denominando al tiempo que se tarda en alcanzar esa temperatura "t₅₀". Este tiempo es fácilmente medible y, a partir de la Ec. [5], se puede determinar la difusividad como:

$$\alpha = \frac{1.38 L^2}{\pi^2 t_{50}} \quad (6)$$

Conocida la difusividad, la conductividad térmica se calcula utilizando la expresión:

$$\lambda = \rho C_p \alpha \quad (7)$$

La Ec. [6] es válida solamente si se cumplen las siguientes condiciones: la muestra es homogénea, la conducción de calor es unidimensional, la anchura del pulso láser es muy pequeña comparada con el tiempo de medida "t₅₀" y la muestra está aislada adiabáticamente. Generalmente, existen pérdidas de calor radiales, por lo que la ecuación anterior deja de ser válida. Además, para materiales con elevada difusividad, la anchura del pulso láser puede dejar de ser despreciable frente a "t₅₀". Por ello, se han desarrollado distintos modelos teóricos que resuelven la ecuación de calor de forma analítica, considerando un término de pérdidas y una anchura finita del pulso láser, y obtienen expresiones distintas para la Ec.[6] (5-9). Algunos de estos modelos consideran el caso en que la conducción del calor es bidimensional (8,10). Recientemente, se han formulado soluciones basadas en métodos numéricos (11,12). A continuación se detallan someramente algunos de los modelos más significativos.

Figura 2: Ejemplo de la señal experimental temperatura-tiempo que se obtiene en con el método del pulso láser.

Parker y col. (5) fueron los primeros en considerar las pérdidas de calor, basándose en la solución de Carslaw y Jaeger (4). Para ello, resolvieron el problema con las condiciones de contorno adecuadas y obtuvieron curvas de corrección para el parámetro F , en las que este disminuía a medida que las pérdidas aumentaban.

Cowan (6), además de considerar un término de pérdidas en la ecuación del calor, supuso un pulso de excitación cuadrado. Con estas condiciones de contorno, obtuvo una solución analítica para la ecuación del calor y la comparó con los datos experimentales correspondientes a la parte de enfriamiento de la curva de la Figura 2, obteniendo un valor de F que se utiliza en la Ec. [5] para obtener la difusividad térmica.

Una solución similar fue desarrollada por Heckman (8), considerando tanto la curva de enfriamiento como la de calentamiento y un pulso de forma triangular. Heckman utilizó las funciones de Green para formular una solución unidimensional que permitía incluir la corrección para las pérdidas de calor en las caras de la probeta.

Posteriormente, Clark y Taylor (9) llegaron a una solución analítica de la ecuación del calor suponiendo un flujo bidimensional (longitudinal y radial), que compararon con los datos experimentales obtenidos en la zona de calentamiento de la curva $V(T,t)$ de la Figura 2. Las correcciones de las pérdidas de calor mejoraban los resultados de difusividad obtenidos por los autores anteriores (5-8). Este es el método más utilizado para el cálculo de la difusividad térmica ya que se aproxima más al caso real, pues considera el problema en dos dimensiones y pérdidas laterales de calor. El método de Cowan es recomendable cuando se trabaja con materiales de difusividad alta y espesor pequeño; en este caso, las pérdidas de calor radiales son despreciables y, sin embargo, la anchura del pulso láser se convierte en un parámetro importante que afecta a la zona inicial y a la zona de subida de la curva $V(T,t)$.

Koski (10) realizó un análisis numérico del problema en el que presentaba una generalización del trabajo de Heckman (8). Koski ajusta los valores experimentales a las expresiones analíticas de Cowan y Clark-Taylor mediante técnicas de mínimos cuadrados, obteniendo para cada una de estas aproximaciones un valor de difusividad térmica y del denominado factor de pérdidas de calor, relacionado con la emisividad y la conductividad de la muestra.

Por último, hay que destacar que la norma ENV 1159-2 (11), para la determinación de la difusividad térmica de materiales

cerámicos, recomienda el uso de una solución numérica simple obtenida por Degiovanni (12), considerando todos los puntos experimentales. Este método numérico es diferente a los anteriores, puesto que se basa en el análisis de dos funciones " m_0 " y " m_{-1} " dependientes de la forma de la curva de variación de la temperatura con el tiempo, $V(T,t)$, llamadas "momentos temporales parciales" y definidas como:

$$m_0(H, \tau_0) = \int_{t_{i0}}^{t_{s0}} V(T, t) dt \quad (8)$$

$$m_{-1}(H) = \int_{t_{i0}}^{t_{s0}} \frac{V(T, t)}{t} dt \quad (9)$$

donde " H " es el número de Biot definido como $H = hL/\lambda$ (h : coeficiente de intercambio de calor superficial), que tiene en cuenta el intercambio de calor con el medio, y " τ_0 " es un tiempo característico dado por el cociente L^2/α . Aunque el análisis es simple, no permite obtener un parámetro estimativo para las pérdidas de calor.

El equipo del pulso láser utilizado tiene incorporados en el programa de análisis de los datos experimentales los procedimientos de Koski (10) y de Degiovanni (12). Así, el programa suministra, de forma simultánea, valores de difusividad térmica según los modelos de Clark-Taylor, Cowan y Degiovanni. El que de un mejor ajuste es el que se toma como válido.

El método del pulso láser también permite estimar, de forma indirecta, el calor específico, C_p , de las muestras. El procedimiento se basa en la comparación de la elevación de la temperatura que se produce en la muestra problema con la producida en una muestra patrón, suponiendo que las dos absorben la misma cantidad de energía. Ambas muestras deben tener el mismo espesor e igual diámetro; además, deben poseer difusividades y calores específicos similares. El error en la determinación de la conductividad por este método es $\sim 10\%$.

3. EXPERIMENTAL

Se han estudiado dos tipos de alúmina pura (99.97%), una densa, con una densidad de 3.9 g/cm^3 , y otra porosa, de 2.3 g/cm^3 de densidad y $\approx 40\%$ vol. de porosidad. En la muestra porosa se estimaron el tamaño medio de poro ($d_p = 4 \mu\text{m}$) y el tamaño medio de grano ($d_g = 6.5 \mu\text{m}$) mediante técnicas de análisis de imagen, utilizando un microscopio electrónico de barrido (SIEMENS DSM 150), y muestras previamente pulidas.

Las muestras se mecanizaron, con una broca hueca diamantada, en forma de cilindro de 12.5 mm de diámetro y 1.5 mm de espesor. A continuación, se prepararon tricapas de $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-densa}/\text{Cu}$ y de $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-porosa}/\text{Cu}$, mediante unión por difusión, en estado sólido. Se utilizaron discos de cobre, estanco a la luz de 99.9% de pureza (Goodfellow Ltd. UK), con un espesor 0.05 mm y con el mismo diámetro que las muestras de alúmina. La unión se realizó sometiendo el conjunto alúmina/cobre a una temperatura de 1000°C , en atmósfera de vacío ($1.6 \times 10^{-6} \text{ mbar}$) y aplicando una ligera presión uniaxial para asegurar buen contacto en las intercaras.

Las medidas de difusividad para las alúminas originales y ambas tricapas se realizaron en Argón hasta temperaturas de

300 °C, utilizando un equipo Thermaflash 2200 de Holometrix-Micromet (Inc. Bedford, USA). El láser es de vidrio de Neodimio, de longitud de onda 1.06 μm , con una energía por pulso de aproximadamente 15 J. La energía que incide sobre la muestra puede variarse desde un 5% a un 100%, mediante filtros, para conseguir la señal óptima en el detector (aumentos de temperatura en la cara posterior entre 0.5 y 2 °C). El sensor de infrarrojos es de InSb y el horno es de Tántalo. Para asegurar una absorción uniforme de la radiación láser en la superficie de la muestra, se la recubre con una lámina de oro de $\approx 0.1 \mu\text{m}$ de espesor mediante evaporación térmica. Finalmente, el aumento en la eficiencia de absorción del haz y de emisión de calor se consigue recubriendo la muestra con una capa de grafito coloidal de $\approx 10 \mu\text{m}$ de espesor, mediante pulverización.

Los datos experimentales se analizaron con el modelo de Clark-Taylor, por ser el modelo que mejor se ajustaba a las curvas experimentales, obteniéndose un dato de difusividad para cada temperatura.

Con los datos de difusividad, calor específico de la alúmina (13) y las correspondientes densidades, se calcularon las conductividades térmicas a partir de la expresión [7].

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 3 se representan los valores de difusividad en función de la temperatura para las muestras de alúmina densa y de Cu/Al₂O₃-densa/Cu. Los valores de difusividad obtenidos son muy similares en ambas configuraciones.

A partir de los valores obtenidos para el sistema tricapa, y de los valores de difusividad y calor específico del Cu, se podría calcular los valores de conductividad del material de alúmina (14-18). Sin embargo, como la diferencia de difusividades entre el Cu y la alúmina es muy elevada (11 veces mayor la del Cu) y el espesor de la capa de Cu es 30 veces menor que el espesor de la alúmina, el efecto de la capa de alta difusividad (Cu) se puede obviar (16). Es decir, esta capa solo actúa como receptora – transmisora de energía (configuración capacitiva) y no afecta a la medida, como experimentalmente se observa.

Los resultados para las muestras de alúmina porosa (simple y tricapa) se muestran en la Figura 4. Aunque la diferencia de difusividades entre ambos sistemas está dentro del error de medida, se observa una ligera disminución del valor de la difusividad cuando el material poroso se ensaya en la configuración tricapa. Analizando las curvas temperatura – tiempo obtenidas en ambos casos (Fig. 5), se desprende que hay transmisión directa del haz incidente en el material poroso monolítico, lo cual no ocurre en la tricapa. Cuando esto sucede, la forma de la curva temperatura – tiempo se desvía del comportamiento teórico. Por otro lado, el espesor efectivo es menor que el medido experimentalmente. Ambos factores aumentan el error en la determinación de la difusividad, que resulta mayor que el valor real. La magnitud de este efecto aumenta con el tamaño de poro (19), aunque en la alúmina porosa estudiada, con tamaño medio de poro del orden de la micra, es prácticamente despreciable (Fig. 4).

En la Figura 6, están representados los valores de conductividad medidos para la alúmina densa y la porosa a las distintas temperaturas, junto con las curvas calculadas con distintos modelos (20, 21). El modelo de Eucken (21) estima la conductividad efectiva de un material poroso a partir de los valores de conductividad del material denso y de la fracción de poros

Figura 3: Difusividad térmica de la alúmina densa y de la tricapa cobre – alúmina densa – cobre en función de la temperatura.

Figura 4: Difusividad térmica de alúmina porosa y de la tricapa cobre – alúmina porosa – cobre en función de la temperatura.

(40% vol. en nuestro caso). Este modelo está desarrollado a partir de la expresión de Maxwell (22), y es válido para poros esféricos y aislados dentro de una fase sólida continua. En este caso, la expresión de la conductividad efectiva, $\lambda_{\text{efec.}}$, es:

$$\lambda_{\text{efec.}} = \lambda_s \left(\frac{1 + 2P \frac{1-Q}{2Q+1}}{1 - P \frac{1-Q}{2Q+1}} \right) \quad (10)$$

donde “P” es el porcentaje de porosidad, “ λ_s ” es la conductividad de la fase sólida continua y “Q” es el cociente “ $\lambda_s/\lambda_{\text{Argon}}$ ”; λ_{Argon} se refiere a la conductividad del gas en el cual se ha realizado la medida que, en el presente caso, fue Argón.

Como se observa en la Figura 6, los valores de conductividad de la alúmina porosa son menores que los predichos por el modelo de Eucken. Esto se debe a que la conductividad efectiva del material poroso no depende únicamente del porcentaje de porosidad, sino que está fuertemente determinada por la forma y distribución de los poros en la fase sólida (21,

Figura 5: Termogramas obtenidos para la alúmina porosa (a) y para la tricapa cobre-alúmina porosa-cobre (b), a 300 °C.

Figura 6: Conductividad térmica en función de la temperatura para la alúmina densa, alúmina porosa y valores obtenidos con los modelos de Eucken y Sokolova para la muestra porosa.

Figura 7: Micrografía MEB de la alúmina porosa, donde se indican los parámetros microestructurales utilizados en el cálculo de la conductividad térmica.

23, 24). Como se refleja en la Figura 7, el material de alúmina porosa está formado por una fase sólida no continua, con poros no esféricos y con un cierto grado de percolación, por lo que la conductividad no se ajusta con el modelo simple de Eucken (20).

Existen pocos trabajos que modelicen la conductividad térmica efectiva de materiales porosos en función de su microestructura (21, 23, 24). En ellos, la conductividad resultante de los modelos existentes para materiales con poros isométricos aislados (Eq. 10) se suelen corregir con un factor, M , que engloba diferentes parámetros microestructurales:

$$\lambda'_{efec.} = M\lambda_{efec.} \quad (11)$$

M tiene en cuenta que no existe contacto total entre granos, sino que existe una cierta resistencia térmica debida a la presencia de microfisuras a lo largo de las fronteras de grano. Los parámetros microestructurales que se consideran para calcular el valor de M son: la anchura de las microfisuras (δ), la distancia entre ellas (L), el cociente entre el área de contacto entre granos (r) y el área de la sección transversal del grano (a), denominada (a) y el cociente entre las conductividades del

gas y la fase sólida ($\bar{\lambda}_g$). La conductividad del material intergranular se considera igual que la de la fase del interior de los granos. Estos parámetros microestructurales han sido determinados en el caso del material de alúmina porosa (Fig. 7), obteniéndose los siguientes valores: $\delta \approx 1 \mu\text{m}$, $L \approx 14 \mu\text{m}$, ($\bar{a} \approx 0.2$ y $\bar{\lambda}_g \approx 10^{-3}$). A partir de estos datos, el valor de M estimado según el trabajo de Sokolova (21) es ≈ 0.4 . En la Figura 6 se representa la curva de conductividad térmica calculada según la Eq. [11] utilizando este valor de M . Se puede observar que existe un buen acuerdo entre los valores obtenidos experimentalmente con el sistema tricapa para la alúmina porosa, y los calculados considerando el efecto de las "microfisuras", según el modelo de Sokolova (21).

5. CONCLUSIONES

El empleo de un sistema tricapa Cu/ Al_2O_3 -densa/Cu no modifica los valores de difusividad que se obtienen cuando se mide la Al_2O_3 -densa exclusivamente. Esta configuración es adecuada para la medida de muestras porosas, pues evita la penetración del haz láser. En la muestra de Al_2O_3 porosa, la

medida de la difusividad no se ve muy afectada, debido al pequeño tamaño de los poros, obteniéndose valores próximos en el sistema sencillo y tricapa. Sin embargo, la validez del método ha quedado comprobada y su aplicación en materiales con poros de tamaño mayor, donde el efecto será más notable, es posible.

La conductividad del material poroso se explica teniendo en cuenta la presencia de "microfisuras" que hacen que no exista contacto total entre granos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento especial a Antonio Conesa por el suministro de las muestras de alúmina porosa. Este trabajo ha sido financiado por los proyectos CICYT: MAT1999-0168-CE, 2FD97-035-CD2-01.

BIBLIOGRAFÍA:

1. G. S. Sheffield and J. R. Schorr. "Comparison of the thermal diffusivity and thermal conductivity methods". *Ceram. Bull.* **70** [1] 102-106 (1991).
2. K. Inoue. "Thermal diffusivity measurement of porous materials". *Transactions of JWRI*. **20** [1] 35-40 (1991).
3. M. Golombok and L. C. Shirvill. "Laser flash thermal conductivity studies of porous metal fiber materials". *J. Appl. Phys.* **63** [6] 1971-1976 (1988).
4. H. S. Carslaw y J. C. Jaeger. "Conduction of heat in solids". Oxford. U. P. 2000, pp. 101 y 126.
5. W. Parker, R. J. Jenkins, C. P. Butler y G. L. Abbot. "Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity". *J. Appl. Phys.* **32** [9] 1679-1684 (1961).
6. R. D. Cowan. "Pulse method of measuring thermal diffusivity at high temperatures". *J. Appl. Phys.* **34** [2] 926-927 (1963).
7. J. A. Cape y G. W. Lehman. "Temperature and finite pulse-time effects in the flash method for measuring thermal diffusivity". *J. Appl. Phys.* **34** [7] 1909-1911 (1963).
8. R. C. Heckman. "Finite pulse-time and heat-loss effects in pulse thermal diffusivity measurements". *J. Appl. Phys.* **44** [4] 1455-1460 (1973).
9. L. M. Clark y R. E. Taylor. "Radiation loss in the flash method for thermal diffusivity". *J. Appl. Phys.* **46** [2] 714-719 (1975).
10. J. A. Koski. "Improved data reduction methods for laser pulse diffusivity determination with the use of minicomputers". *Pr. Of the Eighth Symp. On Thermophysical properties. Volumen II* 94-103 (1981).
11. European Prestandard. ENV 1159-2. "Advanced technical ceramics - Ceramic composites - Thermophysical properties - Part 2: Determination of thermal diffusivity".
12. A. Degiovanni y M. Laurent. "Une nouvelle technique d'identification de la diffusivité thermique pour la méthode « flash »". *Revue Phys. Appl.* **21** 229-237 (1986).
13. A. Goldsmith et al. "Handbook of thermophysical properties of solid materials". p-35. The MacMillan Company, New York, 1961.
14. K. B. Larson y K. Koyama. "Measurement by the flash method of thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity in two-layer composite samples". *J. Appl. Phys.* **39** [9] 4408-4416 (1968).
15. H. J. Lee y R. E. Taylor. "Determination of thermophysical properties of layered composites by flash method" en *Thermal Conductivity* 14 pp. 423-434. Eds. P. Klemens y T. K. Chu. Plenum Press, New York. (1976).
16. T. Y. R. Lee, A. B. Donaldson y R. E. Taylor. "Thermal diffusivity of layered composites" en *Thermal Conductivity* 15 pp. 135-148. Ed. V.V. Mirkovich, Plenum Press, New York. (1978).
17. H. M. James. "Some extensions of the flash method of measuring thermal diffusivity". *J. Appl. Phys.* **51** [9] 4666-4672 (1980).
18. N. Araki, A. Makino, J. Mihara. "Measurements and evaluation of the thermal diffusivity of two-layered materials". *Int. J. Thermophys.* **13** [2] 331-349 (1992).
19. E. García, M. I. Osendi, P. Miranzo. "Thermal diffusivity in porous Cordierite ceramic burners". Futura publicación.
20. J. Francel and W. D. Kingery. "Thermal conductivity: IX, Experimental Investigation of Effect of Porosity on Thermal Conductivity". *J. Am. Ceram. Soc.* **37** [2] 99-106 (1954).
21. T. V. Sokolova et al. "Analysis of the influence of microstructural characteristics on thermal conductivities of porous ceramics", *Inorg. Mater. (Engl. Transl.)*, **9** [2] 265-268 (1972).
22. J. C. Maxwell, "Teatrise on electricity and magnetism". Vol. 1. Oxford University Press. 1892.
23. Y. Litovsky y M Shapiro. "Gas pressure and temperature dependencies of thermal conductivity of porous ceramic materials: Part 1, refractories and ceramics with porosity below 30%". *J. Am. Ceram. Soc.* **75** [12] 3425-3439 (1992).
24. Y. Litovsky y M Shapiro. "Gas pressure and temperature dependencies of thermal conductivity of porous ceramic materials: Part 2, refractories and ceramics with porosity exceeding 30%". *J. Am. Ceram. Soc.* **79** [5] 1366-1376 (1996).

Recibido: 13.02.01

Aceptado: 18.05.01

UNITECR 2001 CONGRESS.

7TH Biennial Worldwide Conference on Refractories

Hosted by **ALAFAR**

**Cancún, Quintana Roo, México
November 4-8, 2001.**

TECHNICAL COMMITTEE
e-mail: techcommmtt@hwr.com.mx
FAX: +52 (8) 4117299