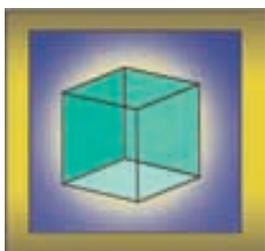


# Pruebas ópticas no destructivas



Las nuevas técnicas de medición en ambientes industriales, como la holografía digital y la interferometría electrónica de patrones de moteado, permiten obtener información sobre la deformación del objeto sin dañarlo.

**Fernando Mendoza Santoyo**

## INTRODUCCIÓN

**H**oy día el estado del arte de las técnicas ópticas no destructivas y su aplicación a la solución de problemas reales es tal que la inmensa mayoría de industrias en países desarrollados las utilizan en todos sus procesos de diseño y producción. Dos de estas técnicas, la interferometría electrónica de patrones de moteado y la holografía digital se han destacado como las de mayor potencial para la cuantificación en tres dimensiones de parámetros que caracterizan la operación y eficacia de un objeto, como desplazamientos y deformaciones, vibraciones, esfuerzos y fracturas (Shedin y colaboradores, 1999; Mendoza y colaboradores, 1999; Mendoza y colaboradores, 1989; Valera y colaboradores, 1992; Fröning y colaboradores, 1999). Una de las

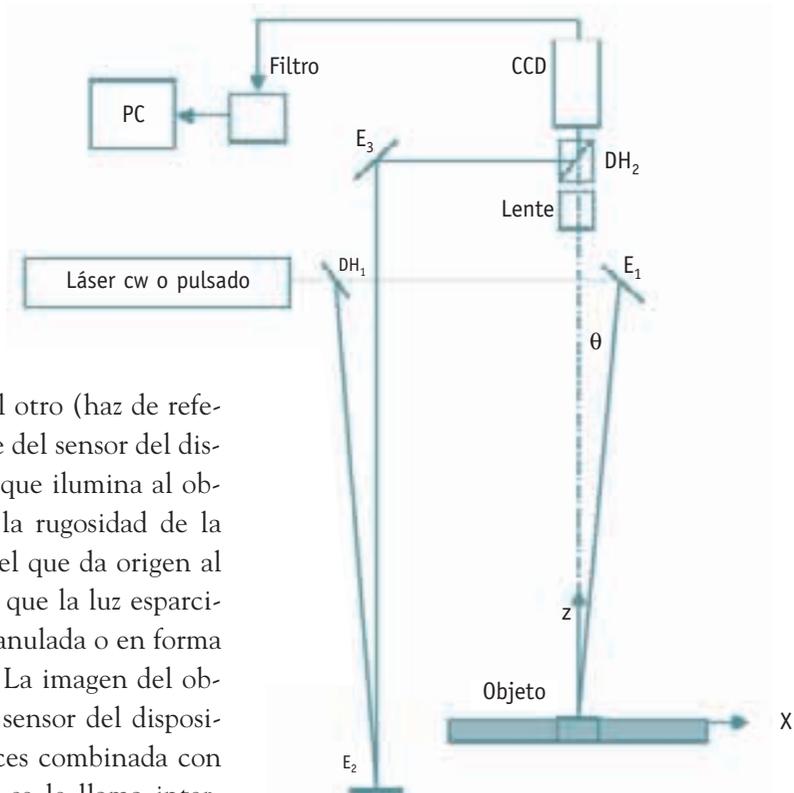
ventajas más sobresalientes es que los resultados que se obtienen al utilizar estas técnicas dan información sobre toda la superficie del objeto, y no sólo en puntos aislados, como sucede cuando se utilizan galgas extensiométricas en aplicaciones dentro de la ingeniería mecánica.

El interferómetro electrónico de patrones de moteado es un sistema que se origina en paralelo en el Reino Unido y en los Estados Unidos de Norteamérica (Butters y Leendertz, 1971; Macovski y colaboradores, 1971). La holografía digital es una versión simplificada de este sistema (Zou y colaboradores, 1996). El primer sistema tiene como ventaja que se pueden realizar pruebas cualitativas del objeto en tiempo real. Esto resulta de la observación del objeto a través de una cámara digital cuya imagen es vista, en un monitor de televisión, a razón de 30 cuadros por segundo. El segundo sistema ofrece la posibilidad de obtener datos sobre la dirección de desplazamiento o deformación del objeto sin necesidad de sistemas optomecánicos adicionales, que son necesarios en el primer sistema. Así, ambos se complementan para dar como resultado un instrumento para la caracterización cuantitativa de pará-

metros de gran utilidad en los sectores científico, académico e industrial.

La figura 1 muestra un esquema típico del arreglo óptico utilizado en ambas técnicas. Dependiendo de las circunstancias que rodeen al objeto y los datos que se requieran obtener del mismo, es posible utilizar un láser de onda continua o uno pulsado. Para la observación cualitativa en tiempo real de desplazamientos o deformaciones en el objeto, es posible utilizar cámaras de dispositivo de acoplamiento de carga (CCD, *charge coupled device*) de 30 cuadros por segundo, con resoluciones de  $512 \times 512$  píxeles, aunque hoy día es posible utilizar cámaras de hasta 4 mil cuadros por segundo con resolución de  $256 \times 256$  píxeles. El haz láser es dividido en dos; un haz se utiliza para iluminar al objeto (haz objeto) y el otro (haz de referencia) se lleva directamente a la superficie del sensor del dispositivo de acoplamiento de carga. El haz que ilumina al objeto es esparcido, no reflejado, debido a la rugosidad de la superficie. Este esparcimiento de la luz es el que da origen al terminado moteado del interferómetro, ya que la luz esparcida por el objeto no se ve uniforme, sino granulada o en forma de pequeñas manchas irregulares o motas. La imagen del objeto, formada por una lente, es llevada al sensor del dispositivo de acoplamiento de carga y es entonces combinada con el haz de referencia. A esta combinación se le llama interferencia.

La interferencia de los haces objeto y referencia se digitaliza y almacena en una computadora personal que exhibe en un monitor, en tiempo real, esta combinación de haces. Los resultados que se observan en el monitor, correspondientes al desplazamiento del objeto, se logran por comparación, ya sea por substracción, adición o multiplicación. Es decir, se almacena en primera instancia la interferencia de haces para el estado inicial del objeto (sea dicho estado arbitrario o conocido, de acuerdo al experimento), y se compara con la interferencia de haces que se obtiene para estados subsecuentes del objeto. Esta comparación se realiza en tiempo real, a razón de 30 cuadros por segundo, y da como resultado franjas de interferencia que pueden ser analizadas cualitativamente. Las franjas de interferencia se manifiestan como líneas de ancho definido, que varían en intensidad desde un máximo hasta cero. Estas franjas contienen información sobre la amplitud



**Figura 1.** Arreglo experimental.  $E_1$ ,  $E_2$  y  $E_3$  son espejos,  $DH_1$  y  $DH_2$  son divisores de haz.

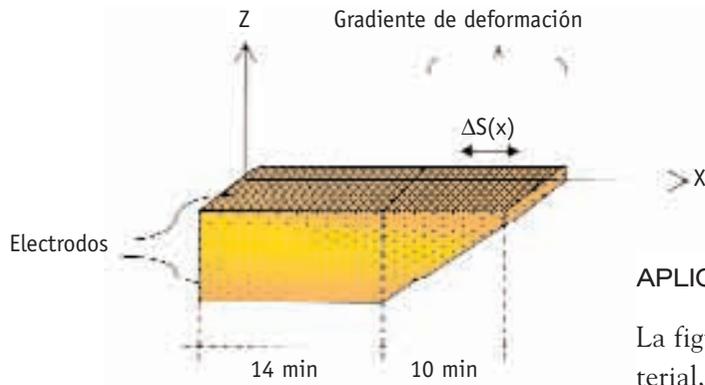


Figura 2a.

y dirección del desplazamiento o deformación del objeto. El análisis cuantitativo en tres dimensiones requiere que el objeto se ilumine desde tres direcciones diferentes (Schedin y colaboradores, 1999).

APLICACIONES

La figura 2a muestra un elemento piezoeléctrico (un material, por ejemplo cuarzo, que genera una carga eléctrica cuando es deformado mecánicamente, y viceversa) que forma parte de un sensor de voltaje diseñado con fibras ópticas que tienen grabadas en ellas rejillas de Bragg. (Una rejilla de Bragg consiste en líneas paralelas que se graban, usando luz ultravioleta, en el corazón de las fibras ópticas, para variar de forma periódica su índice de refracción, el cual controla parámetros característicos de la fibra, como la velocidad de transmisión de la luz). El diseño del elemento permite que

cuando se le aplique un voltaje de un kilovolt de corriente directa produzca en la rejilla de Bragg, inscrita en la fibra, una elongación proporcional al voltaje. La figura 2b muestra el resultado cuantitativo proveniente de las técnicas aquí mencionadas: una combinación de la deformación sobre el ancho y largo de la superficie del elemento. Se nota que el comportamiento real del elemento piezoeléctrico es el deseado; o sea, que el voltaje aplicado estira al elemento piezoeléctrico longitudinalmente.

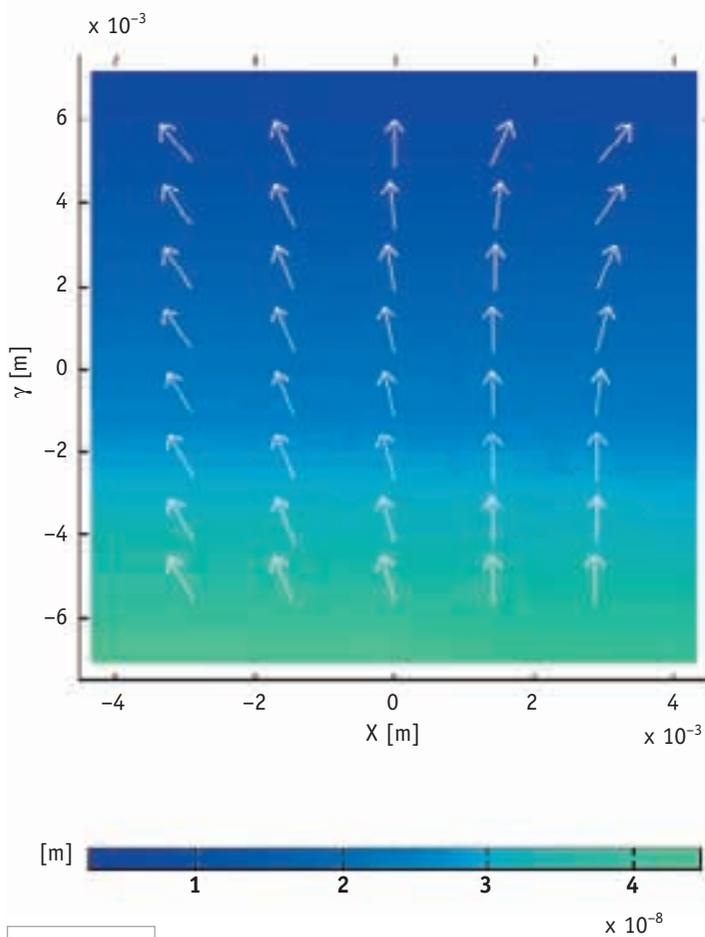
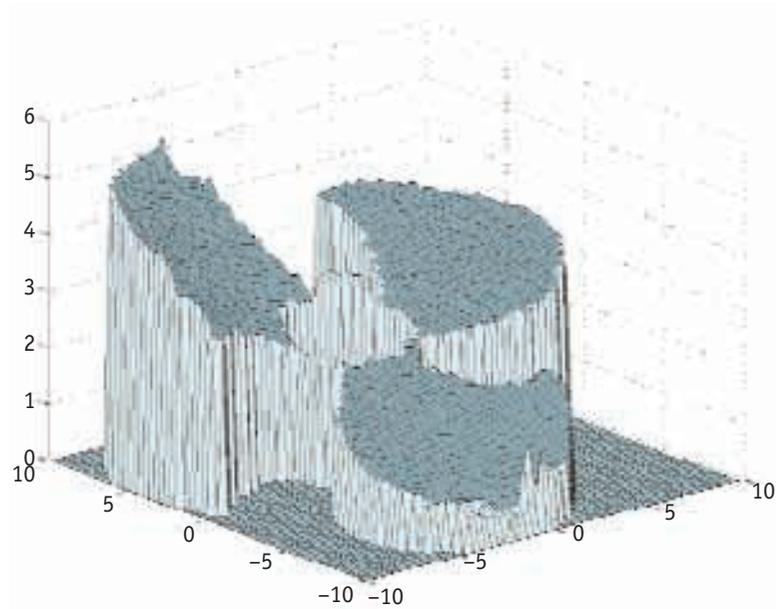


Figura 2b.

La figura 3a muestra las llamadas franjas de fase, que son líneas o contornos de ancho definido que, además de mostrar el tamaño del desplazamiento, muestran la dirección del mismo. Corresponden a un juego de alabes en rotación a mil 360 revoluciones por minuto. Nótese que no es necesario detener la rotación del objeto para poder analizarlo. Ésta es una ventaja obvia sobre los métodos convencionales, por ejemplo el de telemetría, que requiere detener el objeto en rotación, para poder instrumentar esta prueba con el objeto estacionario. La figura 3b es la interpretación de la deformación fuera del plano de la superficie de los alabes; o sea, en



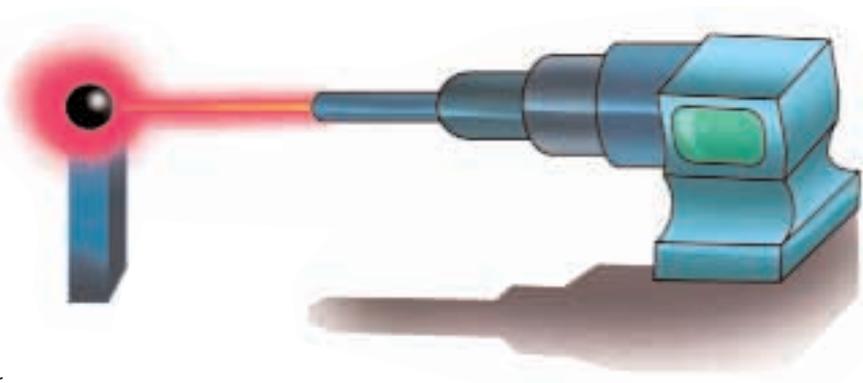
Figuras 3a. y 3b.

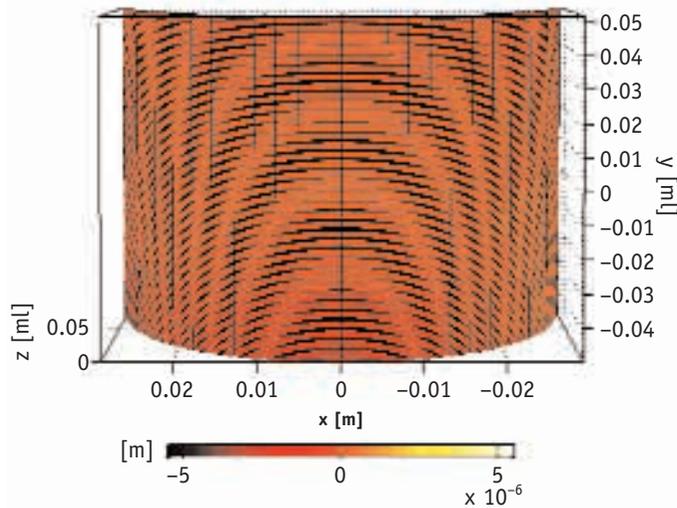
la dirección normal a los alabes. El eje vertical está en micrómetros (milésimas de milímetro), y los horizontales en centímetros.

Un último ejemplo se muestra en la figura 4. Corresponde a un cilindro que tiene un defecto en su superficie interior. El objetivo de aplicar las pruebas antes descritas es localizar este defecto al observar el cilindro en su parte exterior. El problema se resuelve analizando las deformaciones que sufre el cilindro en las direcciones X, Y y Z cuando entra en uno de sus modos de resonancia a 4 mil 900 hertz (ciclos por segundo). Los ejes coordenados se muestran en la figura

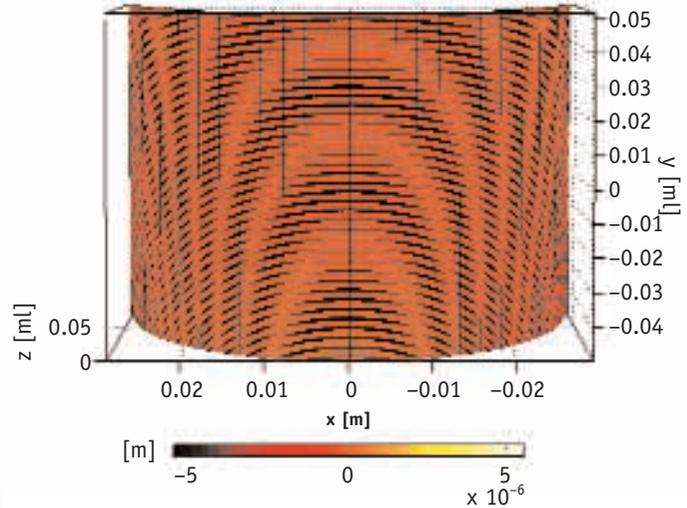
1, con el eje Y perpendicular al plano de la misma. Las figuras 4a y b muestran la deformación del cilindro a lo largo de los ejes X y Z. La deformación es uniforme y no se puede notar el defecto. Sin embargo, la figura 4c muestra la deformación del cilindro a lo largo del eje Y, pudiéndose observar una cambio significativo en la deformación, que indica un defecto en la estructura del cilindro.

Lo anterior se corrobora realizando una inspección visual de la superficie interior del cilindro.

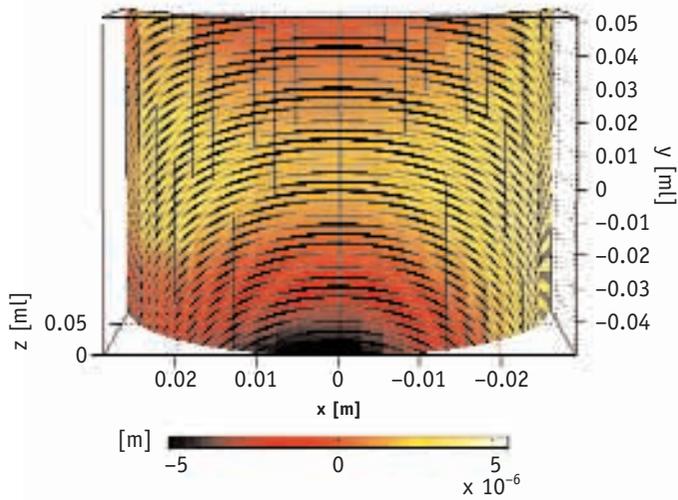




**Figura 4a.** Deformación a lo largo del eje X, horizontal en la figura.



**Figura 4b.** Deformación a lo largo del eje Z, normal al plano de la figura.



**Figura 4c.** Deformación a lo largo del eje Y, vertical en la figura.

### CONCLUSIONES

Las dos pruebas ópticas no destructivas que se presentan son de aplicación rutinaria en todo tipo de industrias, ya sea para producción como para diseño. De ellas se obtienen datos cualitativos en tiempo real, útiles en una etapa temprana de caracterización del desempeño de objetos. Los resultados cuantitativos en tres dimensiones se obtienen en menos de 15 segundos, y se espera que este tiempo se reduzca con el avance tecnológico en computación. Las técnicas pueden utilizarse en objetos que van de tamaños muy pequeños, micrométricos, hasta objetos muy grandes, con varios metros cuadrados de superficie.

El trabajo de investigación y desarrollo para los resultados que aquí se presentan fue parcialmente financiado por Conacyt, proyecto 32709-A. Los resultados que se muestran están contenidos en las tesis de los estudiantes Carlos Pérez López, Mario Pacheco y Tonatiuh Saucedo Anaya.

## Bibliografía

- Butters J. N. y J. A. Leendertz (1971), "A double exposure technique for speckle pattern interferometry", *Journal of Physics E*, 4, págs. 277-279.
- Macovski A., S.D. Ramsey y L.F. Schaefer (1971), "Time-lapse interferometry and contouring using television systems", *Applied Optics*, 10 (12), págs. 2722-2727.
- Mendoza Santoyo F., G. Pedrini, Ph. Fröning, H. J. Tiziani, y P. H. Kulla (1999), "Comparison of double-pulse digital holography and HP-FEM measurements", *Optics and Lasers in Engineering*, 32 (6), págs. 529-536.
- Mendoza Santoyo F., D. Kerr, J. R. Tyrer y T. C. West (1989), "A novel approach to whole field vibration analysis using a pulsed laser system", en G. M. Morris (editor), *Holographic Optics II: Principles and Applications*, SPIE 1136, págs. 335-345.
- Fröning, Ph., G. Pedrini, H.J. Tiziani y Mendoza Santoyo F. (1999), "Vibration mode separation of transient phenomena using multi-pulse digital holography", *Optical Engineering*, 38 (12), págs. 2062-2068.
- Schedin S., G. Pedrini, H. J. Tiziani y F. Mendoza Santoyo (1999), "Simultaneous 3D dynamic measurements using pulsed digital holography", *Applied Optics*, 38 (34), págs. 7056-7062.
- Valera J. D., A. F. Doval y J. D. C. Jones (1992), "Determination of vibration phase with electronic speckle pattern interferometry", *Electronic Letters*, 28, pp. 2292-2294.
- Zou Y. L., G. Pedrini y H. J. Tiziani (1996), "Two-wavelength contouring with a pulsed ruby laser by employing TV-holography", *Journal of Modern Optics*, 43, pp. 639-646.

---

**Fernando Mendoza Santoyo** estudió la carrera de Física en la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Ixtapalapa; la maestría en Óptica Aplicada en el Imperial College de Londres, y el doctorado en Óptica Aplicada en la Universidad de Loughborough, Inglaterra. Fue consultor para British Aerospace, Rolls Royce, Metal Box y Spectron Laser Systems. Recientemente la Universidad de Stuttgart, Alemania, le otorgó la posición de profesor visitante para trabajar en un proyecto financiado por la Comunidad Económica Europea. Fue fundador del grupo de metrología óptica, y co-fundador del grupo de fibras ópticas, ambos en el Centro de Investigaciones en Óptica, del cual actualmente es director general.  
fmendoza@foton.cio.mx