

## 4. DILATACIÓN TÉRMICA DE MATERIALES METÁLICOS, CERÁMICOS Y COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA

### 4.1. Objetivos docentes

Conocer un método para determinar el coeficiente de dilatación lineal de los materiales sólidos.

### 4.2. Objetivo del trabajo práctico

Medir la dilatación que experimentan varillas huecas de distintos materiales cerámicos, poliméricos y compuestos al variar la temperatura. Calcular el coeficiente de dilatación lineal a partir de estas medidas.

### 4.3. Fundamento teórico

#### Dilatación térmica de un sólido

El volumen que ocupa un material depende de la temperatura a la que se encuentre. Esto es así porque la temperatura le proporciona a los átomos una energía térmica que los hace vibrar en torno a las posiciones de equilibrio que ocupan en la red del sólido. Si la presión es constante, mientras mayor sea la amplitud de vibración más lejos se sitúan las posiciones de equilibrio de unos átomos con respecto de otros para permitir dichos movimientos, produciéndose un aumento de volumen del material.

El incremento de volumen para una variación de temperatura a presión constante es proporcional al volumen original:

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = \alpha_V V$$

siendo la constante de proporcionalidad ( $\alpha_V$ ) el coeficiente de dilatación volumétrica.

Si nos restringimos a una dimensión, el constante de proporcionalidad se denomina coeficiente de dilatación lineal ( $\alpha_l$ )

$$\left(\frac{\partial l}{\partial T}\right)_P = \alpha_l l$$

Estas expresiones nos dicen que si medimos la variación de longitud ( $\Delta l = l_f - l_0$ ) que experimenta el material de longitud inicial ( $l_0$ ) como consecuencia de una variación de temperatura ( $\Delta T = T_f - T_0$ ) se puede determinar el coeficiente de dilatación lineal:

$$\alpha_l = \frac{1}{l_0} \left(\frac{\Delta l}{\Delta T}\right) = \frac{1}{l_0} \left(\frac{l_f - l_0}{T_f - T_0}\right)$$

Las unidades de  $\alpha_l$  son de inverso de la temperatura ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$  o  $\text{K}^{-1}$ ).

Midiendo el incremento de longitud frente a la temperatura, el coeficiente de dilatación lineal será la pendiente de la recta que se obtiene representando dichos valores:

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha_l \Delta T$$

En los materiales sólidos es más fácil determinar el coeficiente de dilatación lineal que el coeficiente de dilatación volumétrico (en tres dimensiones). No obstante, no hay que olvidar que muchos materiales cerámicos cristalinos y los materiales compuestos son anisotrópicos en cuanto a dilatación térmica, es decir, el coeficiente de dilatación lineal depende de la dirección en la cual se mida.

Para materiales isotrópicos se cumple que

$$\alpha_v = 3\alpha_l$$

El coeficiente de dilatación depende del rango de temperaturas en el que se produzca la variación, por lo que hay que indicar en qué condiciones térmicas se han determinado los valores.

Por lo general, los materiales poliméricos presentan coeficientes de dilatación muy altos ( $50 - 300 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ), seguido de los metales con coeficientes de dilatación intermedios ( $5 - 25 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) y los cerámicos que presentan poca dilatación ( $0.5 - 15 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) sobre todo a temperaturas cercanas a la temperatura ambiente. El coeficiente de dilatación depende de la composición exacta y de la estructura y la microestructura que tenga el material (no dilatan igual todos los aceros o todos los polietilenos).

En los materiales cerámicos, al igual que en otros materiales, el coeficiente de dilatación depende de la composición química y de la estructura cristalina, así como de la microestructura, es decir, de la variedad de fases que los componen, forma y tamaño de los granos, forma y tamaño de los poros, presencia de distintos tipos de interfases y como quedan situadas unos granos con respecto de otros, etc.. La alta complejidad de sus microestructuras hace que los materiales cerámicos presenten un comportamiento térmico muy rico y variado. El material puede ser macroscópicamente isotrópico en dilatación térmica, pero algunas o todas sus fases pueden ser anisotrópicas. Algunas cerámicas llegan a experimentar dilatación en una dirección y contracción en otras direcciones. Los vidrios basados en la sílice tienen un coeficiente de dilatación muy bajo, aumentando ligeramente con la cantidad de impurezas.

La dilatación diferencial de sólidos supone un problema a la hora del procesado de los materiales cuando se utilizan variaciones de temperatura, ya que provoca cambios de volumen globales o locales que la pieza tiene que soportar para conservar su integridad física. También hay que tener en cuenta la dilatación térmica debidas a las condiciones de uso, donde los materiales pueden verse sometidos a temperaturas extremas, cambios bruscos o cambios cíclicos de temperatura. Todos estos factores provocan tensiones mecánicas y la denominada "fatiga térmica" que tan perjudiciales son para el material.

Los problemas son más graves siempre que el material o alguna de sus fases tenga dilatación térmica anisotrópica. En el diseño de piezas de materiales cerámicos policristalinos y materiales compuestos con fases de distinta dilatación y fibras alargadas y orientadas en una dirección es imprescindible tener en cuenta los efectos de la dilatación diferencial.

Un ejemplo de lo indicado anteriormente lo encontramos en el hormigón armado. En este material compuesto, los alambres de acero (fibra) deben tener un coeficiente de dilatación similar al del hormigón de cemento Portland.

En el caso del mármol, un material cerámico policristalino de origen natural, la normativa vigente indica que no se pueden hacer piezas planas para recubrimientos (placas o planchas de pequeño espesor) de más de 1 m de longitud, ya que estas piezas suelen presentar alabeos e incluso roturas en un corto periodo de tiempo tras su colocación. Aunque una pieza de mármol voluminosa pueda resultar isotrópica, los pequeños granos de calcita que forman el mármol son anisotrópicos y las pequeñas dilataciones diferenciales locales suponen un problema en una pieza de gran tamaño y pequeño espesor.

En esta práctica vamos a ver una forma de determinar el coeficiente de dilatación lineal para materiales sólidos en forma de tubos cilíndricos huecos y utilizando un reloj comparador para medir las variaciones de longitud.

#### 4.4. Material e instrumental necesarios

Varillas huecas de 50 a 60 cm de longitud de distintos materiales

Baño de agua con termostizador y termómetro

Bomba y tubos flexibles para recircular el agua termostizada a través de las varillas

Reloj comparador

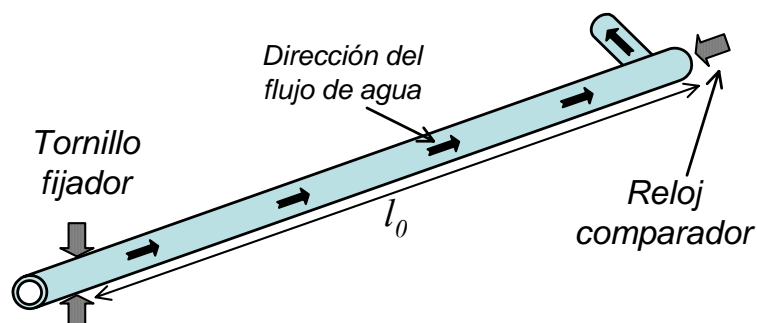
Soporte rígido donde fijar un extremo de la varilla y el reloj comparador en el otro extremo

Tubo flexible para evacuar el agua del baño y recipiente para verterla

Guantes gruesos para manipular objetos hasta 80 °C

#### 4.5. Protocolo para la realización práctica

Las varillas de material tienen un extremo cerrado para poder colocar el reloj comparador, por lo que el agua se hace circular por una salida lateral.



Un extremo de la varilla se sujeta con un tornillo a un soporte rígido. Al final del extremo libre se sitúa un reloj comparador cuyo cero se ajusta a la longitud de la varilla a la temperatura más baja. Es de utilidad que el soporte tenga dibujada una escala de longitud para determinar fácilmente la longitud inicial de las varillas ( $l_0$ ), esto es la distancia que hay entre el tornillo fijador de la varilla y el extremo libre en contacto con el reloj comparador.

El baño de agua (de unos 5 litros) debe disponer de una resistencia para calentar y un controlador de temperatura. Una pequeña bomba se utilizará para recircular el agua del baño a través de la varilla. El circuito se cierra con tubos flexibles de un material resistente al menos hasta 100 °C. También es de utilidad situar en el circuito dos llaves, una a cada extremo de la varilla, para bloquear el flujo de agua y evitar derrames cuando se cambie la varilla.

La temperatura se determina con un termómetro introducido directamente en el baño.

### **1- Familiarizarse con el montaje de la práctica:**

Observa el montaje de la práctica e identifica las distintas partes: varilla hueca de material, punto de fijación de la varilla, reloj comparador, circuito recirculador, llaves para interrumpir el paso del agua, bomba, termostato y termómetro.

El soporte donde está fijado el reloj comparador y la varilla está diseñado para una longitud de varillas de unos 600 mm. Determina la longitud de la varilla ( $l_0$ ) con ayuda de una cinta métrica y anota su valor en tu cuaderno con su correspondiente error instrumental.

Una varilla metálica (acero o aluminio) estará montada en el circuito.

### **2- Dilatación de una varilla metálica:**

Comprueba que las llaves que interrumpen el paso del agua están abiertas y enciende la bomba que recircula el agua pulsando el botón correspondiente.

Espera 5 minutos para que se establezca la temperatura del sistema. Anota entonces la temperatura que marca el termómetro del baño y coloca la esfera del reloj comparador en el cero.

Sube la temperatura del termostato hasta 30 °C. Cuando el termostato indique que se ha alcanzado dicha temperatura (la resistencia eléctrica deja de calentar), espera 5 minutos para que se establezca la temperatura de todo el sistema. Entonces anota la temperatura marcada por el termómetro y el valor marcado por el reloj comparador.

Repite la operación hasta tener las medidas a 30, 40, 50, 60, 70 y 80 °C para este material metálico.

### **3- Dilatación de una varilla cerámica:**

En segundo lugar se va a medir la dilatación en una varilla de vidrio. A estas temperaturas tan bajas, la dilatación del vidrio es tan pequeña que los errores experimentales que se cometen si procedemos del mismo modo que para la varilla metálica son muy altos, debido al propio calentamiento del reloj comparador y del soporte. Por tanto el experimento se realizará de este otro modo.

Todo el sistema está caliente de la medida anterior. Manteniendo el termostato en 80 °C, se apaga la bomba que hace circular el agua.

Luego se procede a cambiar la varilla metálica por la varilla de vidrio.

**Advertencia:** La varilla metálica y el agua están calientes. Utiliza guantes protectores para realizar este cambio.

### **¡PONTE GUANTES GRUESOS PARA CAMBIAR LA VARILLA METÁLICA!**

Para cambiar la varilla se cierran las llaves de paso situadas ambos lados de la varilla, se sacan los tubos flexibles de los extremos, se afloja el tornillo de sujeción y se extrae la varilla del soporte.

Coloca la varilla de vidrio en la misma posición y aprieta con suavidad el tornillo de sujeción. Conecta las gomas en los extremos para cerrar el circuito de agua.

### **Recuerda que el vidrio es un material muy frágil**

En cuanto esté colocada, se abren las llaves de paso y luego se conecta la bomba. Esperar 5 minutos y tomar la medida del termómetro y del reloj comparador. El reloj comparador debe estar presionando ligeramente la varilla, para lo cual debe marcar un valor mayor que cero.

Seguidamente apaga el termostato y la bomba. Lo más rápidamente posible procede a quitar el agua caliente del baño con ayuda de una manguerilla de silicona, echándola en la cubeta de plástico. Rellena el baño hasta el nivel marcado con agua fría y conecta de nuevo la bomba para hacerla circular.

A los 5 minutos anota el valor de la temperatura y del reloj comparador.

En este caso sólo disponemos de dos valores de longitud y temperatura para determinar el coeficiente de dilatación lineal.

### **4- Dilatación de una varilla de material compuesto de matriz polimérica:**

Por último, determinaremos el coeficiente de dilatación lineal de un material compuesto de matriz y fibra polimérica. La varilla es de color marrón.

Coloca la varilla en el sistema y utiliza el mismo procedimiento experimental descrito para la varilla metálica.

### **5- Dilatación de una varilla cerámica (2º medida):**

Si te sobra tiempo, una vez que se acabe con la varilla de material compuesto se puede aprovechar que el baño está caliente para repetir el experimento con la varilla de vidrio. De este modo se podrá estimar el error experimental que se está cometiendo con este procedimiento mediante la dispersión de los dos valores medidos.

### **4.6. Claves para el informe**

- Presentación en una tabla de las medidas de longitud y temperatura que se han tomado, con su correspondiente error instrumental.
- Representación gráfica de las mismas.
- Determinación de los coeficientes de dilatación lineal para cada uno de los tres materiales estudiados. Estimación del error asociado a la medida teniendo en cuenta el error asociado al ajuste lineal por mínimos cuadrados y la propagación de errores por derivadas parciales en las magnitudes derivadas.
- Comparar el coeficiente de dilatación lineal de estos tres materiales.
- Con los datos que se recogen en la siguiente tabla, identifica el material de la varilla metálica.

	$\alpha_l (10^{-6} K^{-1})$
Aluminio	22 (25 a 100 °C)
Latón	18 (25 a 100 °C)
Cobre	16 (25 a 100 °C)
Acero	11 (25 a 100 °C)
Vidrio Duran®	3.2 (25 a 100 °C)
Vidrio de SiO <sub>2</sub>	0.46 (25 a 100 °C)
Tufnol®	7.4 (-200 a 25 °C) 12.6 (25 a 800 °C)

- La varilla de vidrio utilizada es un vidrio tipo Duran ¿has obtenido un valor próximo al que se indica en la tabla? Si no ha sido así, ¿a que puede deberse la discrepancia?.
- El material compuesto se denomina comercialmente Tufnol. Compara el coeficiente de dilatación lineal que has obtenido con el que proporciona el fabricante y que también se indica en la tabla.