

Sistema Primario de Medición de Conductividad Térmica de Aislantes Térmicos. Etapa 1. Diseño Térmico e Instrumental.

V. Martínez Fuentes,
Centro Nacional de Metrología
km 4,5 carretera a los Cues, El Marqués, Querétaro. 76241 México.
Tel. (4) 2 11 05 00, (4) 2 11 05 48. Correo electrónico: vmartine@cenam.mx

Resumen: Se presenta el diseño térmico, dimensional e instrumental del sistema de medición primario de conductividad térmica de aislantes térmicos. Este sistema consta de un aparato de placa caliente aislada con fuente de calor lineal en la placa caliente de medición. El sistema es del tipo de medición de conductividad por método estático (de estado estable) y su construcción e implementación tiene como fin servir como patrón nacional para este tipo de mediciones, dando lugar a la posibilidad de dar trazabilidad a las mediciones industriales de conductividad térmica de aislantes térmicos en el país.

Palabras clave:

Transferencia de calor, conductividad térmica, aparato de placa caliente aislada, ahorro de energía, trazabilidad, instrumentación.

INTRODUCCIÓN

Existe en el país gran demanda en la caracterización de materiales térmicos que se producen y comercializan en el país. La norma oficial mexicana NOM-018-ENER-1997 "Aislantes térmicos para edificaciones. Características, límites y métodos de prueba" [1] establece los métodos de prueba para evaluar la conductividad o resistencia térmica, densidad aparente, permeabilidad al vapor de agua y la adsorción de humedad para que se indiquen en los materiales que se comercialicen en el país con propiedades de aislantes térmicos. Esta norma entró en vigor el 24 de octubre de 1998. Hasta este momento, en el país no existe laboratorio primario para dar servicio de certificación de materiales y calibración medidores de flujo de calor a los fabricantes y proveedores de materiales aislantes térmicos, laboratorios secundarios, etc. para que cumplan con esta norma.

Según datos de la Comisión Nacional de Ahorro de Energía, se estima que en el primer año de aplicación de esta norma se tenga un ahorro de energía de 58 GWh, lo que representa un 20 % tomando como base las estimaciones de construcciones nuevas en las zonas cálidas del país, así se evita emitir al medio ambiente 36 226 ton de CO₂ y 11,4 ton de CO.

Para resolver la problemática de trazabilidad en las mediciones de conductividad térmica en aislantes térmicos el Centro Nacional de Metrología (CENAM) y el Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA) del Instituto Politécnico Nacional han reunido sus esfuerzos para llevar a cabo la construcción de un sistema primario de medición de conductividad térmica.

PRINCIPIO DE MEDICIÓN

Cualquiera que sea el método de medición de conductividad que normalmente se usa para la medición de conductividad térmica, esto es el método de placa caliente aislada o el método de medidor de flujo de calor [3,4,5,y 6], el principio de medición se basa en la llamada Ley de Fourier de conducción. Para un material isotrópico esta ley se escribe a continuación: En coordenadas cartesianas, el componente x de esta ecuación es:

$$q \leftarrow -k \nabla t$$

y si el flujo de calor es unidimensional:

$$q \leftarrow -k \frac{\partial t}{\partial x}$$

Esto establece que en estado estable el grado de conducción de calor q es proporcional a la sección transversal $A(x)$ normal a la dirección de flujo y al gradiente de temperatura $\partial t/\partial x$ a lo largo de la trayectoria de conducción.

$$q = qA(x) = -kA(x) \frac{dt}{dx}$$

La constante de proporcionalidad k es llamada la conductividad térmica "verdadera" del material.

Como es poco práctico medir dt/dx , el gradiente de temperatura en un punto dentro del espécimen, la definición operacional de la conductividad térmica es $k=q/(\Delta T/L)$ donde L es el espesor del espécimen.

SISTEMA DE MEDICION

El aparato de placa caliente aislada es el instrumento de medición primario para las mediciones de conductividad térmica de aislantes térmicos. Consta de una placa caliente que suministra el calor a las muestras que se colocan a ambos lados de la placa. El calor fluye a través de las dos muestras por acción de la diferencia de temperatura de la placa caliente y las dos placas frías que se colocan atrás de la muestra. Ver figura 1.

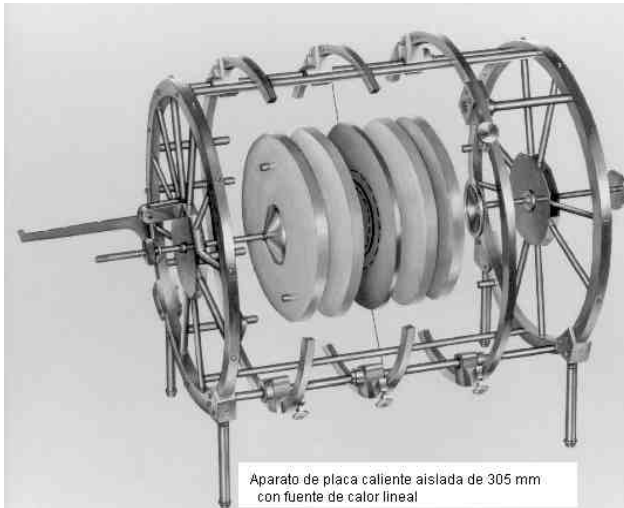


Figura 1. Aparato de placa caliente aislada.

En este caso en particular, la placa caliente es del tipo de fuente de calentamiento lineal cuyo diseño se basa en el aparato que diseñó Robinson en 1964 y presentó en la conferencia de conductividad térmica patrocinada por el NPL en Inglaterra en el cual discutió formas de fuentes lineales de calor que podrían usarse en calentadores en aparatos para la medición a más bajas temperaturas en materiales aislantes en forma de disco o placa.

En contraste a un (convencional) aparato de placa caliente aislada que usa calentadores distribuidos uniformemente, las placas calientes aisladas con fuente de calor lineal utilizan fuentes lineales circulares de calor específicamente localizadas. Para una localización adecuada de la fuente(s) lineal(es) de calor, la temperatura a la orilla del plato de medición puede hacerse igual a la temperatura media de la placa de medición, facilitando así, la medición de temperatura y el aislamiento térmico. Algunas ventajas de este diseño incluyen [2]:

- Reducción de las mediciones requeridas de potencia eléctrica del calentador y la temperatura en los extremos de las secciones de guarda y de medición.

- Facilidad de igualar la temperatura de la banda de separación a lo largo de su longitud
- Mayor simplicidad en el maquinado, la fabricación y reparación;
- Facilidad para su uso en condiciones de vacío
- Eliminación de las dificultades asociadas con los calentadores distribuidos;
- Facilidad de mediciones de los efectos de expansión térmica

Diseño térmico:

El corazón del aparato se puede decir que es la placa caliente aislada. Esta placa consta de dos secciones: la sección de medición y la sección de la guarda. Ambas secciones se diseñan para obtener la menor incertidumbre debidas a pérdidas de calor que suministra y que se toma en cuenta para el cálculo de la conductividad térmica.

El diseño consiste de una placa circular de material altamente conductor de conductividad λ_p y espesor m , dividido en una sección de medición y una sección de aislamiento (o guarda) y separados por un espacio en $r = b$. La sección de medición es calentada establemente por un calentador lineal circular ideal en $r = a$; la guarda es calentada similarmente por un fuente lineal en $r = c$. Se presume que la placa será apisonada entre dos muestras planas similares de conductividad λ_s y espesor l , los cuales están en contacto con su cara exterior con las placas planas de las placas frías que se asumen que son isotérmicas en temperatura $v = 0$.

Se tiene una solución aproximada para la distribución de temperatura en el aparato de placa caliente aislada con calentador lineal circular. Esa solución es aproximada en que despreja el flujo de calor en la placa caliente en la dirección axial, y el flujo de calor en la muestra en la dirección radial.

Metodología

En el diseño se sigue la siguiente metodología:

- Estudio de artículos publicados relacionados al diseño, operación y funcionamiento del aparato.
- Especificaciones requeridas
- Dimensionamiento de piezas
- Distribución y perfiles de temperatura esperados

El aparato se espera tenga las características y especificaciones mostradas en la tablas 1.

Tabla 1. Especificaciones físicas del aparato de placa caliente aislada

Parámetro físico	
Material de la placa	aluminio
Recubrimiento de la placa	anodizado
Emitancia normal	0,90
Diámetro de la guarda, mm	304,8
Diámetro de la placa de medición, mm	151,6
Número de calentadores en la placa de medición	1
Radio de la fuente lineal de calor en la placa de medición, mm	107,2
Tipo de fuente de calor lineal en la placa de medición.	Calentador flexible
Tipo de sensores de temperatura	termopar tipo T

Este aparato esta diseñado para cumplir las siguientes condiciones:

1. Deberá acomodar un par de muestras circulares de 304,8mm (12 ") de diámetro y hasta 50,8mm (2") de espesor,
2. deberá conformar los requerimientos de la norma ASTM C-177 para una placa caliente de superficie metálica
3. deberá ser útil para conductancias térmicas de hasta $60 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$,
4. deberá usarse para mediciones con temperaturas de la placa fría a alrededor de 230K y temperatura de la placa caliente de hasta 530K,
5. las placas frías deberán enfriarse con líquido fluyendo a través de ellas, y
6. y el ambiente alrededor (temperatura, humedad, gas) deberá ser controlable

El diámetro exterior de la placa caliente es de 304,8 mm (12"). El espesor de la placa caliente se escogió de 9,5mm (3/8"). El tamaño de la sección de medición y de la de aislamiento fueron determinados del análisis de errores de pérdidas de calor en los extremos y del desbalance del espaciamiento. Grandes valores de d/b dan menos error debido a pérdidas en los extremos (d es el radio exterior del anillo de guarda). Sin embargo, una área pequeña

de medición da errores más grandes de desbalance del espaciamiento y hay una incertidumbre ligeramente más grande en el área de la sección de medición. Por lo tanto, las dimensiones de las áreas de medición y aislamiento fueron escogidas como compromiso. En el diseño inicial, el diámetro de la sección de medición es 151,6 mm, correspondiente a $d/b \approx 2$.

Diseño del calentador.- La localización del calentador se seleccionan para que correspondan a $b/a = \sqrt{2}$ y $c/b = 1.29$. Para la sección de medición se utilizo un calentador flexible y para la sección de aislamiento se utilizo un calentador con aislamiento y protección.

Soporte de la placa de medición.- Para soportarla se usaron tres alfileres de acero inoxidable las cuales son empujadas radialmente por medio de un tornillo y que presiona la ranura existente en la circunferencia de la placa. En la reconstrucción se esta utilizando un tercera generación de alfileres.

Diseño de la placa fría.- El diseño de la placa fría enfriada por liquido se describe. A un disco de 304,8mm de diámetro de cobre libre de maquinado se le maquinan ranuras en doble espirar de 12,7 mm de ancho y 9,5 mm de profundidad. Después se le suelda una placa de cobre de 6,4 mm de espesor a cada placa para hacer los pasadizos del líquido. Los cálculos indican que si el flujo de fluido se mantiene a una razón de $0,7 \text{ m}^3/\text{h}$ las placas frías serán isotermas para el máximo flujo de calor.

Estructura de soporte.- Se utilizan anillos de 520 mm de diámetro para soportar con cables de acero cada una de las placas del aparato. Se utilizan rodamientos lineales para desplazar estos anillos a través de todo el largo de las barras de soporte del aparato.

Medición del espesor.- El espesor se mide sobre las condiciones reales de prueba utilizando para ello transformadores diferenciales variables lineales (LVDT). de alta temperatura. Tres de ellos se colocan una placa fría por medio de soportes de invar, los núcleos soportan en la otra placa fría.

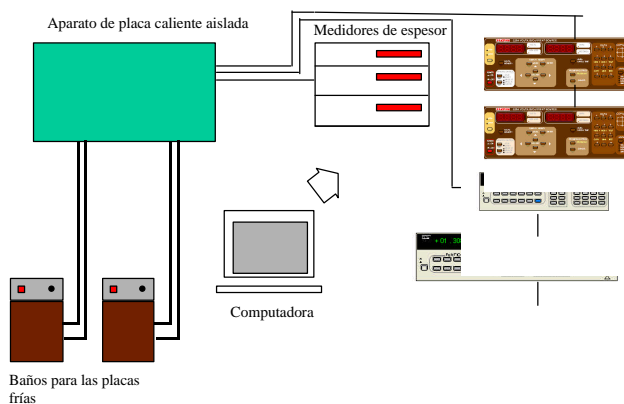
Distribuciones de temperatura y localización de los sensores de temperatura. Por medio de cálculos se seleccionan los lugares que podrían proporcionar una exacta indicación de la temperatura. Las propiedades térmicas que podrá medir el sistema una vez ya instalado serán la resistencia térmica, conductancia térmica y de allí calcular la conductividad térmica del material bajo prueba. También el aparato podría ser modificado

mínimamente para la medición de la expansión térmica y la difusividad térmica. Se espera usar el método de fuente de calor lineal en el plato caliente a diferencia de fuentes distribuidas de calor.

Diseño Instrumental

Un esquema de instrumentación se muestra en la figura 2. Se requieren de baños de recirculación de temperatura controlada para mantener las placas frías a temperatura constante. Calefactores eléctricos y fuentes de potencia se requieren para controlar y mantener la temperatura de la placa caliente y conocer la potencia suministrada. Transformadores LVDT se usan para la medición del espesor de la muestra. Multímetros de alta resolución (HP34858A) se usan para la medición de la fem de los termopares y los termopares diferenciales, la medición de la resistencia de los RTD, y para la medición de la potencia suministrada al calefactor.

Figura 2. Instrumentación



CONCLUSIONES

Hasta la fecha se lleva un gran avance en la construcción del sistema. Se tiene casi la totalidad de la instrumentación y las partes que componen el sistema. Para propósitos de comparación se está diseñando una placa caliente con la sección de medición con calentadores uniformemente distribuidos.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece la ayuda para este proyecto de parte del CICATA, en cuanto a materiales e información y en especial a los Dr. Juan Manuel Figueroa Estrada y Dr. Jorge A. Huerta Ruelas.

REFERENCIAS

1. NOM-018-ENER-1997 " *Aislantes térmicos para edificaciones. Características, límites y métodos de prueba*". Norma Oficial Mexicana.
2. Siu, M. C. I. And Bulik, C. *National Bureau of Standards line-heat-source guarded-hot-plate apparatus*. Review of Scientific Instruments Vol 52 No. 11 November 1981. AIP. Pp. 1709-1716.
3. C1043-96 Standard Practice for Guarded-Hot-Plate Design Using Circular Line-Heat-Sources. Norma ASTM.
4. C177-97 Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurement and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus. Norma ASTM.
6. ISO 8302:1991(E) Thermal Insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Guarded hot plate apparatus. Norma Internacional
7. NMX-C-189-1984 *Industria de la Construcción - Materiales Termoaislantes-Transmisión térmica (Aparato de Placa Caliente Aislada)- Método de Prueba*. Norma Mexicana.