

# INTERFEROMETRÍA DE SPECKLE APLICADA A LA INGENIERÍA CIVIL

ROLANDO GONZÁLEZ-PEÑA

Licenciado en Física y Master en Ciencia, especialidad de Óptica y Laser  
Departamento de Física. Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría" (ISPJAE)  
Apartado Postal 6028, CP 19390, Ciudad de La Habana, Cuba

**RESUMEN:** La interferometría de speckle ha sido introducida en la Ingeniería Civil en Cuba a partir de 1988 como una técnica útil en el trabajo de investigación. Este artículo describe algunas aplicaciones de esta técnica de ensayo no destructivo en la Ingeniería Civil. La speckle fotografía ha sido utilizada para estudiar deformación en tímpanos, así como en el estudio de un modelo de edificio bajo la acción de cargas concentradas. El comportamiento de estas estructuras es modelado por el método de elementos finitos. La interferometría de patrones de speckle electrónicos (ESPI) ha sido usada para la medición del módulo de Young en morteros y probetas de hormigón. Para tal propósito una viga de dimensiones conocidas, se fija a su centro y en uno de sus extremos se excita con un transductor piezoeléctrico. Mediante el fenómeno de resonancia longitudinal y observando los patrones de franjas se estiman indirectamente los valores del modulo de Young.

**PALABRAS CLAVE:** ESTRUCTURAS. SPECKLE. CUBA. INTERFEROMETRÍA.

**ABSTRACT:** The speckle pattern interferometer was first applied in Cuba as a research technique in Civil Engineering in 1998. This article describes some of the applications of this non-destructive testing technique in the field of civil engineering. Speckle photography has been employed in a wide ranging number of applications from the study of eardrum deflections to the monitoring of a building model under concentrated loads. The behaviour of these structures is modelled by the finite element method. The electronic speckle pattern interferometer (ESPI) has been employed for the measurement of the Young's Modulus in concrete cylinder specimens and mortars. As such, a beam of known dimension is supported at its centre and excited by a piezoelectric transducer at one of its ends. The value of the Young's Modulus is then indirectly obtained from the longitudinal resonance and the recording of strip patterns.

**KEYWORDS:** STRUCTURES. SPECKLE. CUBA. INTERFEROMETER.

## 1. INTRODUCCIÓN

La Interferometría de speckle es una herramienta en la metrología óptica, particularmente en la medición de deformaciones y desplazamientos.<sup>1</sup> Una ventaja de esta técnica comparada con métodos convencionales, tales como los "strain gauge" es que se pueden medir desplazamientos en varios puntos simultáneamente, así como

que no hay contacto directo con el objeto de estudio, lo cual no permite el cambio de las propiedades del mismo.<sup>2</sup>

Algunos autores han aplicado estas técnicas en la Ingeniería Civil, por ejemplo: en la evaluación de materiales de construcción,<sup>3</sup> en el estudio de fracturas en morte-

(1) R. Arizaga, H. Rabal and M. Trivi, "Simultaneous multiple-viewpoint processing in digital speckle pattern interferometry," *Appl. Optics*, 33, pp. 4369-4372, 1994.

(2) L. Benckert, M. Jonsson and N.E. Molin, "Measuring true in-plane displacements of a surface by stereoscopic white-light speckle photography," *Opt. Eng.* 26, pp. 167-169, 1987.

(3) M. Facchini and P. Zanetta, "A Electronic Speckle Pattern Interferometry in-plane system applied to the evaluation of mechanical characterisation of masonry," *Meas. Sci. Tech* 6, pp. 1260-1269, 1995.

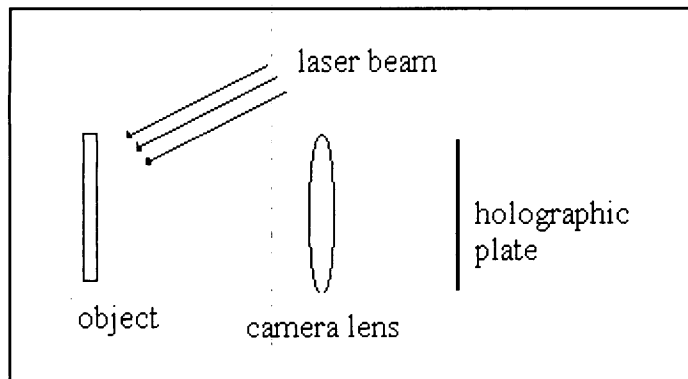


Figura 1: Esquema experimental para la obtención de la fotografía de speckle de doble exposición.

ros y vigas de hormigón,<sup>4,6</sup> en la medición de módulos de Young,<sup>7</sup> en la medición de deformaciones en edificios in situ,<sup>8</sup> etc.

El empleo de modelos estructurales en el laboratorio permite predecir el comportamiento de grandes estructuras. En este trabajo empleamos las técnicas de speckle fotografía para la medición de desplazamientos en dos tímpanos, con condiciones de empotramiento diferentes y en un modelo de edificio sometido a cargas estáticas. Además se aplica la técnica ESPI en la medición del modulo de Young. Los resultados experimentales obtenidos se comparan por el método de elementos finitos (MEF).

### 1.1. Experimento

#### 1.1.1. Speckle fotografía

El objeto en estudio se ilumina con un láser He-Ne (Spectra-Physics) dando lugar a la formación de un patrón de puntos brillantes y oscuros (patrón de speckle). Mediante un sistema fotográfico u objetivo fotográfico (apertura F= 2.8 y aumento M<sub>1</sub>= 0.42) se registra la imagen del objeto en reposo, con la estructura de speckle, en una película de alta resolución 10E75 Agfa Gevaert (figura 1). Una segunda exposición se realiza cuando se aplica una determinada carga. La fotografía que se obtiene contiene dos patrones de speckle invisibles correspondientes a dos estados diferentes de cargas. Realizando un barrido por ca-

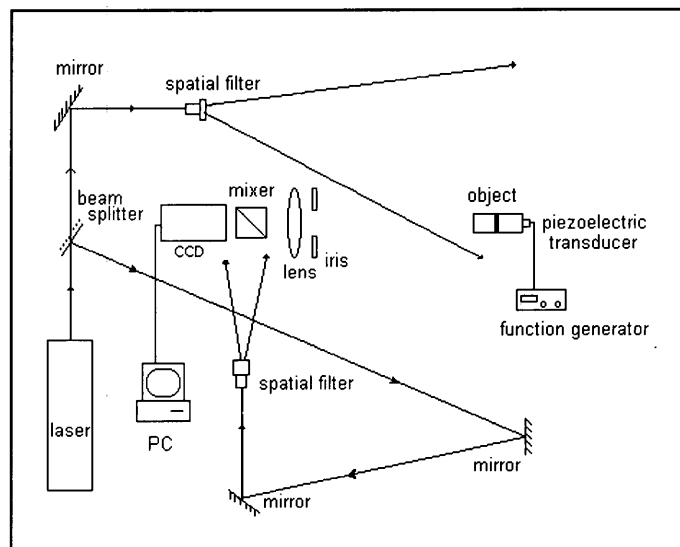


Figura 2: Sistema experimental ESPI para la determinación de desplazamientos en el plano.

da punto de la fotografía, se pueden medir los desplazamientos en el objeto.<sup>9, 10</sup>

Un haz de láser estrecho se hace pasar directamente a través de la fotografía de speckle, cada par de speckle homologa difractara la luz y formará un patrón de franjas de Young en una pantalla. La magnitud de los desplazamientos en el plano **d** es inversamente proporcional al periodo de dichas franjas (y según:

$$d = \frac{\lambda L}{M_1 M_2 \Delta y} \quad (1)$$

Donde L= 114 mm es la distancia entre la fotografía y la pantalla, M<sub>2</sub>= 0.65 mm/píxel factor de ampliación de la cámara CCD, λ= 633 nm es la longitud de onda de la luz de láser.

Las franjas de Young proyectadas en la pantalla son captadas por una cámara CCD. La imagen es grabada y mediante un "software" (Dephi 2.0) se miden los periodos y orientación de cada patrón de franjas, para estimar las componentes del desplazamiento en el plano.<sup>11</sup>

#### 1.1.2. Sistema ESPI

La figura 2 muestra el arreglo experimental del sistema ESPI de doble iluminación. La superficie rugosa del objeto

(4) A. Lagarde and M. Cottron, "Optical Method Applied to Investigation of Fracture Mechanics," *Proceeding SPIE 2342 Photomechanics*, pp. 188-200, 1994.  
 (5) C. Shaker and R. Doraiswami, "Study of motion of crack faces, load point displacement stress intensity factor and plastic zone size by using laser speckle photography," *J. Optics (Paris)* 27, pp. 61-70, 1996.  
 (6) B. Mobasher, A. Castro-Montero and S.P. Shah, "A study of fracture in fiber-reinforced cement-based composites using laser holographic interferometry," *Exp. Mech.*, pp. 286-294, 1990.  
 (7) D.T Read, " Young's modulus of thin films by speckle interferometry," *Meas. Sci. Tech.* 9, pp. 676-685, 1998.  
 (8) G. Gulker, K.D. Hinsch, C. Holscher, A. Kramer and H. Neumaber, "Electronic Speckle Pattern Interferometry System for in situ deformation monitoring on building," *Opt. Eng.* 29, pp. 816-820, 1990.

(9) R.S. Sirohi, *Optical components, measurement techniques, and systems*. Ed. Marcel Dekker, 1991.  
 (10) A.K. Maji and S.P. Shah, "Laser Interferometry Method," RILEM COMMITTEE 89-FMT Report, 1990.  
 (11) M. Buendía, R. Cibrián, R. Salvador, C. Roldán and J.M. Iñesta, "Automatic analysis of speckle photography fringes," *Appl. Optics* 36, pp. 2395-2400, 1997.

es iluminada por dos haces colimados que forma un ángulo  $\alpha$  con la normal a dicha superficie. La imagen del objeto es recogida por medio de una cámara CCD (Modelo SSC-M370 CE, 582x752 pixeles de resolución), la cual detecta la interferencia de los patrones de speckle que se forman por ambos haces de iluminación. La correlación de ambos patrones da lugar a una imagen de referencia, que queda registrada en la memoria de la computadora. Esta imagen se sustrae automáticamente a cada imagen que capta la cámara una vez que el objeto se empieza a deformar. Como resultado se puede visualizar en la pantalla de un monitor una imagen del objeto con un patrón de franjas en tiempo real.

1.1.3. Método de elementos finitos

El programa ANSYS (versión 5.4) fue empleado para la modelación matemática de las estructuras analizadas. Se aplicaron tres elementos SHELL63, SOLID45 y SOLID92. Los cuales presentan cuatro, ocho y diez nodos respectivamente. Los elementos SOLID45 y SOLID92 presentan 3 grados de libertad en cada nodo, así como el SHELL63 tiene 6 grados de libertad.

2. RESULTADOS

2.1.1. Medición de desplazamientos en un modelo de edificio.

El modelo de edificio empleado (figura 3) tiene una estructura, compleja con forma de esqueleto, formado por tímpanos internos y externos cuya combinación hace más sólida y rígida la estructura. Los tímpanos internos en la vista lateral están colocados más cerca del eje de rotación que los ubicados en la vista frontal, esto es muy importante para la estabilidad del edificio.

El modelo (proyecto IMS-18.3-PVYC) fue construido con acrílico comercial ( $E = 3.11 \text{ GPa}$ , coeficiente de Poisson = 0.36) fijado en su parte inferior. Las dimensiones de los tímpanos son ancho = 11 mm, altura = 351.3 mm, y espesor = 3 mm. Las cargas que se aplicaron en la parte superior fueron de 6.6 N y 8.6 N respectivamente.

Las tensiones y los desplazamientos en la dirección horizontal son iguales en los puntos de intercepción de cada tímpano y cada nivel o piso del modelo, esto demuestra la rigidez de los niveles y del modelo en sí.

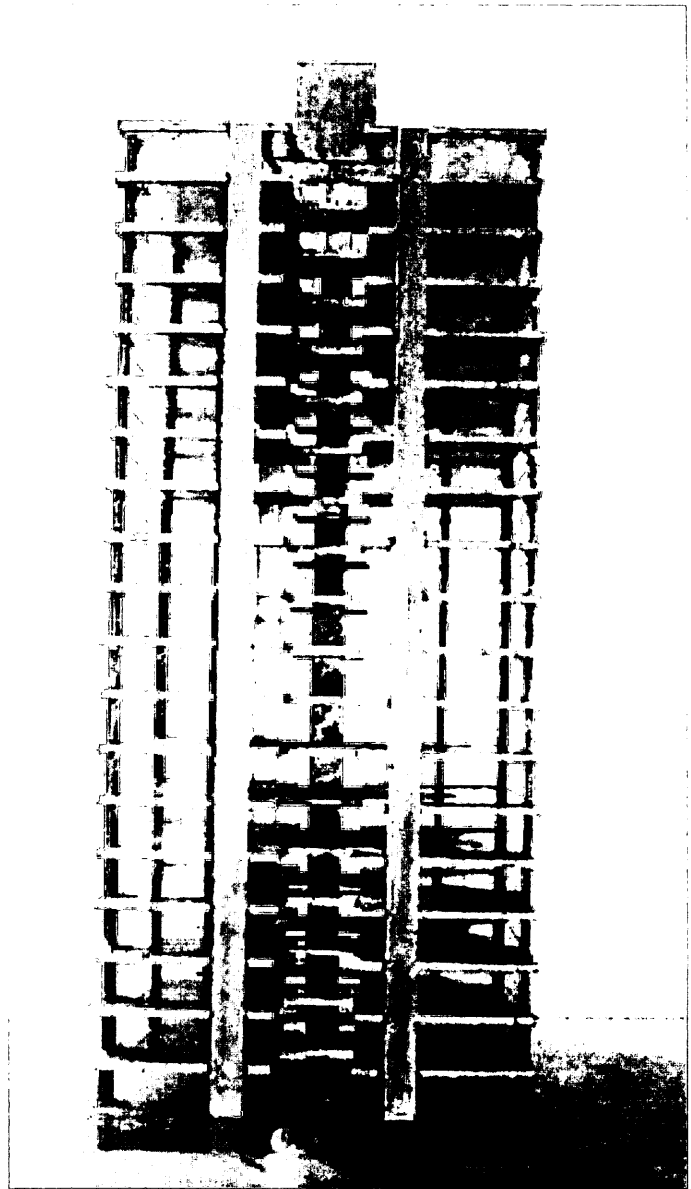


Figura 3: Vista de un modelo de edificio a escala reducida.

TABLA 1: DESPLAZAMIENTOS EN LA VISTA FRONTAL (mM)

a) Fotografía de speckle							
Piso	1	2	3	4	5	6	7
10	49.8 ± 2.5	48.4 ± 2.4	48.9 ± 2.4	49.2 ± 2.5	49.5 ± 2.5	49.7 ± 2.5	49.4 ± 2.5
12	61.1 ± 3.1	60.3 ± 3.0	58.2 ± 2.9	57.9 ± 2.9	60.6 ± 3.3	58.5 ± 2.9	58.7 ± 2.9
14	74.6 ± 3.8	74.2 ± 3.7	71.7 ± 3.6	73.8 ± 3.4	74.0 ± 3.7	74.1 ± 3.7	73.2 ± 3.7
b) Método de elementos finitos							
Piso	1	2	3	4	5	6	7
10	47.7	47.7	47.7	47.7	47.7	47.7	47.7
12	60.3	60.3	60.3	60.3	60.3	60.3	60.3
14	72.7	72.7	72.7	72.7	72.7	72.7	72.7

**TABLA 2:**  
DESPLAZAMIENTOS EN CADA VISTA  
DEL MODELO DE EDIFICIO (mm)

Piso	Frontal	Lateral
10	49.3	54.1
12	59.3	70.6
14	73.7	89.4

**TABLA 3: RELACION FLECHA  
MÁXIMA/CARGA APLICADA**

Vista	Carga (N)	R (mm / N)
Frontal	6.60	13.9
	8.75	13.5
Lateral	6.62	18.7
	8.57	17.6

**TABLA 5:**  
DESPLAZAMIENTOS EN TIMPANO  
SEMI - EMPOTRADO

Puntos	Fotografía de speckle		ANSYS	
	U <sub>x</sub> (mm)	U <sub>y</sub> (mm)	U <sub>x</sub> (mm)	U <sub>y</sub> (mm)
1	0.00674	0.01668	0.00220	0.01920
2	0.00588	0.02049	0.00220	0.01920
3	0.00644	0.01770	0.00220	0.01920
4	0.00237	0.00886	0.00220	0.01700
5	0.00499	0.01304	0.00430	0.01700
6	0.00554	0.01521	0.00320	0.01700
7	0.00688	0.01192	0.00430	0.01700
8	0.00655	0.01135	0.00430	0.01490
9	0.00380	0.00992	0.00430	0.01490
10	0.00674	0.01168	0.00430	0.01490
11	0.00123	0.00903	0.00160	0.01050
12	0.00091	0.00728	0.00120	0.00850
13	0.00148	0.00983	0.00120	0.00850
14	0.00029	0.00558	0.00120	0.00530
15	0.00014	0.00398	0.00120	0.00420
16	0.00027	0.00236	0.00023	0.00220
17	0.00015	0.00174	0.00017	0.00200
18	0.00045	0.00511	0.00005	0.00150
19	0.00013	0.00151	0.00010	0.00150

**TABLA 4: DESPLAZAMIENTOS EN EL TIMPANO EMPOTRADO**

Puntos	Fotografía de speckle		Interferometría holográfica		ANSYS	
	U <sub>x</sub> (mm)	U <sub>y</sub> (mm)	U <sub>x</sub> (mm)	U <sub>y</sub> (mm)	U <sub>x</sub> (mm)	U <sub>y</sub> (mm)
1	0.00453	0.00208	0.00160	0.00231	0.00453	0.00156
2	0.00575	0.00175	0.00352	0.00116	0.00418	0.00024
3	0.00812	0.00223	0.00360	0.00064	0.00474	0.00115
4	0.00449	0.00098	0.00322	0.00069	0.00308	0.00024
5	0.00077	0.00067	0.00075	0.00045	0.00032	0.00063
6	0.00208	0.00037	0.00111	0.00086	0.00119	0.00024
7	0.00348	0.00116	0.00136	0.00101	0.00142	0.00115
8	0.00040	0.00037	0.00034	0.00056	0.00032	0.00024

Una comparación entre los valores experimentales y los obtenidos por el método de elementos finitos para la vista frontal, se muestran en la tabla 1. Se observa que estos últimos están dentro del intervalo de confianza estimado para el método óptico.

Los desplazamientos horizontales obtenidos por la fotografía de speckle, en cada vista del modelo en los puntos de unión de cada tímpano con cada nivel, se muestran en la tabla 2. Los desplazamientos correspondientes a la vista lateral son mayores que los de la vista frontal, ya que el modelo tiene menos rigidez en esa vista debido a que los tímpanos están más cerca del eje de rotación. La relación flecha máxima - carga aplicada en ambas vistas no depende de la fuerza aplicada y solo es función de la geometría del modelo y de sus parámetros elásticos (tabla 3).

2.1.2. Comportamientos de tímpanos

Los modelos de tímpanos empleados fueron realizados en acrílico transparente pintados de color blanco (E= 3.19

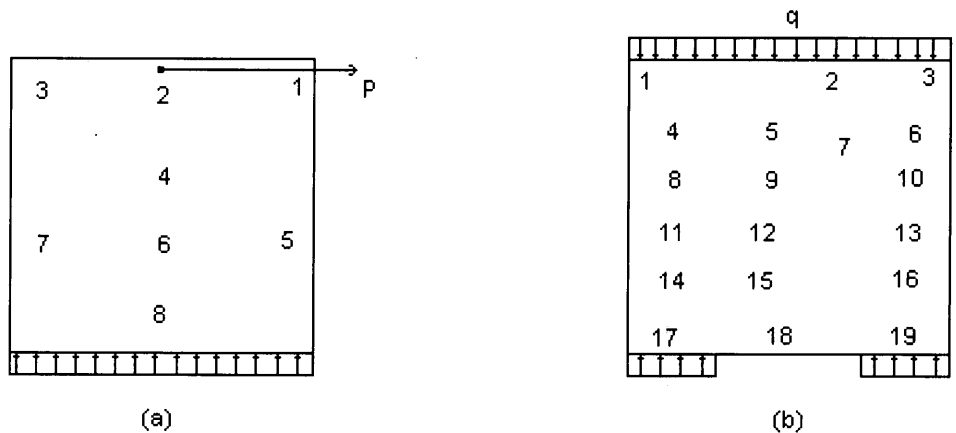


Figura 4: Esquema de dos vigas pared o tímpanos con diferentes condiciones de empotramiento.

GPa, coeficiente de Poisson = 0.36 y densidad = 1.030 kg./m). Sus dimensiones son 100x100x3 mm y 200x200x3 mm respectivamente. Uno de los tímpanos fue empotrado en su parte inferior, mientras que el otro fue empotrado en dos puntos de su parte inferior (figura 4). Las cargas aplicadas fueron 0.7 y 1.5 N respectivamente. Los resultados experimentales obtenidos por speckle fotografía, así como los obtenidos por la modelación matemática se muestran en las tablas 4 y 5.

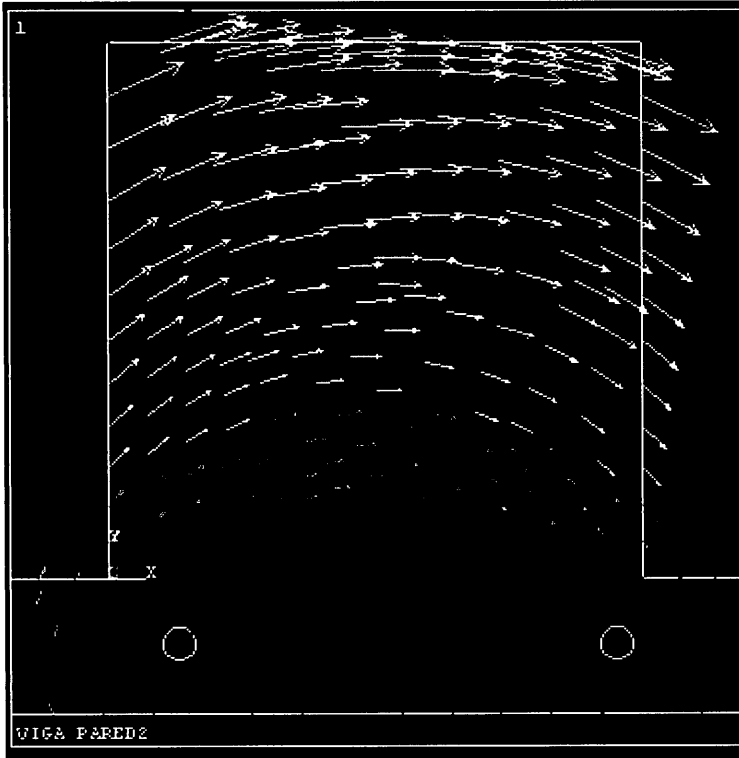


Figura 5: Desplazamientos absolutos obtenidos por el método de elementos finitos (ANSYS).

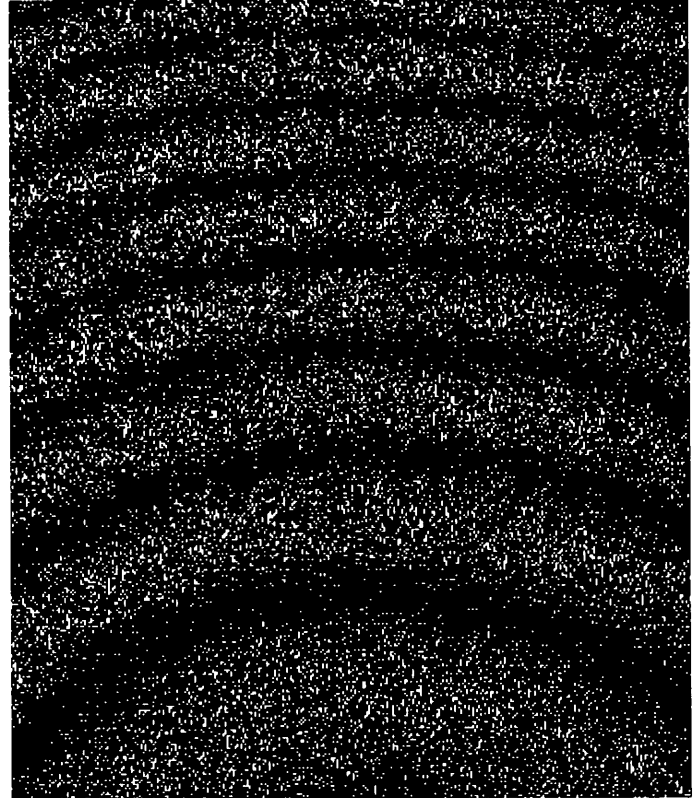


Figura 6: Curvas de igual desplazamientos obtenidos por el sistema ESPI.

**Tímpano empotrado completamente:**

- El método de elementos finitos muestra que las direcciones de los desplazamientos absolutos forman curvas de igual desplazamientos. Esto se verifica con los resultados obtenidos por el sistema ESPI (figura 5 y 6).
- Los máximos desplazamientos están en zonas opuestas del tímpano, es decir, en zonas donde hay máximas tracciones o compresiones respectivamente.
- De acuerdo a la teoría de la elasticidad, si un tímpano tiene una gran altura y un ancho pequeño, existe posibilidad que las tensiones a compresión provoquen alteraciones en la medición de los desplazamientos por efecto de pandeo lateral. En el caso de un tímpano cuadrado, como el que hemos analizado, esta posibilidad es casi nula. Por tanto con el empleo de la interferometría de spec-

kle y el método de elementos finitos se demostró que las componentes de los desplazamientos en el plano permanecen casi invariables, cuando el ángulo de pandeo es igual a un grado.

**Tímpano semi-empotrado:**

- La técnica de speckle fotografía verifica que los máximos desplazamientos ocurren en la dirección vertical, lo cual coincide con los valores calculados por el MEF.
- Se observa una tendencia a que solo exista componente de los desplazamientos en la dirección vertical sobre la línea de simetría, ya que la componente horizontal en el punto 18, el cual está cercano a dicha línea, es casi nula. Este resultado también se verifica por el MEF.
- Comparando los desplazamientos de los puntos 4, 6, 8, 10, 11, 13, 14 y 16 se observa simetría en el modelo, esto permite simplificar el comportamiento del tímpano, al analizar solo la mitad del mismo.

**TABLA 6. VALORES OBTENIDOS PARA EL MODULO DE YOUNG**

Probeta	Frecuencia de Resonancia, Hz	Módulo de Young GPa	Módulo de Young GPa
Mortero (3:1)	427 ± 0.5	4.5 ± 0.2	4.51
Mortero (3:2)	451 ± 0.5	5.5 ± 0.2	5.44
Concreto	864 ± 1.0	27.4 ± 1.0	27.5 ± 2

### 2.1.3. Medición del módulo de Young

Se emplearon probetas de morteros con dosificaciones 3:1 y 3:2 respectivamente. Las probetas de concreto fueron preparadas según la norma UNE 83301.<sup>12</sup>

Mediante la técnica ESPI se obtuvieron las imágenes de cada probeta, sintonizando el transductor a diferentes frecuencias. Los valores del módulo de Young estimados, a partir de conocer la frecuencia de resonancia y teniendo en cuenta las condiciones de frontera impuestas a las probetas, se muestran en la tabla 6. La tercera columna refiere los valores obtenidos por métodos convencionales. La figura 7 muestra el patrón de franjas obtenido para cada frecuencia sintonizada.

### 3. ESTIMACIÓN DE LOS ERRORES

La incertidumbre en la medición de los desplazamientos en las estructuras modeladas, depende de la cota de error estimada para las magnitudes envueltas en cada experimento. En el caso de las medidas de longitud, la cota de error estuvo en un 0.25%. Por consiguiente, la cota de error en la medición de los desplazamientos, para el caso de la speckle fotografía, fue de 1%. En el caso de la técnica ESPI, la misma fue empleada en análisis cualitativo.

Para la medición del módulo de Young, además de tener en cuenta la cota de error estimada para la longitud, se estimaron los errores en la densidad, la frecuencia y los mismos fueron de 0.76% y 0.11% respectivamente. Por tanto la cota de error en la medición del módulo de Young fue de un 35. Por su parte la cota de error para el ensayo a compresión estuvo en un 7%.

### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo ha sido demostrada una vez más la gran utilidad de aplicar las técnicas de interferometría de speckle en modelo a escala reducida. También se pudo corroborar el empleo del método de elemento finitos como vía de modelar el comportamiento de las estructuras estudiadas.

El empleo de la técnica ESPI permitió visualizar, en tiempo real, las vibraciones de superficies de objetos con determinadas condiciones de fronteras, así como estimar la frecuencia de resonancia para determinar las propiedades elásticas de los materiales.

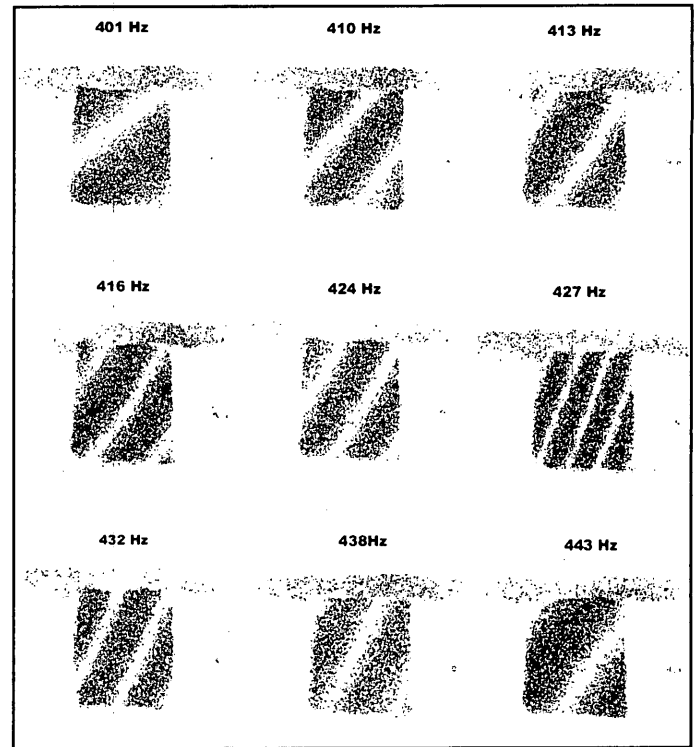


Figura 7: Patrones de franjas obtenidos en las probetas de mortero y de concreto al ser sometidas a determinadas frecuencias del transductor.

### AGRADECIMIENTOS

El Departamento de Fisiología, Unidad Biofísica y Física Médica Universidad de Valencia, España, subvencionó estas investigaciones.

El autor desea agradecer al Dr. Mateo Buendía del Departamento de Fisiología, Unidad Biofísica y Física Médica, Universidad de Valencia, España, por autorizar el empleo del sistema automatizado para el análisis de patrones de speckle, así como al Dr. José María Guijarro (Asociación Industrial de Óptica, Valencia) por dar las facilidades de utilizar sus instalaciones en la realización de algunos experimentos.

Por último el autor reconoce la ayuda prestada por la compañía PREVALESA, la cual preparó las muestras de hormigón para las mediciones del módulo del Young, por el método óptico y por el método tradicional. ■

(12) Standard UNE 8330, "Ensayos de hormigón. Fabricación y conservación de probetas," AENOR (España), Abril 1996.