

3.DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.

3.1. INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se analizarán en base a las normas y pruebas de la ASTM las condiciones que debe de cumplir un dispositivo para la medición de conductividad térmica para especímenes de placa plana caliente en estado estable unidimensional.

Al grupo del Estado Estable pertenecen los métodos de medición donde las muestras de prueba están sujetas a un perfil de temperatura, el cual es invariable con el tiempo, es decir, para cada punto permanece constante la temperatura en todo momento; así que la Conductividad Térmica se determina midiendo la velocidad del flujo de calor por unidad de área y la diferencia de temperatura cuando la muestra ha alcanzado el equilibrio.

Estos métodos de prueba cubren la medida del flujo de calor y las condiciones de prueba asociadas para especímenes de placa plana. La medición del flujo de calor puede ser dependiente de condiciones ambientales y condiciones de prueba de aparato, también como características intrínsecas del espécimen. Basado en las medidas del flujo de calor conducidas con este método, las propiedades de conducción térmica deben de calcularse de acuerdo con las normas C 518 y C 177 de la ASTM.

3.2. NORMAS GENERALES DE LA ASTM PARA EL FLUJO DE CALOR EN ESTADO ESTABLE UNIDIMENSIONAL.

Método C-177 85 de la ASTM.

MÉTODO ESTANDAR DE PRUEBA PARA LAS MEDICIONES DEL FLUJO DE CALOR EN ESTADO ESTABLE POR MEDIO DEL APARATO DE PLACA CALIENTE PROTEGIDA.

1. *Ámbito.*

1.1. Este método cubre la forma el logro y medidas del flujo de calor de estado estable por medio de especímenes de plancha plana usando un aparato de placa-caliente-cubierta. El método envuelve tanto el modo de medida de un lado como el modo de medida del doble lado. En este método de prueba en principio tanto los diseños de plancha de calentamiento y de fuente de línea distribuida son incluidos. El lector debe consultar las prácticas de norma en el modo de un solo lado de operación y en el aparato de fuente de línea para más detalles en estas variaciones del método.

1.2. Los cálculos de las propiedades de la transmisión térmica basada sobre medidas usando este método deben de ser ejecutados de acuerdo con la práctica C 177.

1.3. Este es un método absoluto de medida desde que ninguna norma de referencia para el flujo de calor son requeridas, excepto para confirmar afirmaciones precisas y para establecer la trayectoria a normas reconocidas. Este método absoluto es contrastado con un método comparativo (o secundario), como el método de prueba C 518, en cual los resultados son directamente dependientes de las normas de referencia sobre flujo de calor.

1.4. Este método de prueba es aplicable a la medida de una amplia variedad de especímenes, que abarca desde sólidos opacos hasta porosos o materiales transparentes, y un campo amplio de condiciones ambientales. Las precauciones especiales en los procesos de medidas son descritos por lo siguiente:

1.4.1. Especímenes que demuestran notable heterogeneidad anisotrópica, rigidez, o densidad extrema de flujo térmico.

1.4.2. Medidas conducidas a extremos de temperaturas (sean altas o bajas), o bajo condiciones de vacío.

1.5. Este método de prueba es intencionado para permitir una amplia variedad de diseño de aparatos y diseños precisos para satisfacer los requisitos de problemas específicos de medidas. De acuerdo con este método de prueba requiere de una declaración de lo no acertado de cada variable dada en el reporte. Por eso en las siguientes secciones, los factores de error significantes serán discutidos o analizados.

1.6. Esta norma no significa que dirigirá todos los problemas de seguridad, si los hay, asociados con su uso, es responsabilidad del usuario de esta norma establecer la seguridad apropiada y prácticas de salud, determinando la aplicabilidad de restricciones reglamentarias antes de usarse.

3.2.1. PRINCIPIO DEL MÉTODO EXPERIMENTAL.

En esta sección se discute tanto el principio idealizado del método como las desviaciones de éste que se presentan en práctica. La figura 3.1 muestra los componentes del centro del sistema idealizado: dos unidades isotérmicas de superficies frías y una unidad isotérmica de superficie caliente protegida. La unidad isotérmica de superficie caliente protegida está compuesta de la unidad de área medida y una unidad concéntrica protegida. En medio de estas tres unidades (ilustradas en la figura 3.1), está el material que será evaluado, esto es, el espécimen. En el modo de doble lado de medida, el espécimen está realmente compuesto de dos piezas. La medida en este caso produce un resultado que es el promedio de las dos piezas y así pues es importante que las dos piezas sean tan iguales como sea posible. Para solucionar esto en nuestra investigación en la hoja de cálculo se resuelve una matriz que hace proporcional el flujo de calor de la resistencia en base al área y espesor de cada espécimen, durante los siguientes capítulos se describirá mas ampliamente este proceso. La unidad de área medida es la porción del ensamble que provee el poder (el flujo caliente por unidad de tiempo) para la medida y define el volumen de prueba. Esa porción del espécimen que está siendo medida para nuestra investigación le llamaremos resistencia eléctrica.

La función de la porción de protección de la unidad isotérmica de superficie caliente es para proporcionar el poder adicional necesario para crear las condiciones térmicas propias dentro del volumen de prueba. En cualquier caso idealizado, la porción de protección se puede pensar

como infinita en ancho, pero en esta investigación esto estará determinado por las dimensiones de la resistencia y de las paredes de protección de la unidad. Las condiciones ideales, son ilustradas en la figura por el aspecto de las superficies isotérmicas y líneas de constante densidad de flujo de calor dentro del espécimen. Las superficies isotérmicas son planas que son paralelas a cada una y al centro de las tres componentes. Además, las líneas de densidad de flujo de calor constante son perpendiculares hacia éstas superficies planas y son distribuidas uniformemente por toda el área medida. El establecimiento de las condiciones idealizadas de arriba simplemente quiere decir que no hay componentes radiales de flujo de calor dentro o inmediatamente contiguo al volumen de prueba.

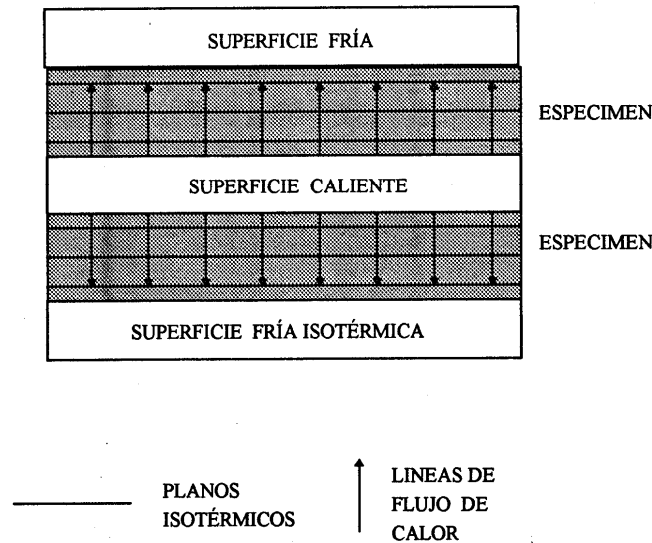


Fig. 3.1. Esquema del aparato de placa caliente protegida.

Desviaciones de la configuración idealizada son causadas por: (a) heterogeneidad del espécimen, (b) diferencias de temperaturas entre la unidad de medida y la unidad de protección (intervalo no balanceado), y (c) diferencia de temperatura entre el margen exterior del ensamble y el ambiente alrededor (orilla desnivelada). Estas realidades experimentales llevan a distorsiones de las superficies isotérmicas y líneas de densidad de flujo de calor constante dentro del volumen de

prueba. Consecuentemente, la potencia abastecida a la unidad de área medida no es exactamente igual a la que fluye por el volumen de prueba. La potencia medida puede ser muy poco, o muy grande dependiendo en la dirección de los desequilibrios arriba mencionados. Los actuales flujos de calor resultantes son cualitativamente indicados en la figura 3.2.

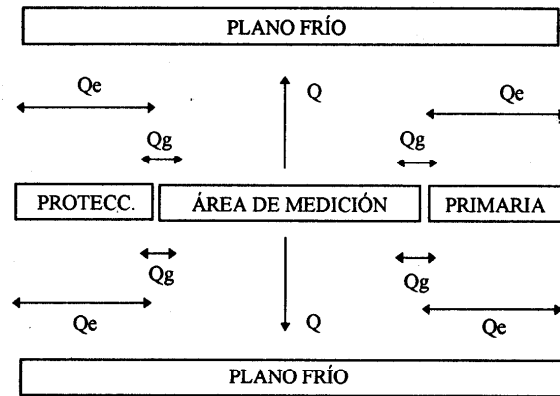


Fig. 3.2. Ilustración de el flujo de calor en el espécimen Q , flujo de calor en espacios vacíos Q_g , y flujo de calor en las orillas Q_e .

Las tres unidades de calentamiento y enfriamiento son diseñadas para crear superficies isotérmicas al frente de los especímenes dentro de la región medida. Las dos superficies designadas como las superficies frías isotérmicas son ajustadas a la misma temperatura, para el modo de doble lado de operación (esto es, dos especímenes son medidos). Porque las planchas y los especímenes son de limitadas dimensiones y porque el ambiente exterior está a una distribución de temperatura diferente a la de la orilla de la región medida, algo de flujo de calor radial existe en práctica. La protección para la región medida limita la magnitud del flujo caliente radial en la región medida. La efectividad de la protección es determinada, en parte, por la proporción de su dimensión radial a la de la región medida y al grueso del espécimen.

De acuerdo con este método de prueba se requiere: (a) el establecimiento de condiciones de estado estable, y (b) la medida del flujo de calor unidireccional en la región medida, el área medida, las temperaturas de las superficies calientes y frías, el grosor del espécimen y otros parámetros que puedan afectar el flujo de calor unidireccional a través de la región medida del espécimen.

El término “aparato protegido de placa caliente” se aplica a todo el sistema de especímenes de placa y componentes asociados de control y medidas. La colocación general de los componentes mecánicos de tal sistema se ilustran en la figura 3.2.

Cuando las condiciones de prueba son muy distintas a las condiciones de cuarto, será necesario aplicar una protección secundaria del ensamble de la placa del espécimen. Por ejemplo, si las temperaturas de prueba de la placa caliente o fría son más de 25 °K de diferencia a la temperatura de cuarto, será necesario el aislamiento de la orilla o una cámara ambiental que ayude a eliminar efectos falsos de corriente de aire en el cuarto. Esto es necesario para: (a) bajas medidas de temperatura para prevenir condensación, (b) gases de llenado en lugar de aire y (c) medidas en vacío.

Para la medición de temperatura con sensores de control cualquier sistema de sensores de temperatura con indicaciones que posea una consistencia precisa con el análisis de error requerido se puede usar para medición y control de temperaturas dentro del sistema.

Los sensores de temperatura deben ser calibrados para dentro de la duda permitida por la exactitud de diseño del aparato.

La energía hacia la región medida es determinada con un contador de energía o de medidas de voltaje y corriente a través del calentador en la región medida. EL usuario debe fijarse que las determinaciones de la energía en corriente alterna son más propensas a error que las medidas de corriente directa.

El procedimiento de prueba incluye los siguientes pasos:

- Selección del espécimen.
- Preparación e instalación del espécimen.
- Establecimiento del estado estable térmico.
- Adquisición de datos.

Para la selección del material únicamente los factores importantes de selección de espécimen son tomados en cuenta:

a) Tamaño. El máximo espesor del espécimen que pueda ser medido a una exactitud dada es dependiente en varios parámetros, incluyendo el tamaño del aparato, la resistencia térmica del espécimen y la exactitud deseada.

b) Homogeneidad. Hay dos problemas potenciales en la determinación del flujo de calor por medio de los especímenes altamente heterogéneos. Uno es relacionado a la interpretación y aplicación de los datos resultantes, el otro es que si la densidad del flujo de calor cambia notablemente sobre el área medida algunos errores pueden aumentar significativamente.

Preparación del espécimen. En general las superficies del espécimen deben de ser preparadas para asegurar el contacto térmico uniforme con la placa de calentamiento y enfriamiento.

El tiempo requerido para establecer el estado estable térmico del sistema varía considerablemente con las características del diseño de aparato, el espécimen que será medido y las condiciones de prueba. Sin embargo, generalmente desde que este método de prueba es aplicable a especímenes de baja conducción, el establecimiento de tiempo está en el orden de horas. Tiempos de establecimiento generalmente aumentan con especímenes más gruesos, especímenes con baja difusividad térmica y sólido. Después del logro del deseado estado estable, tres repasos sucesivos de datos adquiridos deberán de ser completados.

La primordial información requerida para este método de prueba incluye energía eléctrica, temperatura de la superficie, el área y espesor.

El flujo de calor que se reporta es el que pasa por cada espécimen. Para el modo de operación de doble lado sólo la mitad de energía generada por el calentador fluye por cada espécimen.

La precisión o incertidumbre de un resultado medido indica la probable o posible diferencia entre el valor medido y el verdadero valor. Las precisiones dadas pueden ser o muy grandes o muy pequeñas dependiendo en el cuidado tomado en la construcción y operación de cada aparato individual.

El reporte de los resultados de cada prueba deberán incluir identificación del espécimen, la condición ambiental de prueba, detalles salientes del aparato y resultados medidos junto con sus

incierto sistemático y estimado. Los resultados medidos deberán ser los valores promedios tal como fueron obtenidos de la prueba. Si circunstancias extrañas existen que impidan acuerdo con el método deberán ser descritas [6].

Las bases de este método se encuentran en la dirección uniaxial del flujo de calor a través de un cuerpo, por lo que a continuación analizaremos esta regla aplicada en una pared plana.

3.3. CONDUCCIÓN DE CALOR A TRAVÉS DE UNA PARED PLANA.

El problema que consideramos es el de una pared plana (fig. 4.1). Se considera que la pared plana está constituida de un material que tiene conductividad térmica constante y que se extiende al infinito en las direcciones y y z . Es importante notar que la conductividad térmica es constante y no depende de cualesquiera posición o temperatura. El calor que se conduce a través de la pared de un cuarto donde la energía que se pierde a través de las aristas de la pared es despreciable, se puede modelar como una pared plana. Para un problema de este tipo, la temperatura es función de x únicamente; por lo tanto, se dice que se trata de un problema unidimensional. Esto es, la única variable dependiente es la temperatura, y la única variable independiente es la posición x en la pared.

Se puede obtener la ecuación diferencial que gobierna el proceso, haciendo un balance de energía en un pequeño elemento de volumen de pared, con espesor dx , y área transversal A . Sea Q_x el calor que se conduce hacia adentro del elemento de volumen en $x = x$, y sea Q_{x+dx} el calor conducido hacia afuera del elemento de volumen $x = x + dx$. Para condiciones de estado estacionario, la temperatura no puede ser función del tiempo. Por lo tanto, el elemento de volumen no experimentará cambio alguno en su energía eléctrica. Ya que se supone que la temperatura sólo varía con x , no habrá conducción en las direcciones y o z (o sea, los gradientes de temperatura son cero en estas direcciones). Suponiendo que no hay generación interna de calor, tal como ocurre cuando una corriente eléctrica fluye a través de un conductor, las cantidades Q_x y Q_{x+dx} deben ser iguales.

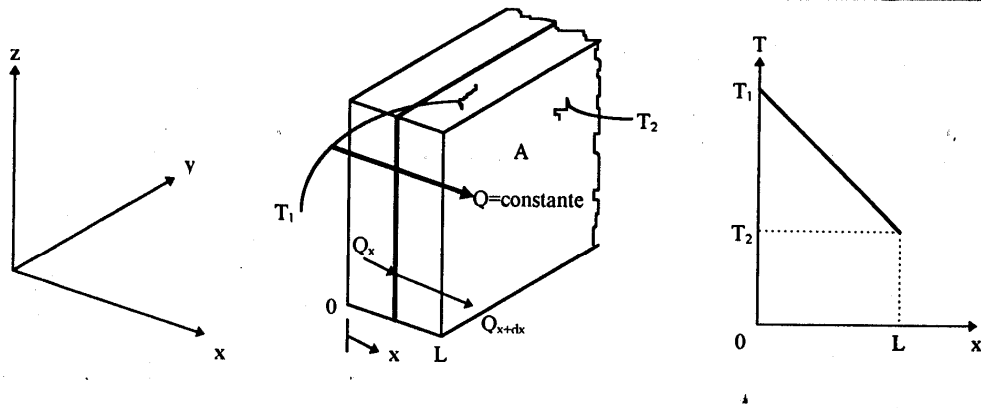


Fig. 3.3. Conducción de calor a través de una pared plana.

$$Q_x = Q_{x+dx} \quad \text{Ec.(3.1)}$$

De la Ley de Fourier:

$$Q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

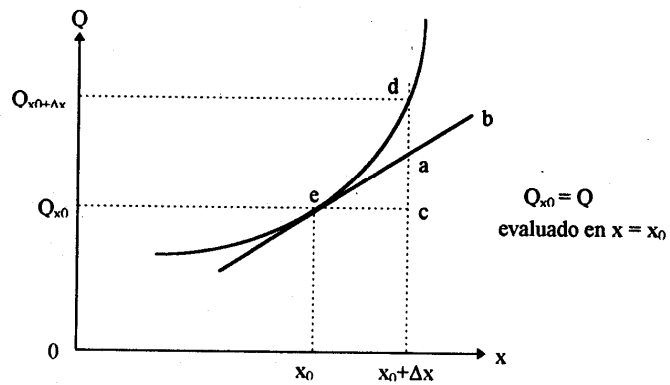


Fig. 3.4. Determinación de Q_{x+dx}

Para determinar Q_{x+dx} considere una variación arbitraria de Q al variar x , como se ve en la figura 4.2. El análisis siguiente se aplica al caso general tridimensional, y el resultado nos permite, además, determinar $Q_y + dy$ y $Q_z + dz$. La línea curva representa una variación arbitraria en Q_x para valores específicos de y y z (digamos y_0 y z_0 cuando x cambia, mientras que la línea eab es tangente a la curva en e . El punto e representa el valor de Q_{x_0} en x_0 y el punto d representa el valor de Q_{x_0} y sus derivadas en x_0 .

Permítanos determinar el valor de Q_x en el punto a . En primer lugar, la línea eab representa la cantidad $(\partial/\partial x)(Q_x)$, o en otras palabras, representa la pendiente de la curva Q contra x , evaluada en $x = x_0$. Esta pendiente es igual a $ac/\Delta x$, que nos dice que el segmento ac es igual a $[(\partial/\partial x)(Q_x) (\Delta x)]$. Por lo tanto, el valor de Q en el punto a es igual a la cantidad $[Q_{x_0} + (\partial Q_x/\partial x)\Delta x]$. Ahora, si Δx se hace suficientemente pequeño, ambos puntos a y d se mueven hacia el punto e , y entonces el punto a se acerca al punto d . Así, en dicho proceso de límites, Δx se transforma en dx y $Q_{x_0} + \Delta x$ se transforma en Q_{x_0+dx} . Por lo tanto, quitando el subíndice 0 en x_0 , escribimos:

$$Q_{x+dx} = Q_x + \frac{\partial}{\partial x}(Q_x)dx \quad (Ec. 3.3)$$

Para el caso de una pared plana, la temperatura (la variable dependiente es función de una sola variable independiente, x , y las derivadas parciales que aparecen en las ecuaciones (2) y (3) se transforman en derivadas ordinarias; de modo que podemos escribir:

$$Q_x = Q_{x+dx} = Q_x + \frac{d}{dx}(Q_x)dx \quad Ec. (3.4)$$

$$-kA \frac{d}{dx} = -kA \frac{dT}{dx} + \frac{d}{dx} \left(-kA \frac{dT}{dx} \right) dx \quad Ec. (3.5)$$

o bien:

$$\frac{d}{dx} \left(kA \frac{dT}{dx} \right) dx = 0 \quad Ec.(3.6)$$

Para este problema, k y A son constantes y ya que dx no puede ser 0:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0 \quad (Ec. 3.7)$$

La ecuación (3.3) es una ecuación diferencial de segundo orden, lo cual indica que se requieren dos condiciones en la frontera para hallar su solución. estas son:

$$\begin{aligned} \text{en } x = 0, \quad T &= T_1 \\ x = L, \quad T &= T_2 \end{aligned}$$

Integrando una vez la ecuación (3.7) obtenemos:

$$\frac{dT}{dx} = C_1 \quad \text{Ec. (3.8)}$$

donde C_1 es una constante de integración. Integrando de nuevo se tiene:

$$T(x) = C_1x + C_2 \quad \text{Ec. (3.9)}$$

en cuya expresión C_2 es otra constante de integración. En $x = 0$, $T = T_1$ de modo que $C_2 = T_1$ y la temperatura está dada por:

$$T(x) = C_1x + T_1 \quad \text{Ec. (3.10)}$$

Además, en $x = L$, $T = T_2$ de modo que

$$T_2 = C_1L + T_1 \quad \text{Ec. (3.11)}$$

lo cual da

$$C_1 = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad \text{Ec. (3.12)}$$

dando por resultado

$$T(x) = (T_2 - T_1) \frac{x}{L} + T_1 \quad \text{Ec. (3.13)}$$

La ecuación (3.13) es la distribución de temperatura en la pared plana. Esto nos demuestra que la distribución de temperaturas es una función lineal de x .

Ahora que sabemos cómo varía la temperatura con x , podemos determinar el flujo de calor unitario a través de la pared, ya que la Ley de Fourier establece que $Q = -kA(dT/dx)$.

Procediendo con la ecuación (4), podemos escribir

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dx} &= \frac{T_2 - T_1}{L} \quad \text{y} \\ Q &= \frac{-kA(T_2 - T_1)}{L} \quad \text{o bien} \\ Q &= \frac{kA(T_1 - T_2)}{L} \quad \text{Ec. (3.14)} \end{aligned}$$

Esta es la razón de calor, Q , que se debe suministrar a la cara izquierda de la pared para que se mantenga la diferencia de temperaturas ($T_1 - T_2$). No esperamos que la corriente cambie de valor mientras viaja a través del resistor del estado estacionario.