

Aplicación de correlación digital de imágenes para el análisis de problemas de contacto

E. López-Alba⁽¹⁾, R. López-García⁽¹⁾, R. Dorado⁽¹⁾, F. A. Díaz⁽¹⁾,

(1) Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera, Campus las Lagunillas, Edif. A-3, 23071, Jaén
E-mail: elalba@ujaen.es, fdiaz@ujaen.es, rdorado@ujaen.es,

Correlación Digital de Imágenes (DIC) es una técnica experimental de campo completo que permite a partir de imágenes tomadas durante el ensayo, evaluar los desplazamientos y deformaciones producidas. En este trabajo, la técnica de correlación digital de imágenes en 2D ha sido empleada para el análisis de un elemento sobre el cual se ejerce una fuerza y está en contacto sobre otro, produciéndose entre ellos fuerzas de contacto. Así mismo se ha realizado un estudio de las deformaciones que se han producido en ambas estructuras. Previamente las probetas deben ser preparadas para poder aplicar la técnica DIC, generando sobre ellas una distribución no uniforme de color negro sobre un fondo blanco con la que se obtenga una escala de grises en la zona de estudio para poder aplicar la técnica y así conseguir unos resultados precisos.

Los resultados experimentales son comparados con los resultados numéricos obtenidos mediante un programa CAD de Elementos Finitos, comparando variables como la fuerza máxima aplicada, las deformaciones producidas en la zona de contacto, los desplazamientos y la indentación máxima producida. Así pues se mostrará la versatilidad de la técnica de correlación de imágenes para ensayos de contacto dentro del campo de la mecánica experimental.

1. INTRODUCCIÓN

Correlación Digital de Imágenes (DIC) es una técnica óptica de campo completo que permite la medición de desplazamientos y deformaciones [1-2]. La técnica consiste en la toma de imágenes digitales durante el ensayo de una probeta desde su estado inicial (considerado como el de referencia) hasta su estado final (deformado). Previamente a la realización del ensayo, en general, las probetas son tratadas para poder aplicar la técnica DIC. Para ello se aplica una base de pintura blanca sobre la superficie, y posteriormente se genera un moteado aleatorio de color negro para generar el máximo contraste posible. Las probetas se dividen en subconjuntos virtuales, denominados facetas, y mediante la aplicación de algoritmos de correlación, se busca una región o faceta de la imagen de referencia en la imagen deformada, determinando el vector de desplazamientos en cada conjunto de facetas procesadas.

La técnica de Correlación Digital de Imágenes ha sido empleada en los últimos años para el análisis de diversos problemas en el campo de la mecánica experimental. Como proponen Pan et al. [3], esta técnica presenta varias ventajas respecto a otros métodos ópticos interferométricos para la medición de desplazamientos y deformaciones:

- El montaje necesario es sencillo, una cámara digital CCD, y los elementos mecánicos para fijarla. Las probetas se preparan de forma que pueda ser aplicada la técnica, si bien en algunas ocasiones, la propia textura del material permite la aplicación de la técnica óptica directamente.
- La luz necesaria para la realización de los ensayos puede ser luz natural, si bien en ocasiones se utiliza fuentes de luz externas para mejorar la calidad de las imágenes.

- Es versátil, pudiendo aplicarse a diferentes problemas, no invasiva y llega a tener 0.01 pixel de precisión para la medida de desplazamientos y 0.01% para la medida de deformaciones.
- Los algoritmos que implementa la técnica tienen bajos requerimientos computacionales, pudiendo incluso realizarse análisis en tiempo real.

Igualmente, la técnica presenta algunas desventajas como es la dependencia de la calidad de las imágenes tomadas en los ensayos, y las mediciones de deformaciones donde la superficie presente roturas, ya que conllevan pérdida de información.

Diversas aplicaciones han sido desarrolladas en distintos campos tanto de la industria como en la investigación debido a la mejora en los algoritmos de cálculo empleados y desarrollo de la técnica [4]. En el presente trabajo, se realiza un estudio de la aplicación de la técnica DIC a un problema de contacto 2D describiendo el método experimental desarrollado, se presentan los resultados y la discusión de los mismos, para finalmente comentar las conclusiones del estudio.

2. APLICACIONES DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES

Gran número de investigaciones han utilizando y desarrollado la técnica de Correlación Digital de Imágenes, (Digital Image Correlation DIC), donde las técnicas de medición tradicionales, por las características de los ensayos, encuentran dificultades. En los últimos años, aplicaciones basadas en DIC se han desarrollado para estudiar el comportamiento de materiales bajo determinadas condiciones; Sánchez-Arévalo y Pulos [5] analizaron el comportamiento de materiales ante cargas a tracción utilizando únicamente la textura del material. Bisagni y Walters [6] investigaron materiales compuestos ante sollicitaciones biaxiales, obteniendo resultados de los desplazamientos originados en el material dañado frente a las cargas. Chrysochoos et al. [7] aplicaron a ensayos de fatiga las técnicas DIC y termografía, para analizar la energía local en la zona de interés, Tung, Shih y Kuo [8] exploraron la deformación plástica en materiales anisótropos durante un ensayo de tracción.

Igualmente en el campo de la mecánica de la fractura se ha utilizado la técnica DIC en diversos estudios. Lall et al. [9], compararon ensayos experimentales de propagación de daños ante sollicitaciones externas sobre determinados objetos con resultados obtenidos mediante elementos finitos. También se han analizado los factores de intensidad de tensiones KI y KII mediante DIC y comparado los resultados con métodos analíticos en el estudio de la propagación de una grieta en estructuras con concentradores de tensiones. [10-12]. López-Crespo et al. [13] realizaron estudios sobre el cierre prematuro de grieta y la plasticidad originada alrededor de las mismas ante ciertas sollicitaciones comparando los resultados de DIC con métodos numéricos.

La técnica también se ha empleado en el sector aeronáutico para la evaluación de propiedades mecánicas. Du, et al. [14] estudiaron el comportamiento a fractura en el cajón central del ala de un avión. Lichtenberger y Schreier [15] estudiaron en el sector automovilístico un impacto producido por la colisión con un peatón. Reu y Miler [16] realizaron análisis de impactos a alta velocidad sobre estructuras. Grant et al. [17] investigaron las deformaciones producidas en ensayos a alta temperatura. Evans y Holt [18] hicieron avances en medicina estudiando las propiedades mecánicas de la piel humana comparando los resultados con DIC y elementos finitos. Canal et al. [19] combinaron la técnica de correlación digital de imágenes para el análisis de deformaciones ocasionadas en laminados de matriz polimérica sometidos a compresión .

Además han surgido investigaciones para la mejora de procesos de fabricación basándose en DIC. Tiwari et al. [20] analizaron las deformaciones que se producen en el conformado de chapas por explosión. Lord, Penn y Whitehead [21] evaluaron las tensiones residuales en el proceso de taladrado en una superficie, y Reynolds y Duvall [22] trabajaron en la verificación de soldaduras en materiales.

En este trabajo se aplica la técnica DIC para la medida de desplazamientos y deformaciones en un problema de contacto 2D entre dos superficies. El interés del estudio radica en no haber encontrado bibliografía por parte de los autores en relación a medidas experimentales de este problema con la técnica mencionada. Los resultados se compararán con los obtenidos mediante un estudio numérico.

3. MÉTODO EXPERIMENTAL DEL ANÁLISIS DEL PROBLEMA DE CONTACTO

A continuación se analiza un problema de contacto mediante DIC. La técnica permite la evaluación de las deformaciones y desplazamientos que se originan cuando dos superficies se encuentran en contacto y se aplica una carga de compresión. La figura 1 muestra un croquis de las probetas ensayadas, donde la parte inferior es una superficie plana y la superior un semicírculo. Para la realización del ensayo, se aplica una carga de compresión de 1200N aplicada con una velocidad de 100 N/s con una duración del ensayo de 12 s . La máquina utilizada es una máquina universal de ensayo electromecánica Instron, con una capacidad de carga de 30kN. El material empleado para la superficie plana es Policarbonato (Makrolón de espesor 4 mm), con las dimensiones en mm especificadas en la Fig. 1. Las propiedades mecánicas del material eran densidad 1.2 g/cm², módulo de elasticidad 2.400 MPa, resistencia a la tracción > 60 MPa. La parte del punzón era de bronce, para que pudiera ser considerada infinitamente rígida respecto a la parte inferior del montaje.

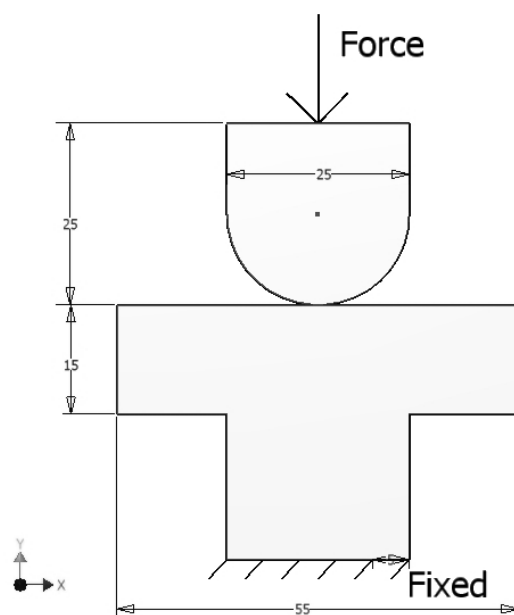


Figura 1. Croquis de las probetas ensayadas

La preparación de las probetas, necesaria para generar un contraste suficiente y poder hacer la correlación digital de las imágenes tomadas durante el ensayo, consiste en pintar de blanco la superficie frontal del montaje y sobre esta aplicar con un spray negro puntos de distintos tamaños y aleatoriamente distribuidos, como se aprecia en la figura 2.



Figura 2. Probetas preparadas para realizar el ensayo

Las imágenes se tomaron con una cámara digital Marlin F146B IRF de 8 bits con sensor CCD de 1/2" y una velocidad de captura de 15 fps y una lente fija de 25 mm (modelo F14 de Edmund optics). Además, se empleó una fuente de luz externa de LED para mejorar el contraste en las imágenes. En la figura 3 se puede apreciar la preparación del ensayo.



Figura 3. Preparación del ensayo

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez realizado el ensayo, se procesaron las imágenes. Seguidamente se compararon las medidas obtenidas mediante DIC con los resultados obtenidos por el método de los elementos finitos. El software empleado fue SolidWorks® [23]. Los elementos utilizados fueron tipo shell y las restricciones impuestas fueron de empotramiento en la probeta inferior. En la definición de los parámetros de correlación de imágenes las facetas fueron de 55×55 pixels siendo el decalaje entre centros de facetas 5 pixel para obtener mayor información para el postprocesado, realizado este con el software Vic-2D [24]. Para no perder información en el contorno del punzón, así como de la superficie en la que se aplicó el contacto, se utilizó una superficie superpuesta a ambas probetas igualmente tratada con puntos negros aleatorios. De esta forma se evitaba que en los bordes, donde no hay posibilidad de definir una faceta del tamaño establecido, no se pudiera obtener información con la técnica DIC.

En la Fig. 4 se muestran valores de los desplazamientos en el eje y , obtenidos mediante la técnica de Correlación Digital de Imágenes y por el método de los Elementos Finitos. La zona de análisis se centra en la probeta inferior, ya que al ser el material policarbonato, es donde se aprecia mejor la ley de contacto. La probeta superior, como se puede observar tiene un desplazamiento uniforme debido a que el material utilizado (bronce) es considerado infinitamente rígido en comparación con el otro, como así lo corroboran los resultados obtenidos. Los desplazamientos en la parte inferior son muy similares en ambas figuras, observándose el mismo valor de desplazamiento máximo o indentación.

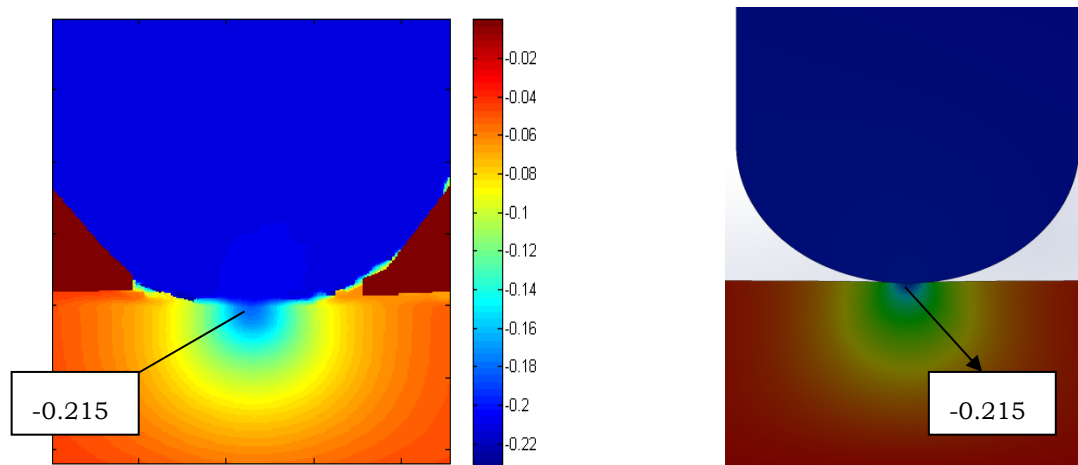


Fig.4.A) Desplazamientos en la dirección Y en mm (DIC) B) Desplazamientos en la dirección Y en mm (FE)

En la Fig. 5 se muestran las deformaciones unitarias en la dirección Y producidas en ambos elementos. Como se puede observar, las deformaciones producidas en el elemento superior son nulas, si bien en el elemento inferior, debido al material es donde se producen las máximas deformaciones. Los resultados obtenidos mediante Elementos Finitos son muy similares. Alrededor del elemento punzante, se puede ver que las deformaciones obtenidas son nulas, esto es debido a que mediante DIC también se procesa la superficie superpuesta para obtener valores en los contornos. Ésta, no experimenta ninguna deformación como era de prever.

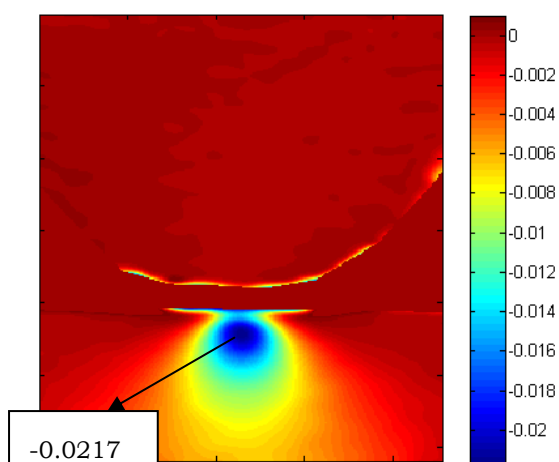
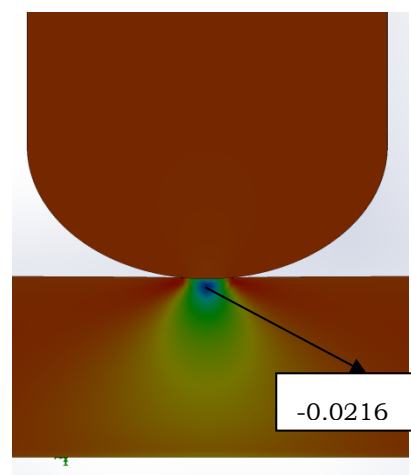


Fig.5.A) Deformaciones Unitarias en Y en microdeformaciones (DIC)



B) Deformaciones unitarias en Y en microdeformaciones (FE)

Del mismo modo se han comprobado otras variables que se pueden obtener en el ensayo, como son las deformaciones principales en ambas direcciones, así como las deformaciones en el eje x. Los resultados obtenidos con ambos métodos son muy parecidos poniéndose de manifiesto la posibilidad de utilizar la técnica DIC para análisis de problemas de contacto

5. CONCLUSIONES

En la primera parte de este trabajo se realiza una revisión de las principales aplicaciones de la técnica de correlación digital de imágenes, en la que se pone de manifiesto el gran interés de esta técnica en el campo de la mecánica experimental. Así mismo, debido a la escasa información publicada sobre el análisis de problemas de contacto entre dos cuerpos mediante el uso de la técnica DIC, se estudia en 2D un problema clásico entre una superficie plana y un indentador con geometría esférica, para concluir que la técnica DIC puede emplearse para el análisis de este tipo de problemas.

Los resultados obtenidos mediante DIC-2D se han comparado con los obtenidos mediante la simulación del problema con un programa de Elementos Finitos, concluyendo que los resultados obtenidos mediante ambos procedimientos son similares, por lo tanto, el problema de contacto, puede ser analizado mediante la técnica óptica Correlación Digital de Imágenes.

6. REFERENCIAS

- [1] M.A. Sutton, J.H. Yan, V. Tiwari, H.W. Schreier, J.J. Orteu. "The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements." *Optics and Lasers in Engineering*, 46 (2008), 746-757.
- [2] M.A. Sutton, J.J. Orteu, H.W. Schreire "Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements" (2009)
- [3] Bing Pan, Kemao Qian, Huimin Xie and Anand Asundy. "Two dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement : a review". *Meas. Sci. Technol* 20, (2009).
- [4] Pan B "Reliability-guided digital image correlation for image deformation measurement" *Appl. Opt.*, 48 , (2009) 1535-42
- [5] F.M. Sánchez- Arévalo, G. Pulos. "Use of digital image correlation to determine the mechanical behavior of materials", *Materials Characterization* 53, (2008), 1572-1579
- [6] Chiaa Bisagni, Carey Walters. "Experimental investigation of the damage propagation in composite specimens under biaxial loading" *Composite Structures* 85, (2008), 293-310
- [7] A. Chrysochoos, B Berthel, F Latourte A Galtier, S Pagano, B Wattrisse. " Local energy analysis of high-cycle fatigue using digital image correlation and infrared thermography", *I. Strain Analysis* , 43, (2008).411-421
- [8] Shih-Heng Tung, Min- Hsiang Shih, Jui-Chao Kuo. "Application of digital image correlation for anisotropic plastic deformation during tension testing", *Optic and Lasers in Engineering*, 48, (2009), 636-641
- [9] P.LALL, D. Iyengar, S Shantaram D. Pachagade. " Damage Progression Using Speckle Correlation and High-Speed Imaging for Survivability of Leadfree Packaging Under Shock", *Strain*, (2009), 267-282
- [10] P. López-Crespo, R.L. Burguete, E.A. Patterson, A. Shterenlikht, P.J. Withers, J.R Yates. "Study of a Crack at a Fastener Hole by Digital Image Correlation", *Experimental Mechanics*, 49, (2009), 551-559
- [11] P. López -Crespo, A Shterenlikht, E A Patterson, JR Yates, P J Withers. "The stress intensity of mixed mode cracks determined by digital image correlation", *J. Strain Analysis* 43,(2008), 769-780
- [12] V. Richter-Trummer, P.M.G. Moreira, S.D. Pastrama, M.A.P Vaz, P.M.S.T de Castro," *Methodology for in-situ stress intensity factor determination on cracked structure by digital image correlation*". *Int. J. of Structural Integrity*,4,(2010),344-357
- [13] P. Lopez-Crespo, A. Shterenlikht, J.R. Yates, E.A. Patterson , P.J. Withers, " Some experimental observations on crack closure and crack tip plasticity", *Fatigue Fract Engng Mater Struct* 32, (2009), 418-429
- [14] Y. Du, F.A. Diaz, R.L. Burguete, E.A. Patterson," *Evaluation Using Digital Image Correlation of Stress Intensity Factors in an Aerospace Panel*", *Experimental Mechanics*, 55,(2011),45-57.
- [15] R. Lichtenberger, H. Schreier. "Contactless and fullfield 3D-deformation measurement for impact and crash test. Article", (2005)
- [16] P.L Reu, T.J. Miler, "The application of high-speed digital image correlation", *J Strain Analysis*, 43 (2008),673-688.
- [17] B M B Grant, H J Stone, P J Withers, M Preuss, "High Temperature strain field measurement using digital image correlation", *J Strain Analysis* ,44,(2009), 263-271
- [18] S. L. Evans, C A Holt, " Measuring the mechanical properties of human skin in vivo using digital image correlation and finite element modelling", *ImechE*, 44, (2009), 337-345

- [19] L.P. Canal, J. M. Molina-Aldereguía, C. González, J. Segurado, J. Llorca, “*Mecanismos de deformación en laminados de matriz polimérica: Correlación digital de imágenes y micromecánica computacional*” .
- [20] Vikrat Tiwari, Michael A. Sutton, S.R. McNeill, Shaowen X, Xiaomin Deng, William L. Fournery, Damien Bretall, “ *Application of 3D image correlation for full field transient plate deformation measurements during blast loading*”, International journal of Impact Engineering,36 (2008),862-874
- [21] J.D Lord, D. Penn y P. Whitehead, “*The Application of Digital Image Correlation for Measuring Residual Stress by Incremental Hole Drilling*”, Applied Mechanics and Materials, 13-14,(2008).65-73
- [22] A.P. Reynolds, F. Duvall, “Digital Image Correlation for Determination of Weld and Base Metal constitutive Behavior” Weldin Research Supplement, 78 (1999), 355-360
- [23] SolidWorks® 2011
- [24] Correlated Solution. VIC-2D (2010)