DESARROLLO DE UN DILATÓMETRO HORIZONTAL PARA BLOQUES PATRÓN

Héctor A. Castillo M., Marcos Mendoza R.
Centro Nacional de Metrología.
Km. 4,5 carretera a los Cues, El Marqués, 76241, Querétaro México.
(52 442) 2-11-05-00 ext. 3281, 3301, hcastill@cenam.mx, mmendoza@cenam.mx.

Resumen: Se ha desarrollado un sistema original para la medición del coeficiente de expansión térmica lineal (CLET) de bloques patrón plano paralelos. El instrumento realiza la medición en forma automática a partir de la medición del desplazamiento de las caras paralelas del bloque, el cual es colocado en forma horizontal. Dicha medición se realiza usando un interferómetro láser y sensores de temperatura colocados en el cuerpo del bloque, el cual cambia su temperatura por medio de un arreglo de calentadores eléctricos. El control de la estabilidad de la temperatura, la medición interferométrica, la medición de temperatura y el control del instrumento lo realiza una PC con secuencias preprogramadas de tal manera que la medición se lleva a cabo en forma automática e independiente del operador. La incertidumbre alcanzada se estima menor de 3 x 10^{-7} K^{-1} para bloques de 100 mm.
Se discuten los resultados obtenidos para bloques cortos, la optimización del tiempo de medición con respecto a otros métodos, la estabilidad térmica y mecánica, así como la capacidad de medición de objetos con forma diferente a la de bloques patrón.

1. INTRODUCCIÓN

La incertidumbre de medición cuando se usan bloques patrón largos, tiene su principal fuente, en la desviación con respecto a 20 ° C de la temperatura de medición, debido a que la corrección correspondiente a la deformación térmica depende directamente de la incertidumbre del coeficiente lineal de expansión térmica (CLET), por esta razón la determinación del CLET de bloques largos cobra relevancia para las calibraciones industriales y de laboratorio que involucran el uso de dichos bloques.

En el caso de los bloques cortos (menores de 100 mm) la determinación del CLET impacta directamente en la incertidumbre de calibración por comparación mecánica y en los diversos procedimientos de calibración que utilizan los bloques patrón como su referencia a nivel laboratorio.

Los sistemas existentes desarrollados para la medición de alta exactitud del CLET se basan en mediciones interferométricas con trasferencia de calor por radiación en cabinas al vacío [1], [2], [3].

Los intervalos de medición en general cubren entre 0 °C a 30 °C para medir CLET y hasta 525 °C para medir el comportamiento no lineal del coeficiente. La incertidumbre típica obtenida en mediciones al vacío es menor de 5 x 10^{-8} K^{-1} y los tiempos de medición son generalmente largos debido al método de trasferencia de calor por lo que una medición puede tomar mas de 10 horas.

Una aplicación adicional del instrumento desarrollado, es la caracterización en la expansión térmica de aceros y otros materiales metálicos y no metálicos. Con el único requerimiento para la medición de que la forma del espécimen sea muy similar a la de un bloque patrón y debe contar con caras de reflexión especular.

2. EL SISTEMA DE MEDICIÓN DESARROLLADO.

Debido a que el coeficiente de expansión térmica esta definido para una temperatura T como sigue:

$$\alpha_T = \frac{1}{L_o}\frac{dl}{dT}\Big|_T$$

Donde:
dl Cambio de longitud por expansión-contracción térmica (deformación térmica).
dT Cambio de temperatura.
Lo Longitud nominal.

El coeficiente α_T puede ser expresado como $\alpha_T = a + bT + cT^2 + ...$ de donde se tiene que para intervalos cortos de temperatura el coeficiente

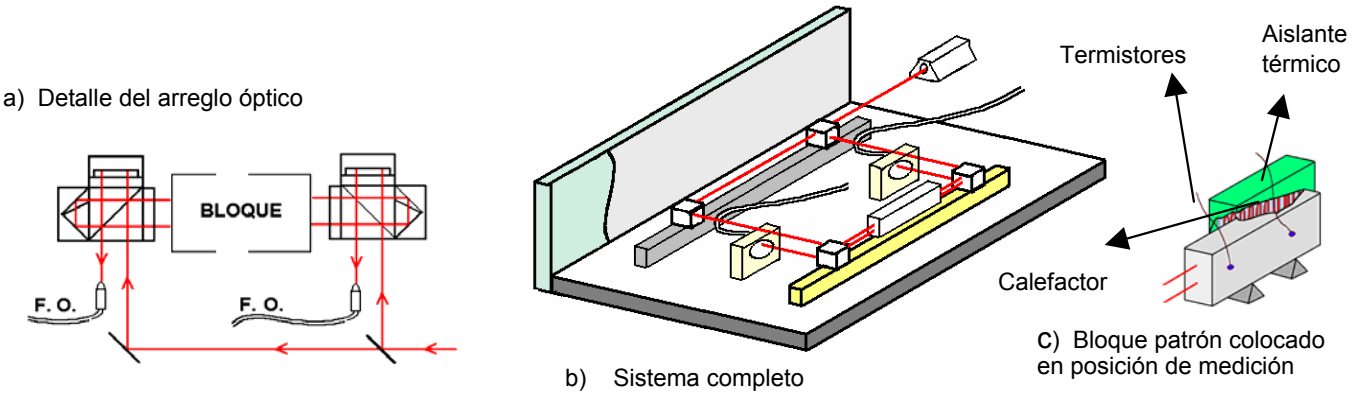

Figura 1 *– Esquema del sistema óptico de medición de desplazamiento.*

se reduce a la parte lineal la cual representa al coeficiente lineal de expansión térmica (CLET).

El dilatómetro esta basado en la medición del desplazamiento producido por la deformación térmica debida al cambio de temperatura, de tal forma que el desplazamiento y el intervalo de temperatura deben ser medidos simultáneamente para determinar el CLET

2.1. El arreglo interferométrico para medición de desplazamiento de las caras del bloque.

La colocación del bloque se realiza sin sujetar lo ni pegarlo para permitir la deformación longitudinal como muestra la figura 1-C, esto garantiza que el bloque no estará sujeto a esfuerzos mecánicos que pudieran generar algún tipo de deformación que afecte la medición; el bloque patrón se apoya en dos puntos de mínima deformación longitudinal junto con el calefactor y el aislante térmico.
El material de soporte usado como base de sujeción de los interferómetros es zerodur figura 1-b, el zerodur tiene un muy bajo coeficiente de expansión térmico (menor de 0,1 x 10^{-6} K^{-1}) de tal forma que se minimiza la incertidumbre en la posición de los interferómetros durante la medición. A fin de mantener estables las condiciones térmicas el dilatómetro esta contenido en una cabina construida con poliestireno expandido y aluminio. Todos los componentes internos están montados en guías para permitir alineaciones y sujeciones rápidas, a su vez las guías se han sujetado a una placa de acero que por su masa térmica impide cambios bruscos de temperatura dentro de la cabina.

El sistema óptico consta de dos arreglos ópticos de espejo plano de alta resolución como el que se muestra en la figura 1-a en este arreglo se utiliza la superficie del bloque patrón para reflejar los haces de medición, las señales se recogen con fibra óptica y se envían al sensor que esta fuera de la cabina del dilatómetro. En cada una de las caras del bloque inciden dos haces de tal forma que la resolución óptica del arreglo es de $\lambda/4$. La disposición del arreglo óptico iguala la trayectoria del haz de referencia y de medición dentro de los elementos de vidrio del arreglo a fin de minimizar la deriva térmica debida al sistema óptico. La cabeza láser también se encuentra fuera de la cabina y los haces se introducen a ella por medio de espejos.

2.2. El sistema de control y estabilidad térmica.

El sistema de control de la temperatura del bloque patrón cumple la función de elevar la temperatura del bloque a un valor deseado y mantener la máxima estabilidad de dicha temperatura. Consta de bobinas de alambre nicromel aisladas (figura 4-c), Las bobinas actúan como calefactores y para disminuir la temperatura se disminuye la aplicación de potencia hasta que por efecto de convección natural con el aire, disminuye la temperatura del bloque. La medición de temperatura se realiza por medio de cuatro termistores colocados en las caras laterales del bloque. Para la calibración y ajuste de los termistores se utiliza un dispositivo que tiene la forma de un bloque patrón de cobre pero que puede alojar un termómetro de resistencia de platino (TRP) y cuatro termistores, de esta forma se pueden calibrar los termistores en condiciones similares a las que miden.

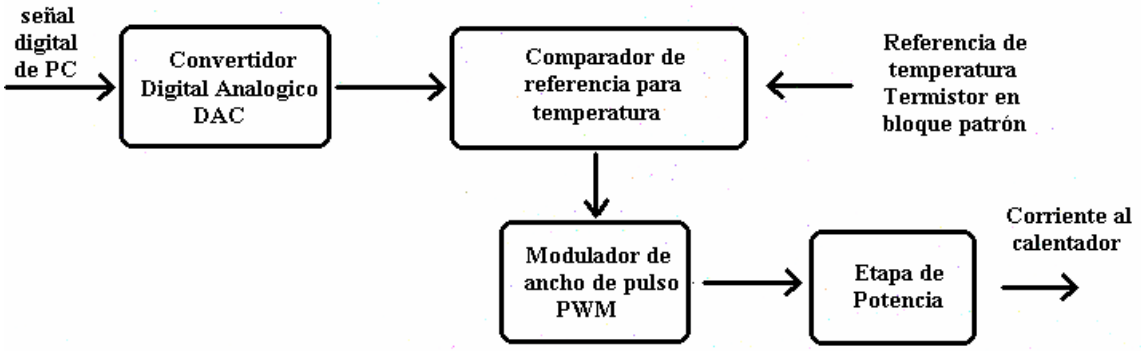

Figura 2 *– Esquema del sistema óptico de medición de desplazamiento.*

El valor de referencia de temperatura para el sistema de control, es ingresado como señal digital (TTL) al puerto de entrada, esta señal proviene de una PC vía la tarjeta NI4351. Dicha referencia es comparada con la temperatura de un termistor colocado en el bloque patrón. La corrección de la temperatura se realiza por medio de inyección de corriente pulsada al calentador y los pulsos son ajustados por medio de un modulador de ancho de pulso (PWM).

En la figura 2 se muestra un diagrama a bloques del circuito de control, es importante indicar que todas las fuentes de calor se encuentran fuera del volumen de medición a fin de obtener la máxima estabilidad térmica posible.
La potencia inyectada para elevar la temperatura de un bloque de acero de 100 mm de 20°C a 26 °C es menor de 0,6 W por lo que la temperatura del aire de la cabina tiene una afectación mínima.

2.3. El programa de medición y control.

El programa de medición ha sido implementado en Labwindows CVI versión 5.5 y cumple con las siguientes funciones:

a) Interface con el usuario para el ingreso de los datos generales de la medición
b) Programación de secuencias de medición por parte del usuario.
c) Ejecución de las secuencias de medición preprogramadas por el usuario
d) Control de los instrumentos de medición (adquisición de temperatura, interferómetro láser, control de temperatura del bloque y medición de condiciones ambientales)
e) Modo de monitoreo para caracterizar el comportamiento del instrumento.
f) Modo de calibración de sondas de temperaturas para ejecutar la rutina automática de calibración de termistores de medición usando como patrón un puente termométrico y TRP.

El programa controla los siguientes instrumentos; Una tarjeta de adquisición de datos con un convertidor analógico digital (ADC) de alta resolución NI4351.
Usando el puerto digital I/O de la tarjeta NI4351 se controla la temperatura del instrumento generando señales digitales enviadas al puerto digital del control de temperatura.
Controla la medición de desplazamiento de un interferómetro láser H.P. conectado a tres tarjetas de eje HP10885A, cada una de estas tarjetas es capaz de medir un eje de desplazamiento, la comunicación se realiza leyendo y escribiendo a nivel de registro.
Así mismo, por medio de una interface GPIB se controla un barómetro digital de alta exactitud.
Finalmente para realizar la calibración automática de los sensores de temperatura, se comunica con un puente termométrico F300 vía serial.

3. RESULTADOS OBTENIDOS

Para la caracterización del instrumento se realizaron pruebas de acuerdo a las siguientes etapas:

a) Operación correcta de todos los subsistemas.
b) Análisis de los parámetros de dependencia del desplazamiento.
c) Evaluación de la estabilidad térmica y mecánica del sistema de medición a través de la medición de la deriva de largo y corto periodo.
d) Resultados de medición sobre bloques de acero y carburo de tungsteno.

Los resultados obtenidos se describen a continuación

3.1. Operación de los subsistemas

Dicha operación fue verificada mediante el modulo de monitoreo implementado en el programa de medición, el cual genera archivos de datos conteniendo el comportamiento y operación de los sistemas para cada etapa de la medición. De acuerdo a estos datos, se encontró que el sistema de control térmico puede elevar la temperatura de un bloque de acero de 100 mm hasta alcanzar una banda de estabilidad de temperatura menor a 10 mK con duración de 20 minutos en un tiempo de aproximadamente 50 minutos, el desplazamiento de las caras del bloque sigue instantáneamente al cambio de temperatura y solo está limitado por la conductividad térmica del bloque. Un ciclo de medición de 21 °C a 25°C partiendo de la estabilidad térmica antes descrita en ambos puntos se realiza en 100 minutos. De tal forma que se pueden obtener 10 medición de CLET en aproximadamente 12 horas.
La longitud mínima de los bloques a medir a fin de conservar la incertidumbre de medición, es 20 mm para acero y 40 mm para carburo de tungsteno.

3.2. Parámetros de dependencia de la medición del desplazamiento de las caras del bloque.

La medición del desplazamiento de las caras del bloque esta afectado fuertemente por el cambio de índice de refracción dentro de la cabina lo cual es debido principalmente al cambio de presión atmosférica. La corrección por dicho cambio es proporcional a la longitud de camino muerto del arreglo óptico y es compensada durante la medición.
También el cambio de temperatura del arreglo óptico (interferómetros) introduce un error en la medición del orden de 1 nm /mK, por lo que se busca máxima estabilidad en la temperatura del arreglo a fin de minimizar la corrección correspondiente.
Por último, un factor que produce un error proporcional a la temperatura del bloque es el cambio de índice de refracción (debido principalmente al cambio de temperatura) en el volumen de aire en contacto con las caras del bloque patrón; se ha verificado que este fenómeno produce un error similar al del camino muerto pero con dependencia únicamente de la temperatura del bloque.
Los apoyos mecánicos del bloque, la alineación y las cadenas de medición de temperatura y desplazamiento tiene menor impacto en la incertidumbre de medición.

3.3. Mediciones de deriva de largo y corto periodo.

De acuerdo a las mediciones realizadas con las compensaciones propuestas, se ha obtenido una deriva máxima en temperatura de 15 mK durante 13 horas y en desplazamiento de 20 nm durante el mismo periodo de tiempo. En la figura 4 se muestra el comportamiento de la temperatura y el desplazamiento para un bloque de acero de 100 mm, durante una prueba de largo periodo. La escala vertical indica la temperatura de estabilización del bloque y se ha colocado el desplazamiento usando la misma escala solo para apreciar el intervalo de

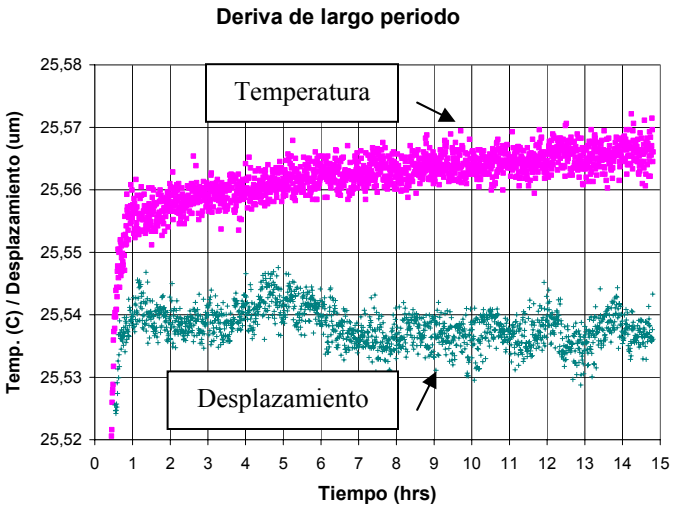

Figura 3 *– Deriva de largo periodo bloque 100 mm.*

3.4. Resultados de medición con bloques patrón.

Bloque patrón de Acero, 100 mm. marca Zeiss

No. de Día	INTERV. TEMP °C	No. Med.	CLET x 10^{-6} K^{-1}	Desv. Est. Mediciones
1	4,5	9	11,31	0,04
2	4,6	9	11,27	0,06
3	4,6	7	11,29	0,03
4	5	9	11,27	0,02
5	1,2 ; 2,4 ;3,6 ; 4,9	7	11,31	0,07
6	1,2 ; 2,4 ;3,6 ; 4,9; 6,2	11	11,24	0,04
7	8.5	9	11,33	0,02

Tabla 1 *– Resultados de medición para Acero*

Promedio de CLET 11,29 x 10^{-6} K^{-1}
Desviación estándar de la media 0,03 x 10^{-6} K^{-1}

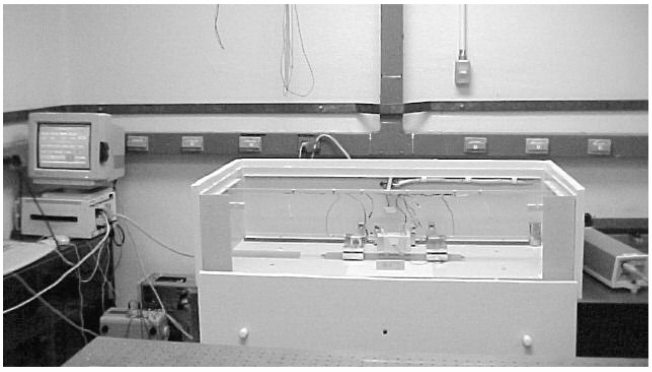
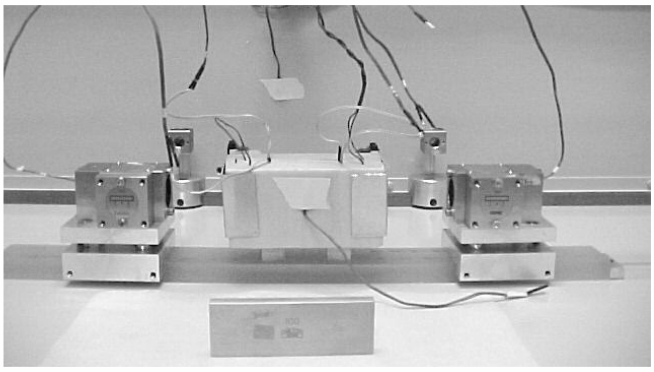

Figura 4 *– Vista del instrumento, arreglo óptico y bloque patrón de 100 mm para medición.*

No. de Día	INTERV. TEMP °C	No. Med.	CLET x 10^{-6} K^{-1}	Desv. Est. Mediciones
1	6,7	9	4,32	0,03
2	6,9	9	4,24	0,03
3	5,4	9	4,29	0,01
4	5,4	9	4,32	0,02
5	5,4	9	4,29	0,03
6	6,8	9	4,30	0,06
7	5,4	9	4,25	0,05
8	5,4	9	4,28	0,03
9	5,4	9	4,28	0,04
10	5,5	9	4,32	0,02

Tabla 2 *– Medición para Carburo de tungsteno*

Promedio de CLET 4,29 x 10^{-6} K^{-1}
Desviación estándar de la media 0,03 x 10^{-6} K^{-1}

En la segunda columna de las tablas 1 y 2, se describe el intervalo de medición de temperatura el cual normalmente esta comprendido entre 21°C y 26 °C. Se realizaron secuencias de medición con diferentes intervalos de temperatura, los cuales están indicados en los días 5 y 6 para el bloque de acero.
La tercera columna indica el número de ciclos completos medidos durante aproximadamente 13 hrs (por la noche).
La cuarta columna indica el valor promedio del CLET.
La quinta columna contiene la desviación estándar de la media de las mediciones promedio.

4. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

Debido a que se considera que la corrección por cambio de temperatura de los interferómetros, es el principal factor que influyen en la repetibilidad y reproducibilidad de las mediciones, es conveniente encaminar esfuerzos a la mejora en la estabilidad térmica del aire de la cabina.

Adicionalmente es posible realizar mediciones con apoyo en un extremo del bloque de tal forma que una cara permanezca estática mientras la otra experimenta la deformación térmica, y de este modo se pueda determinar en tiempo real el comportamiento del índice de refracción de las caras del bloque cuando se cambia su temperatura. Cabe mencionar que el error sistemático producido por este fenómeno es la principal contribución a la incertidumbre de la medición aun cuando no incide en la repetibilidad de los experimentos.

Los resultados alcanzados hasta el momento son satisfactorios y cumplen con los requerimientos planteados para el desarrollo del proyecto, sin embargo es de esperarse que puedan hacerse mejoras para obtener una incertidumbre menor al valor originalmente planteado de 0,5 x 10^{-6} K^{-1} para bloques de 100 mm.

El diseño del instrumento esta previsto para realizar mediciones de objetos con forma diferente a los bloques patrón, apoyados en los puntos de mínima deformación de Airy; sin embargo no se espera que estos apoyos tengan influencia sobre las mediciones de desplazamiento debido a que los posibles movimientos del mensurando son compensados por la medición diferencial del arreglo óptico. Los objetos con geometría diferente a los bloques patrón pueden ser medidos en el instrumento siempre que cuenten con caras paralelas con la máxima reflexión especular posible y cuya forma sea susceptible de ser aislada y controlada térmicamente con el esquema de control usado.

REFERENCIAS

[1] Wen-Mei Hou, Rudolf Thalmann,"Therma expansion measurement of gauge blocks", SPIE, **3477**,272-278 Part of the SPIE conference on recent developments in optical gauge block metrology,1998.

[2] M. Okaji, K.P. Birch,"Intercomparison of interferometric Dilatometers at NRLM and NPL", Metrologia, **28**,1991 27-32.

[3] M. Okaji, N. Yamada, H. Moriyama,"Ultra precise thermal expansion measurements of partially stabilized zirconia gage blocks with an interferometric dilatometer", 3477, 279-287, Part of the SPIE conference on recent developments in optical gauge block metrology., 1998.