

A simplified method for mapping samples with a fringes pattern in laser shearography

Un método simplificado para tratar muestras con patrones de franjas en shearografía láser

J. F. Uicich¹, J. Antonacci², P. S. Parodi², J. Morán¹, P. E. Montemartini¹, G. F. Arenas³

1. Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales, CONICET- UNMdP

2. LASER - Instituto de Investigaciones Científicas y Tecnológicas en Electrónica – UNMdP

3. LASER - Instituto de Investigaciones Científicas y Tecnológicas en Electrónica - CONICET – UNMdP

Mar del plata, Argentina

(*) E-mail: garenas@fi.mdp.edu.ar

Received: 01/04/2023

Accepted: 13/06/2023

DOI: 10.7149/OPA.56.2.51143

ABSTRACT:

Shearography is a non-invasive inspection technique that measures surface deformations by processing two replicate images obtained from an illuminated sample using coherent light beams. These beams are intentionally shifted relative to each other (shear) during the process. Shearography has a wide range of applications, from simple laboratory experiments to complex scenarios in the aerospace industry. In the field of composite materials, shearography serves as a valuable qualitative technique for detecting defects such as delaminations, cracks, and detachments. It offers the advantage of being immune to harsh environmental conditions, making it suitable for both laboratory and field measurements. However, commercially available shearography equipment often comes with a high price tag, making it unaffordable for many research laboratories and small businesses. As a result, there is a growing interest in developing cost-effective shearography setups using readily available optical components and integrated image acquisition systems. However, these setups require a deeper understanding of the technique and proper image processing techniques.

In this study, we present a simple method for interpreting information obtained from basic shearography setups. Specifically, we address a common scenario where the distance of illumination and observation does not meet the requirement of being greater than the lateral shear separation. We describe a typical shearography setup applied to measure lateral deformations in epoxy resin samples and outline the straightforward steps for obtaining shear images or shearograms for subsequent analysis. The conclusions drawn from this work can be applied to a wide variety of materials and deformation strategies. The procedures presented here can be easily implemented to develop powerful and customizable shearography instruments for field applications, tailored to the specific requirements of users.

Key words: optics, shearography, laser, non-destructive testing, composite material inspection.

RESUMEN:

La shearografía es una técnica de inspección no invasiva que mide la deformación de una superficie mediante el procesamiento de dos imágenes réplicas provenientes de la muestra iluminada con haces de luz coherente, que se desplazan entre sí (*shear*). Sus aplicaciones cubren una extensa área que va desde experimentos simples de laboratorio hasta casos complejos de la industria aeroespacial. En el campo de los materiales compuestos tiene aplicación directa como una técnica cualitativa para detectar defectos tales como delaminaciones, grietas y desprendimientos. Por la naturaleza de su implementación es inmune a factores agresivos del ambiente, pudiendo ser utilizada tanto en el

laboratorio como en mediciones de campo. Sin embargo, los equipos de shearografía comercialmente disponibles tienen un costo elevado para el presupuesto de muchos laboratorios de investigación y pequeñas empresas. Puede resultar atractivo contar con shearógrafos prototípicos o “lab-made” contruidos a partir de elementos discretos de óptica y sistemas de adquisición de imágenes integrados de fácil consecución y bajo costo, pero que requieren de un conocimiento más profundo de la técnica y un adecuado procesamiento de las imágenes. En este trabajo, mostramos un método simple para interpretar la información de cualquier esquema básico de shearografía para un caso muy común en el que la distancia de iluminación y observación no cumple la condición de ser mayor en comparación con la separación lateral de *shear*.

Para ello describimos un típico esquema de shearógrafo aplicado a la medición de deformación lateral de muestras de resina epoxi y formulamos los pasos sencillos para la obtención de las imágenes de *shear* o shearogramas para su posterior análisis. Las conclusiones se pueden aplicar a una amplia variedad de materiales y estrategias de deformación. Los procedimientos presentados aquí se pueden implementar fácilmente para desarrollar potentes instrumentos de shearografía de campo personalizables de acuerdo con los requisitos del usuario.

Palabras clave: óptica, shearografía, laser, ensayos no destructivos, inspección de materiales compuestos

REFERENCES AND LINKS / REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] Marsh, G. “Next step for automotive materials. *Materials Today*”, 6(4), 36–43, 2003.
- [2] Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M., & Elharfi, A. “Polymer composite materials: A comprehensive review”, *Composite Structures*, 262, 113640, 2021.
- [3] Das, M., Sahu, S., & Parhi, D. R. “Composite materials and their damage detection using AI techniques for aerospace application: A brief review”, *Materials Today: Proceedings*, 44, 955–960, 2021.
- [4] Duchene, P., Chaki, S., Ayadi, A., & Krawczak, P. “A review of non-destructive techniques used for mechanical damage assessment in polymer composites”, *Journal of Materials Science*, 2018.
- [5] Dwivedi, S. K., Vishwakarma, M., & Soni, P. A. “Advances and Researches on Non Destructive Testing: A Review. *Materials Today: Proceedings*”, 5(2), 3690–3698, 2018.
- [6] Karbhari, V. M. “Introduction: the future of non-destructive evaluation (NDE) and structural health monitoring (SHM)”, *Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites*, 3–11, 2013.
- [7] Gholizadeh, S. “A review of non-destructive testing methods of composite materials”, *Procedia Structural Integrity*, 1, 50–57, 2016.
- [8] Jolly, M. et al. “Review of Non-destructive Testing (NDT) Techniques and their Applicability to Thick Walled Composites”, *Procedia CIRP*, 38, 129–136, 2015.
- [9] Garnier, C., Pastor, M.-L., Eyma, F., & Lorrain, B. “The detection of aeronautical defects in situ on composite structures using Non Destructive Testing”, *Composite Structures*, 93(5), 1328–1336, 2011.
- [10] Yang, F. et al, “The effect of loading methods and parameters on defect detection in digital shearography”, *Results in Physics*, 7, 3744–3755, 2017.
- [11] Hung, Y. Y., Luo, W. D., Lin, L., & Shang, H. M., “Evaluating the soundness of bonding using shearography”, *Composite Structures*, 50(4), 353–362, 2000.
- [12] De Angelis, G., Meo, M., Almond, D. P., Pickering, S. G., & Angioni, S. L., “A new technique to detect defect size and depth in composite structures using digital shearography and unconstrained optimization”, *NDT & E International*, 45(1), 91–96, 2012.
- [13] Maier, J., et al. (2007). Gradient Shearography for Strain Analysis in Composite Materials. *Journal of Composite Materials*, 41(12), 1455-1470.
- [14] Steinchen, W., Yang, L. X., Schuth, M., & Kupfer, G. “Application of shearography to quality assurance”, *Journal of Materials Processing Technology*, 52(1), 141–150, 1995.
- [15] Hung, Y. Y., Yang, L. X., & Huang, Y. H., “Non-destructive evaluation (NDE) of composites: digital shearography”, in V. M. Karbhari (Ed.), *Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites*, Ch: 5 (pp. 84-115): Woodhead Publishing, 2013.

- [16] Jüptner, W., "Interferometric Methods," in "Optical Methods in Experimental Solid Mechanics", Laermann, K., Ed. 2000, pp. 197–288.
- [17] Francis, D., Tatam, R. P., & Groves, R. M., "Shearography technology and applications: a review", Measurement Science and Technology, 21(10), 102001, 2010.
- [18] Francis, D., "Non-destructive evaluation (NDE) of composites: introduction to shearography", "Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites, 56–83, 2013.
- [19] Liang, C. Y., Hung, Y. Y., Durelli, A. J., & Hovanesian, J. D., "Time-averaged moire method for in-plane vibrational analysis", Journal of Sound and Vibration, 62(2), 267–275, 1979.
- [20] Bai, P., Zhu, F., & He, X., "Out-of-plane displacement field measurement by shearography", Optics & Laser Technology, 73, 29–38, 2015.
- [21] M. Schuth, F. Vössing, and L. Yang, "Shearographic NDT-Measuring Systems in Theory and Application (Endoscope for Nondestructive Test)," pp. 1–12, 2010.
- [22] Arenas, G., Noriega, S., Vallo, C., & Duchowicz, R., "Polymerization shrinkage of a dental resin composite determined by a fiber optic Fizeau interferometer", Optics Communications, 271(2), 581–586, 2007.
- [23] Liu, Z., Gao, J., Xie, H., & Wallace, P., "NDT capability of digital shearography for different materials", Optics and Lasers in Engineering, 49(12), 1462–1469, 2011.
- [24] J. S. Lim, Two-dimensional signal and image processing, vol. 710. 1990.
- [25] L. Haralick, Robert; Shapiro, "Computer and Robot Vision, Vol. 1." p. 672, 1991.
- [26] D. Vernon, Machine Vision, vol. 18, no. 3. 1991.

1. Introducción

En las últimas décadas, los materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio (MCRFV) han experimentado un avance significativo, lo que ha llevado a su amplia aplicación en diversos campos de alto rendimiento, como la industria aeronáutica, infraestructura civil, industria automotriz, industria petroquímica y aplicaciones militares, entre otros. Estas aplicaciones se deben a las excelentes propiedades físicas que poseen, como alta resistencia y rigidez, bajo peso, baja densidad y resistencia química [1-3].

Como consecuencia de este aumento en las aplicaciones, se requiere disponer de métodos de detección de defectos y fallas durante la fabricación y el ciclo de vida del material, sin causar daño al mismo. En este contexto, los ensayos no destructivos (END) son ampliamente utilizados, siendo los métodos más comunes el ultrasonido, la emisión acústica, la termografía infrarroja, la tomografía de rayos X, la radiografía y la shearografía [4-8].

La shearografía digital es una técnica óptica particularmente interesante, ya que permite una inspección directa, en tiempo real y sin contacto con la muestra, abarcando un campo completo de visión. Esta técnica se puede aplicar tanto en laboratorio como en entornos de campo, gracias a su inmunidad al ruido y a las vibraciones locales. Además, la shearografía es capaz de detectar defectos como delaminaciones, falta de adhesión y fisuras en los MCRFV. Algunos ejemplos representativos de su aplicación incluyen la medición de deformaciones, tensiones residuales, vibraciones, detección de fugas, perfilado en 3D, así como el proceso de fabricación e inspección de piezas compuestas en la industria aeronáutica [9-12].

La shearografía puede ser clasificada en dos categorías principales en función de la deformación que se pretende medir: la shearografía "in plane" se utiliza para medir y analizar la deformación en el plano de la superficie de una muestra, mientras que la shearografía "out of plane" se utiliza para medir la deformación fuera del plano de la superficie de la muestra, fundamentalmente que ocurren perpendicularmente a la misma. En ambas se capturan imágenes de la superficie en dos condiciones diferentes por ejemplo, antes y después de aplicar una carga, y se comparan para detectar cambios en la forma y estructura de la muestra.

La deformación de un material se caracteriza por cambios en la posición y orientación de sus puntos individuales. El gradiente de deformación representa la variación espacial de estos cambios, es decir, cómo la deformación varía de un punto a otro en la muestra. Al medir y analizar el gradiente de deformación mediante la shearografía, se puede obtener información precisa sobre la distribución de esfuerzos y tensiones en la muestra. [13]

Ambos enfoques tienen sus aplicaciones específicas y se utilizan según los requisitos de medición y análisis de deformaciones en cada caso particular. En éste trabajo desarrollamos un método simple para trabajar con las imágenes de shearografía “*out of plane*” en aquellos casos en los que la distancia de iluminación y de observación no cumplen necesariamente con la condición de ser muy mayores en comparación con la cantidad de desplazamiento o *shear*, especialmente si se requiere un shear grande debido a una deformación muy pequeña que requiera mayor sensibilidad.

A continuación se presenta un banco de shearografía con sus elementos principales, una breve descripción teórica del principio de funcionamiento y la propuesta simplificada. En la siguiente sección se presentan los detalles experimentales del shearógrafo, la geometría y características de la muestra utilizada, junto con una simulación por elementos finitos para ser usada como control y una descripción de cómo implementar la propuesta simplificada. Finalmente se muestran los resultados y se formulan las conclusiones.

1.1 Resumen teórico para la medición del gradiente de desplazamiento “*out of plane*”

La Fig. 1 muestra un banco óptico de shearografía típico. Una superficie rugosa usada como objeto de estudio es iluminada por una fuente de luz laser, generando una reflexión de haces múltiples dispersos en todas direcciones que forma un patrón de speckle aleatorio que se envía a un interferómetro formado por un dispositivo divisor de haces y dos espejos. La idea básica de la shearografía es generar una imagen compleja a partir de dos imágenes del objeto de estudio: una original que proviene del espejo de referencia (ver Fig. 1, en rojo), y otra que esté desplazada una cierta distancia que se conoce como “*shear*”, proveniente del segundo espejo que ha sido rotado un determinado ángulo (ver Fig. 1, en azul).

Para hacer una medida de *shear* o “shearograma” se necesitan dos de estas imágenes complejas, una primera imagen que se toma como referencia y una segunda que se registra luego de generado un evento de carga que produzca una deformación en el objeto de estudio. Ambas imágenes complejas tendrán patrones de speckle diferentes, pero al hacer la diferencia entre ellas se genera una nueva imagen que exhibirá un patrón de franjas que brinda información sobre el gradiente de la deformación de la superficie.

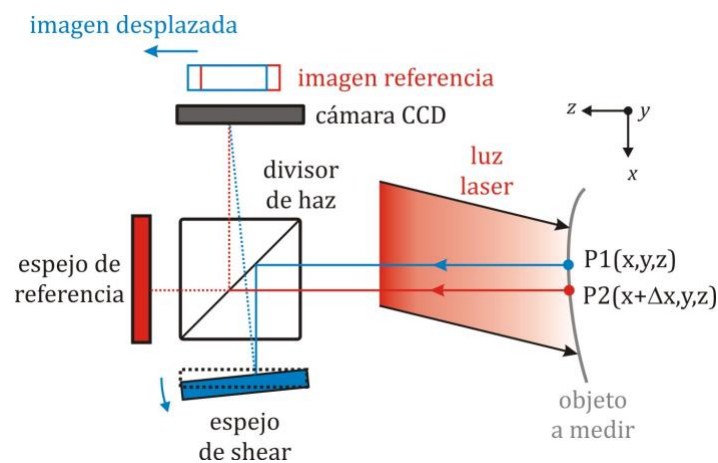


Fig 1. Banco óptico de shearografía laser. P1 y P2 son dos puntos cercanos del objeto a medir separados una distancia igual a la de “*shear*” de tal forma que se superpondrán en un mismo pixel de la cámara CCD .

Muchos autores [13-16] han descrito las ecuaciones involucradas en shearografía, en resumen aquí basta con considerar que dos puntos $P1(x,y,z)$ y $P2(x+\Delta x,y,z)$ sobre la superficie de una muestra están separados por una distancia de desplazamiento o *shear* “ Δx ” paralelo al eje x de tal forma que se superpondrán en un mismo pixel de la cámara CCD.

Las nuevas posiciones de los puntos de interés luego de producido el evento de carga serán $P1'(x+u,y+v,z+w)$ y $P2'(x+\Delta x+u+\Delta u,y+v+\Delta v,z+w+\Delta w)$, donde ahora (u,v,w) es el desplazamiento de P1 y

$(u+\Delta u, v+\Delta v, w+\Delta w)$ es el desplazamiento de P2, por lo que entonces $(\Delta u, \Delta v, \Delta w)$ es el desplazamiento de P2' relativo al desplazamiento de P1'. Si el valor de *shear* de la imagen es pequeño teniendo en cuenta las distancias de iluminación y observación, el cambio en la diferencia de fase ($\Delta\phi$) entre la imagen de referencia y la imagen con *shear* después del evento de carga se asocia con el cambio en el camino óptico después del desplazamiento. Así $\Delta\phi$ viene dado por [17]:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \left(A \frac{\partial u}{\partial x} + B \frac{\partial v}{\partial x} + C \frac{\partial w}{\partial x} \right) \Delta x \quad (1)$$

donde λ es la longitud de onda de la fuente laser y $\partial u/\partial x$, $\partial v/\partial x$ y $\partial w/\partial x$ son las derivadas de Δu , Δv y Δw en el eje x; en tanto que A, B, C son factores relacionados con las posiciones de la fuente de iluminación y la cámara luego hacer una simplificación de expansión binomial [18]. Debe quedar en claro que A, B, C afectan a la sensibilidad del sistema.

Si se requiere una fase exclusivamente sensible al desplazamiento en la dirección “*out of plane*”, entonces A y B deben ser iguales a cero [19]. En la práctica, esto se puede lograr haciendo que los vectores de observación e iluminación sean suficientemente colineales [20]. Entonces la ecuación de $\Delta\phi$ sensible al desplazamiento “*out of plane*” es

$$\Delta\phi = \frac{4\pi\Delta x}{\lambda} \cdot \frac{\partial w}{\partial x} \quad (2)$$

Es importante destacar que las franjas de interferencia que aparecen en la imagen compleja son proporcionales a la derivada de desplazamiento en la dirección de producido el *shear*, en tanto que “ Δx ” puede ser considerado como un parámetro de ajuste en la sensibilidad de la medición: a mayor desplazamiento o “*shear*”, mayor número de franjas para una misma deformación.

En aquellos casos en los que la distancia de iluminación y de observación no cumplen con la condición de ser mucho mayores en comparación con la cantidad de *shear* generado y, específicamente cuando se necesita generar un *shear* grande debido a una deformación muy pequeña de la muestra, proponemos que el valor de la diferencia de fase en la Ec. 2 no es suficientemente pequeño como para aproximar a la derivada como se hace en la mayor parte de la bibliografía, pudiendo reescribirse simplemente como un cociente de incrementos:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi\Delta x}{\lambda} \cdot \frac{\Delta w}{\Delta x} \quad (3)$$

El otro aspecto a considerar es que el patrón de franjas obtenido por shearografía no tiene información sobre un punto de la muestra ensayada, sino de dos puntos separados por una distancia “ Δx ” de “*shear*” combinada coherentemente en un mismo punto de la cámara CCD. Usar esta técnica para cuantificar el desplazamiento punto por punto de la muestra ensayada es computacionalmente demandante. Para superar esta dificultad, completamos nuestra propuesta con un método para relacionar o “mapear” un punto de la imagen en la cámara CCD con un punto real de la muestra.

1.2. Mapeo de la muestra con el patrón de franjas

Sean P1 y P2 dos puntos de la muestra separados por una distancia igual al valor de *shear* (Δx), en la misma dirección, y ambos en el mismo plano sobre el eje Z, como se muestran en las Fig. 1 y Fig. 2.

El píxel amarillo en la primera imagen resultante (A en la Fig. 2), tiene la interferencia de la luz de los puntos P1 y P2 que llegan de diferentes brazos del interferómetro sobre un píxel. Supongamos que después del evento de carga que generan a P1' y P2', con diferentes posiciones en el eje z debido a la deformación de la superficie, interfieren igualmente en el mismo píxel amarillo. Esta segunda imagen (B en la Fig. 2), tiene un

valor diferente en ese píxel debido a la nueva diferencia en el retardo de fase óptica entre las nuevas posiciones de los puntos.

Al restar las dos imágenes, este píxel contiene un valor que depende del cambio experimentado en z , es decir en el "out of plane" de la muestra. En otras palabras, el cambio de fase $\Delta\phi$ es proporcional a la tangente del ángulo entre dos líneas: una que se ajusta a los puntos P1 y P2 antes de la deformación y otra que se ajusta a los puntos P1' y P2' después del evento de carga, como se muestra en la Fig. 3.

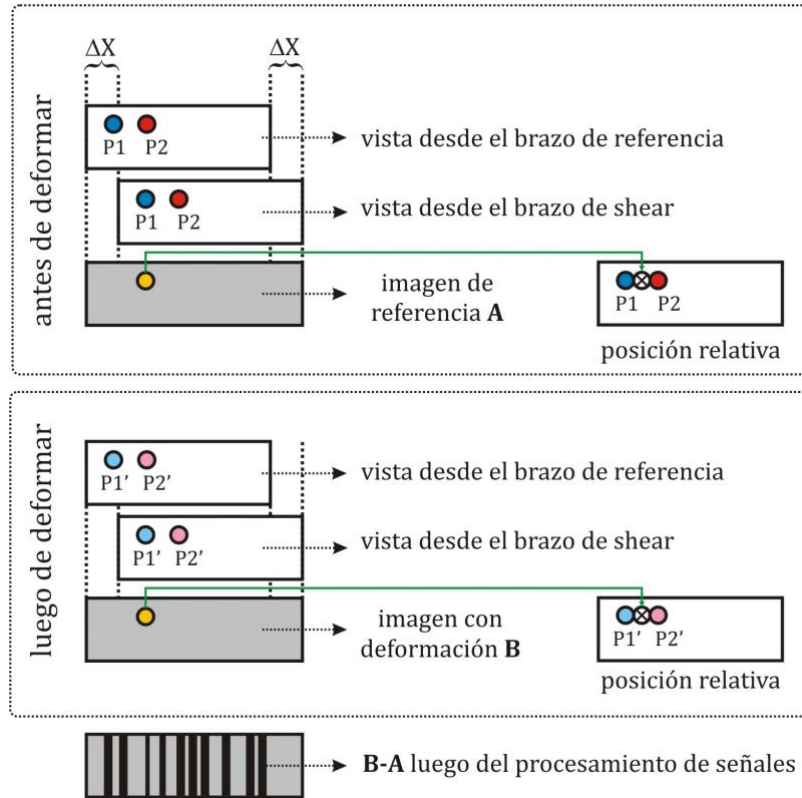


Fig. 2. Descripción de las posiciones relativas.

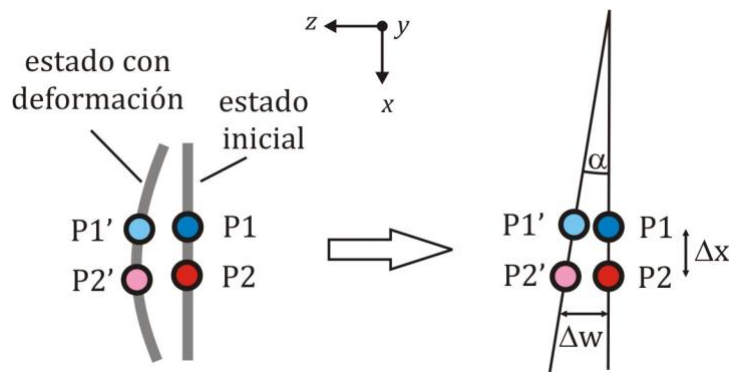


Fig 3. Posición y ángulo entre puntos de interés.

El método propuesto asume que el ángulo α es aproximadamente igual al ángulo que forma la línea tangente de la curva de deformación en el punto medio entre P1' y P2', linealizando localmente la deformación. Bajo este nuevo enfoque, un punto de la imagen (píxel) se puede asignar a un punto (real) de la muestra y por lo tanto, la tangente de α es directamente $\Delta w / \Delta x$ (Ec. 4), que se aproxima a la derivada de w con respecto a x .

$$tg(\alpha) = \frac{\Delta w}{\Delta x} \cong \frac{\delta w}{\delta x} \quad (4)$$

2. Materiales y métodos

La estrategia propuesta con esta configuración es la de registrar la dinámica de las franjas en los shearogramas en función de la deformación producida por el actuador micrométrico. Para ello se mide la magnitud de los desplazamientos producidos controladamente por el actuador micrométrico, se registran los shearogramas generados y se simulan las deformaciones esperadas con un modelo de elementos finitos.

Los elementos principales de una configuración de shearografía son una fuente de luz coherente, un dispositivo que genera un desplazamiento o *shear* y una cámara CCD. En este trabajo la fuente de luz es un laser HeNe de 632,8 nm de longitud de onda (*Melles Griot* - 20 mW - 05 - LHR - 991), expandido con un filtro espacial (*Melles Griot* - 09 LSF 011), para generar una iluminación uniforme y suficiente como para abarcar el objeto de estudio. La luz reflejada desde el objeto de estudio incide a un interferómetro de *Michelson* donde se genera el *shear* en función de la rotación de uno de los espejos y se utiliza una cámara CCD para obtener las imágenes (*SONY Progressive Camera CCD* con 792x768 píxeles), que son digitalizadas por una unidad de procesamiento adecuada. La configuración para ensayo de muestras implementada se muestra en la Fig. 4. El ángulo entre la línea de iluminación y la línea de observación se minimiza tanto como sea posible para desprestigiar la deformación en el plano y hacer que solo sea sensible al desplazamiento “*out of plane*” [14-16].

Como objeto de estudio en este trabajo se utilizan muestra en forma de láminas de epoxi-anhídrido de 50 x 12,7 x 1 mm³, sujetas por uno de sus extremos y apoyada libremente por el otro sobre un cilindro de aluminio de 16 mm de diámetro.

2.1. Generación controlada de deformaciones por actuador micrométrico:

La carga que genera la deformación se aplica por detrás del plano de observación a la mitad entre los extremos descritos y es controlada a través de un actuador piezoeléctrico (*Thorlabs* PC4QM), accionado por un controlador piezoeléctrico de circuito abierto (*Thorlabs* MDT691) con un rango de 0 V a 150 V. Para conocer el desplazamiento “*out of plane*” de la muestra en la posición del punto de carga se utiliza un interferómetro de *Fizeau* construido en fibra óptica. Este sensor de distancias de rango micrométrico no invasivo trabaja por el principio de interferencia de haces paralelos, su principio de funcionamiento y aplicaciones puede consultarse en [21]. Para mejorar el contraste del patrón de franjas, la superficie de iluminación debe cubrirse con una pintura en aerosol blanca satinada un tiempo suficiente antes de la prueba [22].

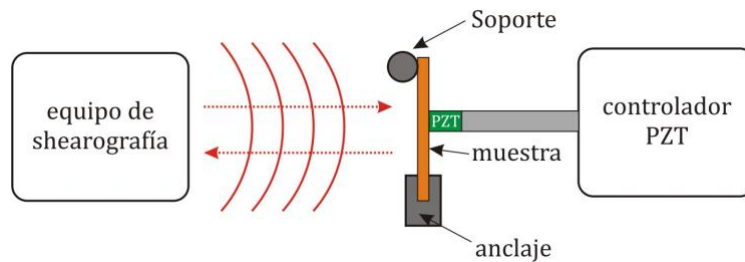


Fig. 4. Banco opto-mecánico implementado.

2.2. Procesamiento de imágenes:

La Fig. 5 resume el diagrama de flujo del procesamiento de imágenes: tal como requiere esta técnica, se obtiene un patrón de franjas de *shear* restando imágenes correspondientes a las deformaciones producidas por la carga, respecto a la de referencia sin deformación. El speckle, patrón de manchas inherente a toda iluminación con luz coherente, se eliminó utilizando un filtro 2D de baja frecuencia en el dominio de Fourier [23]. Para la determinación de las franjas de shear se aplica sobre las imágenes resultantes un procedimiento de segmentación mediante una comparación de cada punto del shearograma con el valor medio de sus vecinos. Finalmente se obtiene una pseudoimagen que denominamos “*mapa de fase*”, para detalles sobre la segmentación empleada puede consultarse en [24, 25].

Como es sabido, todos los puntos de una misma franja en el mapa de fase tienen el mismo ángulo de fase y las franjas vecinas tienen una diferencia de fase de “ π ”. Por eso se debe aplicar luego un algoritmo de desenvolvimiento de fase personalizado a cada caso para obtener la superficie de fase, basada en el mapa

de fase. Es importante señalar que la reconstrucción de la fase se realiza conociendo previamente la forma de la muestra deformada. En nuestro caso lo obtenemos cargando todos los parámetros del material empleado como muestras, así como su geometría, en un modelo de simulación por análisis de elementos finitos, que se explica a continuación.

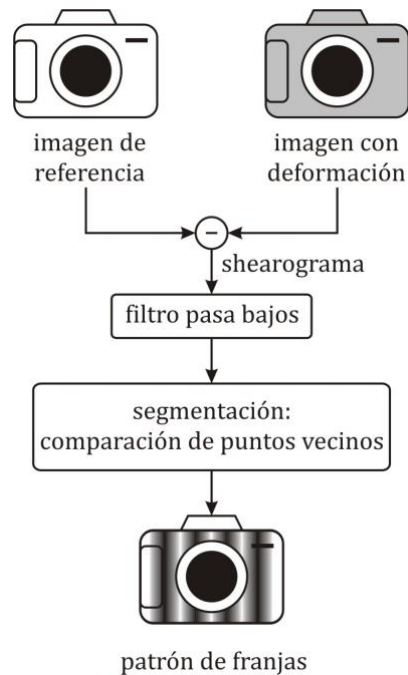


Fig. 5. Diagrama de flujo de procesamiento de imágenes.

2.3. Análisis de elementos finitos:

Con el objetivo de complementar los resultados anteriores y obtener un mapa de deformación que sirva luego como control, se realizaron simulaciones de la deformación de toda la muestra con un software de análisis de elementos finitos.

Usamos como condiciones de contorno:

- el desplazamiento real de la muestra medido con el interferómetro de *Fizeau* cuando la muestra está sujeta en un lado y sostenida por el otro extremo, como se mostró en la Fig. 4.
- las constantes y propiedades físicas del material de la muestra.

Luego usamos todos estos datos junto con los principios básicos de la shearografía para reproducir el patrón de franjas. Los resultados experimentales obtenidos se mapean píxel por píxel con los de la muestra, utilizando el método presentado anteriormente para asignar el valor de un punto de la imagen con el punto medio entre los dos puntos de la muestra que interfieren entre sí en el plano de la imagen CCD. Finalmente, estos resultados se comparan con el mapa de deformación obtenido por la simulación para verificación y validación.

3. Resultados experimentales

La organización de los resultados experimentales que se exponen sigue el mismo orden en el que se explicaron. Primero se muestra un shearograma típico para desplazamiento conocido, luego su procesamiento con el método de la sección 2.2 y la deformación esperada en las mismas condiciones por simulación por análisis de elementos finitos. En segundo lugar se hace una comparación entre la deformación simulada y la deducida a partir del mapa de fase. Como tercer bloque de resultados se muestran dos mapas de fase generados por nuestra propuesta y por la definición por derivada (Ec. 2), con las comparaciones que prueban el buen comportamiento del método simplificado.

La Fig. 6 muestra el patrón de franjas que se forman al restar las imágenes de referencia con la de muestra deformada según el esquema de la Fig. 4, es decir el shearograma del objeto a estudiar. Se aprecian las franjas que evidencian el gradiente de deformación generado, con un espaciado variable que debe ser interpretado según la Ec. 2. Además se aprecia el “speckle” o patrón de manchas claro-oscuro aleatorio propio de la iluminación láser. El extremo fijo corresponde a la parte derecha de la imagen, mientras que en la izquierda se tiene el punto de apoyo libre con el soporte. La Fig. 7 muestra el mapa de fase generado con el diagrama de flujo de procesamiento de imágenes se muestran en la Fig. 5 y corresponde a un desplazamiento del centro de la muestra de 5,93 μm , siguiendo el montaje mostrado en la Fig. 4.

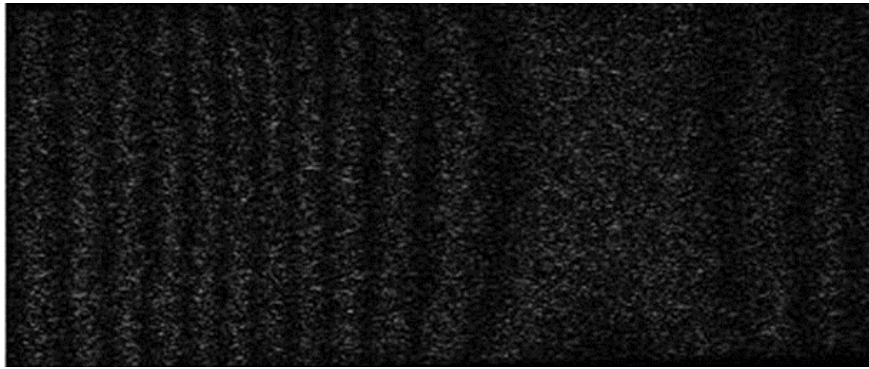


Fig. 6. Imagen de shearografía del objeto de estudio (shear de 5mm).

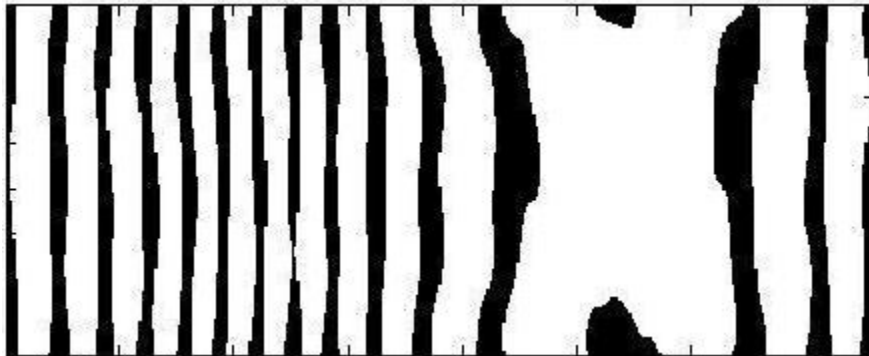


Fig. 7. Mapa de fase de la imagen de la Fig. 6 procesado con el método descrito en 2.2

La ventaja del mapa de fase es que permite ver de una manera clara todas las franjas que se deben tener en cuenta para deducir la deformación producida. Cada experimento requiere de un ajuste particular de los pasos de segmentación hasta generar el mapa de fase óptimo.

Para calcular el desplazamiento “*out of plane*” del mapa de fase se debe sumar en dirección ortogonal respecto a las franjas que componen el mapa de fase, lo que en este experimento sucede principalmente en la dirección horizontal de $\Delta w/\Delta x$ de la Ec. 3, teniendo en cuenta las condiciones de contorno.

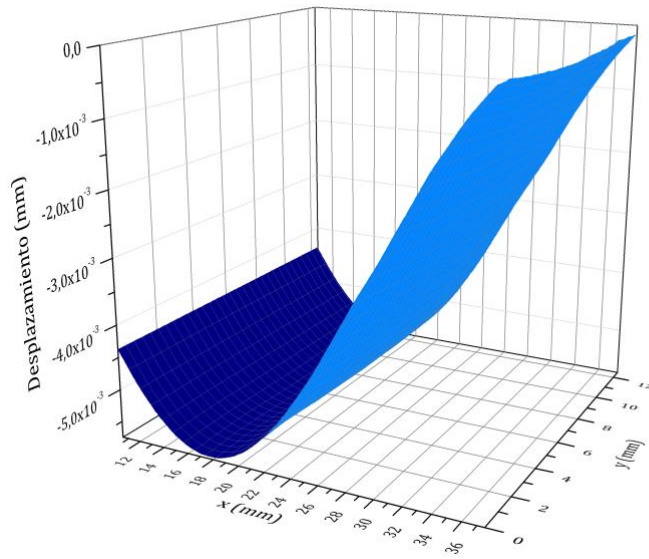
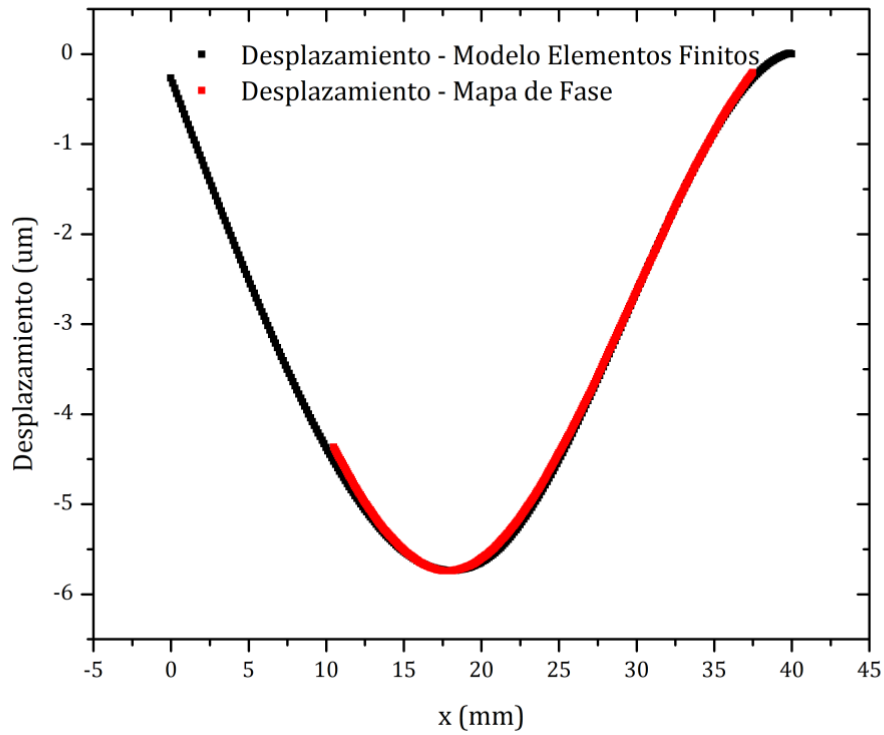


Fig. 8. La forma aproximada de la muestra medida después de la carga.

La matriz resultante se muestra en perspectiva tridimensional en la Fig. 8 y representa la forma aproximada de la probeta después de la deformación producida por el actuador piezoeléctrico. La posición en mm de la muestra para cada píxel se estimó utilizando el método presentado anteriormente. En la Fig. 9 se hace una comparación del desplazamiento predicho por el análisis de elementos finitos, graficando en línea negra la posición correspondiente al perfil de la probeta en su centro, junto con el que se deduce del mapa de fase (línea roja), permitiendo evaluar la precisión del método propuesto.

Por completitud, se midió una probeta similar y comparamos los mapas de fase aplicando la Ec. 2 y repetimos con la simplificación que supone la Ec. 3. La fase se estimó para diferentes valores de shear, a partir del desplazamiento obtenido por el modelo de elementos finitos. En particular la Fig. 10 muestra el mapa de fase obtenido para un valor de shear de 5 mm. En tanto que la Fig. 11 muestra una comparación entre los valores aplicación del método por la diferencia $(\Delta w/\Delta x - \partial w/\partial x)$ para diferentes valores de shear y el que se obtiene con la derivada direccional $\partial w/\partial x$. Puede comprobarse un leve apartamiento de los valores generados por el método propuesto, en particular para altos valores shear. De todas maneras, ese valor es infrecuente y se mantiene aceptablemente bajo en todo el rango considerado.



x (mm)

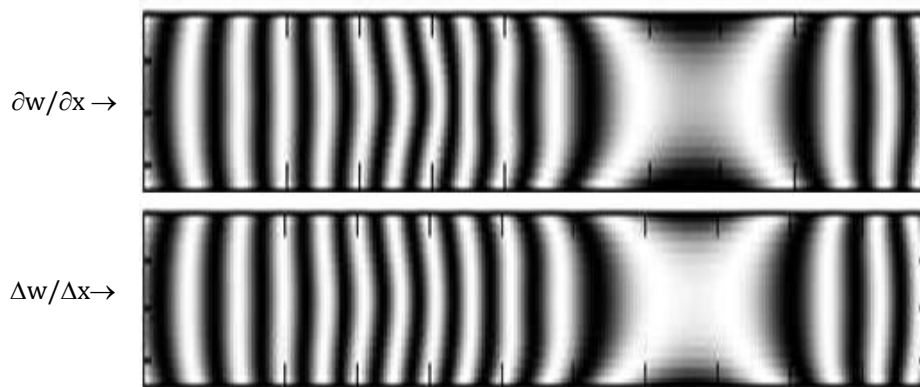


Fig. 10. El mapa de fases obtenido: para un shear de 5 mm, siguiendo la Ecuación 2 (arriba) y el método propuesto usando la Ecuación alternativa 3 (abajo).

Finalmente, la Fig. 12 muestra una comparación entre el desplazamiento “out of plane” para diferentes valores de shear obtenidos utilizando nuestro método propuesto y el desplazamiento obtenido del modelo de elementos finitos.

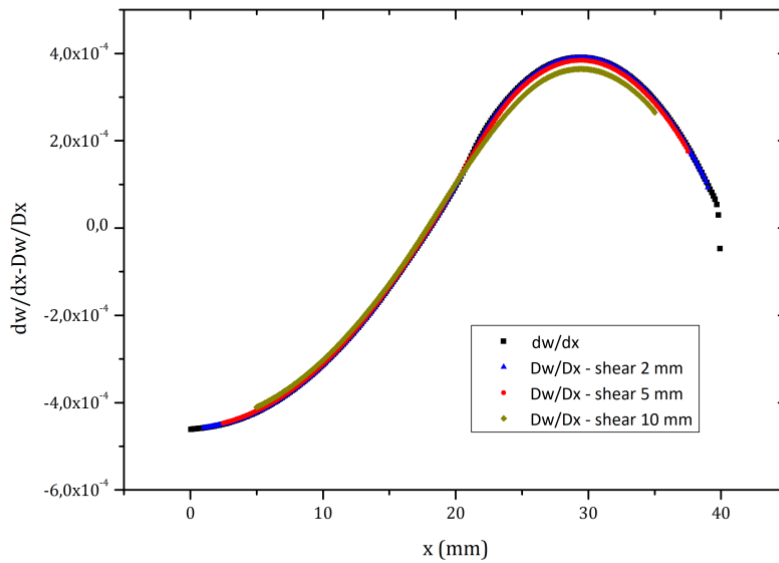


Fig.11. Comparación entre la derivada vs la diferencia para diferentes valores de shear.

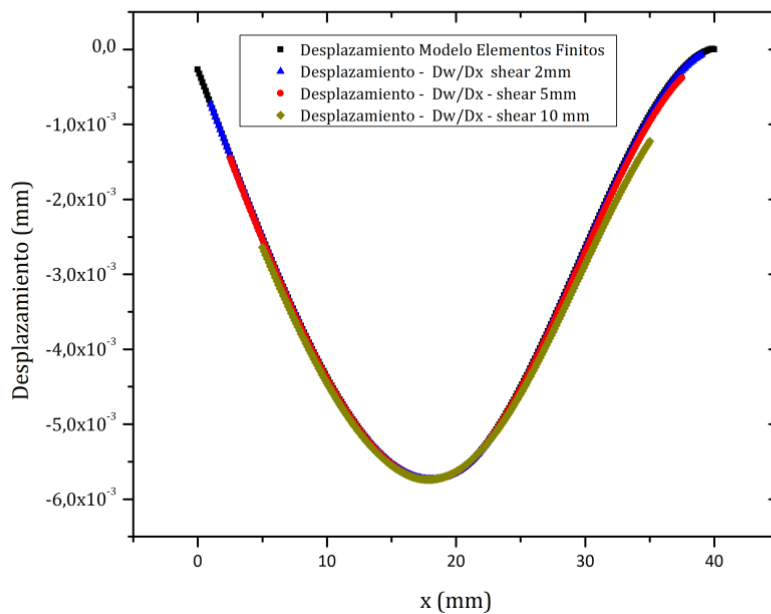


Fig. 12. Comparación entre el resultado del Desplazamiento para diferentes valores de shear y el del modelo de elementos finitos.

4. Discusión

Si bien el valor de shear es un factor de la sensibilidad técnica porque conduce al número de franjas dada una deformación, este debe mantenerse lo más pequeño posible para lograr una mejor precisión, como se muestra en la Fig. 12 (línea azul). A partir de los resultados se observa que, en el límite la Ec. 3 aproxima bien a la Ec. 2, siempre que el valor del *shear* disminuya porque el término $\Delta w/\Delta x \rightarrow \partial w/\partial x$.

A la luz de los resultados mostrados en las Figs. 6, 7 y 8, se comprueba que los shearogramas pueden ser procesados con el método propuesto para, luego de un ajuste obtener el correspondiente mapa de fase, de una manera computacionalmente menos demandante, lo que confiere al método un atractivo para ser implementado en sistemas embebidos o con menores requerimientos de hardware.

Para controlar la validez de nuestro método, comparamos los resultados con los obtenidos por el método de los elementos finitos. Esto se muestra en la Fig. 9, en donde la línea roja corresponde al desplazamiento de una fila de la Fig. 8 y la línea negra corresponde a los resultados de elementos finitos. Se observa que la curva en rojo no tiene valores de toda la muestra en comparación con la curva de línea negra. Coincide con la mitad de la longitud de *shear* a cada lado de la muestra. La representación de la Fig. 13 explica la razón de este artefacto.

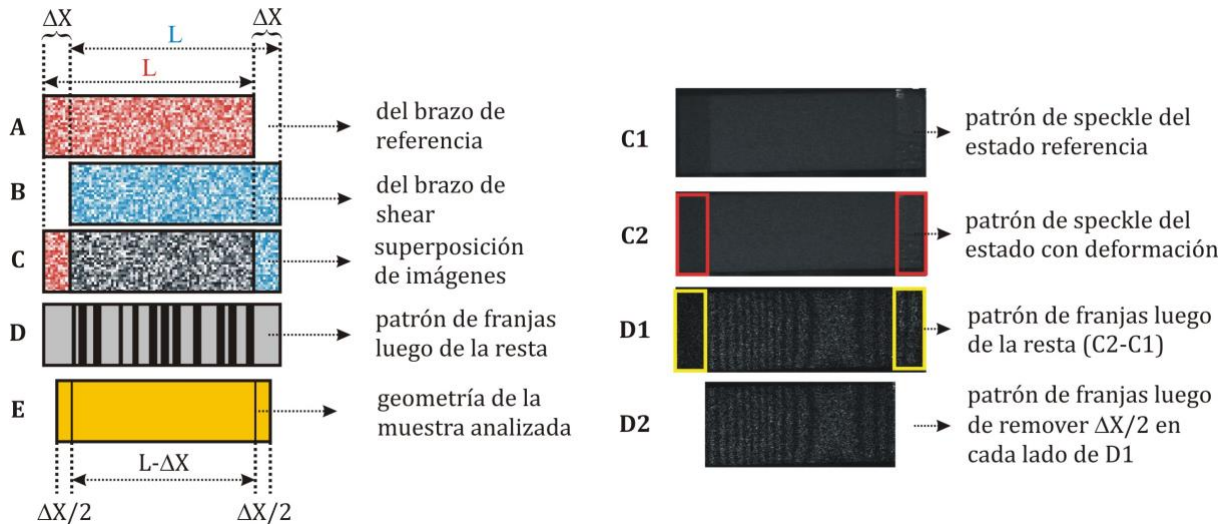


Fig. 13. Efecto del artefacto de recorte de shearografía.

Suponiendo que se ilumina una muestra de longitud L , en la Fig. 13-A y 13-B se representan la imagen que llega de cada brazo del interferómetro a la cámara, cada una de longitud equivalente a L y desplazadas en un *shear* (Δx) relativamente. En la Fig. 13-C se hace la combinación coherente. La resta entre el patrón de speckle del estado deformado (cargado) y el patrón de speckle de referencia da como resultado otro patrón de interferencia que en general tendrá franjas como se muestra en la Fig. 13-D que tiene una longitud equivalente a $L-\Delta x$ porque en los bordes de la imagen no se forma superposición. Como propusimos que la diferencia entre puntos separados por una longitud de *shear* brinda información sobre el punto medio, el patrón de franjas pierde un área igual a las mitades del *shear* en cada extremo de la muestra, ver en la Fig. 13-E.

En la columna de la derecha se aprecia este artefacto en una imagen real, Fig. 13-C1 y Fig. 13-C2 corresponden a las imágenes antes y después de producida la deformación, tomada con la cámara CCD, equivalentes del caso 13-C. Fig. 13-D1 muestra el patrón de franjas resultante después de restar la imagen de referencia, en ambos lados hay una zona de ancho igual al *shear* en donde la muestra se superpone con el entorno en lugar de superponerse consigo misma. Finalmente, la Fig. 13-D2 muestra la imagen útil en la que se descartan ambos extremos. Debido a esto, la longitud final de la imagen tiene una longitud de *shear* menor, y hay una zona de la muestra que no se puede analizar con esta técnica que corresponde a la mitad de una longitud de *shear* en cada extremo de la muestra.

La Fig. 13 completa indica que cuanto más aumentamos el valor de *shear*, más información se pierde. Teniendo esto en cuenta, podemos considerar que la cantidad de *shear* afecta directamente la sensibilidad de este método y la pérdida de datos al mapear la muestra a la imagen, un aspecto importante a tener en cuenta.

5. Conclusiones

Este trabajo muestra un método numérico para asignar o mapear la deformación de una la muestra con el patrón de franjas generado por shearografía. Al compararlo con los resultados obtenidos del modelo de elementos finitos, podemos concluir que es una buena aproximación considerando la simplicidad de implementación.

Al postular las condiciones para aplicar la Ec. 3 en comparación con la Ec. 2 se producen buenos resultados que no requieren un hardware de alto rendimiento, particularmente para instrumentos de shearografía fabricados en laboratorio con valores de *shear* pequeños porque el desplazamiento relativo se puede tratar como una derivada parcial. Yang et al menciona en [10] que si el *shear* es demasiado pequeño, el patrón de interferencia no tendrá suficientes franjas y si es muy alto, el patrón de franjas será demasiado denso y perderá información de la muestra analizada. Si el *shear* no es lo suficientemente pequeño, consideramos que no podemos usar la derivada, porque corresponde a un alto porcentaje de la longitud de la muestra. Mientras aumentamos el valor de *shear*, podemos ver que la discrepancia entre la derivada y la diferencia aumenta. Aunque esto también ocurre, pero no de manera significativa, al considerar el desplazamiento obtenido mediante la Ec. 3 y modelo de elementos finitos, por lo que concluimos que ofrece un método simple y preciso para aproximar los resultados en estos casos.

En este trabajo usamos tiras de material epoxi genéricas como muestras por simplicidad, sin embargo, los procedimientos presentados pueden implementarse fácilmente para desarrollar potentes instrumentos de shearografía de campo, personalizables de acuerdo con los requisitos del usuario y destinados a una amplia variedad de materiales.

Por último, nuestro método crea un conjunto atractivo y simple de ideas que siempre es posible implementar en cualquier tipo de sistemas embebidos que produce instrumental de shearografía de campo y de laboratorio, de muy bajo costo con resultados aceptables.

Acknowledgements

Este trabajo ha sido apoyado por Instituto de Investigaciones Científicas y Tecnológicas en Electrónica (ICyTE), Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales (INTEMA), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y Universidad Nacional de Mar del Plata - Proyecto ING544/ 19, ING606/21 e ING522/18. Los autores quieren agradecer y recordar con afecto la memoria del Dr. Ricardo Duchowicz.