



CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA DE DAÑOS SUPERFICIALES EMPLEANDO TÉCNICAS ÓPTICAS DE CAMPO COMPLETO

ELÍAS LÓPEZ ALBA, RAFAEL LÓPEZ GARCÍA, RUBÉN DORADO VICENTE,
FRANCISCO ALBERTO DÍAZ GARRIDO

Universidad de Jaén, Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera
Campus las Lagunillas s/n, edificio A3, 23071 Jaén

(Recibido 15 de noviembre de 2011, para publicación 16 de febrero de 2012)

Resumen – La medida de daños en elementos mecánicos proporciona información relevante para el análisis de la integridad estructural del componente. En este trabajo, se estudia la geometría de los daños provocados sobre probetas fabricadas en distintos materiales y con distintas geometrías. Para ello se utiliza la técnica óptica no invasiva de Correlación Digital de Imágenes (DIC). Se ha desarrollado un algoritmo que procesa los desplazamientos fuera de plano proporcionados por DIC para obtener características geométricas del daño como el área del defecto, el volumen o su profundidad máxima. Los resultados se comparan con los obtenidos mediante el uso de técnicas tradicionales de medida como un perfilómetro y un reloj comparador. Finalmente se analizan daños cuyas geometrías son difíciles de medir con las técnicas tradicionales, poniendo de manifiesto el potencial de la técnica DIC para la medición y caracterización de defectos estructurales.

Palabras clave – Daño superficial, correlación digital de imágenes, medición geométrica.

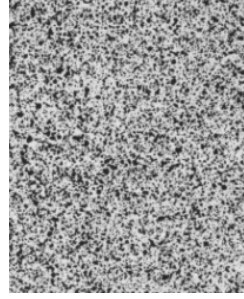
1. INTRODUCCIÓN

El estudio y desarrollo de nuevos materiales despierta un gran interés científico e industrial [1]. En este sentido, la predicción y la caracterización geométrica de daños es objeto del presente trabajo. Esta caracterización puede ser a partir del estudio de la estructura interna [2], o bien mediante la geometría del daño, tanto en la zona donde se ha aplicado la carga, como en la cara posterior [3]. En relación a la detección y caracterización geométrica, son utilizadas diversas técnicas, como C-Scan, Sherografía, Termografía [4,5], determinándose en la mayoría de las ocasiones, el daño mediante parámetros geométricos tales como el área del daño producido, área delaminada o la profundidad del daño, si bien, estas mediciones del defecto son cualitativas y no cuantitativas.

La técnica de Correlación Digital de Imágenes (DIC) es una técnica óptica, no invasiva y de campo completo que ha sido utilizada en las últimas décadas en aplicaciones de diversa índole [6]. La presente investigación pretende, mediante el uso de DIC, la caracterización geométrica del daño (volumen, área, profundidad) (Sección 2.1.). Se han impactado varios componentes de geometría sencilla mediante un montaje experimental propio. La Sección 2.2 muestra la comparación entre las medidas obtenidas con la técnica propuesta, y las obtenidas mediante técnicas tradicionales de medida (reloj comparador y perfilómetro). Una vez validada la metodología, se analizan otros daños cuyas geometrías son más complejas y muy difíciles de poder cuantificar de forma precisa con el uso de otras técnicas (Sección 3). Finalmente las principales conclusiones alcanzadas se resumen en la Sección 4.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este punto se explica la metodología desarrollada para la medición geométrica de los defectos superficiales sobre componentes. El parámetro geométrico que se cuantifica es el volumen del daño.

Fig. 1. Ejemplo de *speckle*.

2.1. Método desarrollado

El método desarrollado para la detección y caracterización del daño producido se basa en la digitalización del defecto mediante la técnica de Correlación Digital de Imágenes (DIC). Para aplicar la técnica DIC en 3D con la que se obtienen desplazamientos fuera de plano, se cuenta con un sistema estereoscópico compuesto por dos cámaras. Previamente, la probeta sobre la cual se aplica la técnica DIC debe ser tratada, porque requiere una distribución de escala de grises no uniforme sobre la superficie objeto de estudio. Para conseguir esta distribución se aplica una base de pintura blanca sobre la cual se genera un moteado de color negro o *speckle* (Fig. 1). Si bien la propia textura del material puede ser utilizada en ciertos materiales si presenta una distribución de grises como la comentada anteriormente.

A continuación el sistema estereoscópico debe ser calibrado para determinar la posición relativa entre las cámaras y la posición de estas frente a la probeta sobre la que se realiza el ensayo. En la calibración, se determinan una serie de parámetros que se denominan extrínsecos (posición de la cámara de referencia y de la posición relativa de la cámara segunda frente a esta) y parámetros intrínsecos (distancia focal, distancia al eje óptico). A partir de este punto se puede proceder a la medición mediante el uso de DIC-3D.

La medición consiste en la toma de una imagen con cada una de las cámaras. Una de las imágenes se toma como referencia y se divide en subconjuntos virtuales cuadrados de píxeles llamados facetas. El tamaño de estas facetas dependerá de las dimensiones y dispersión del moteado aplicado para que en su interior se disponga de información suficiente para poder aplicar la técnica. Las facetas de la imagen de referencia son buscadas en la imagen tomada con la otra cámara mediante un algoritmo de correlación. En este estudio el algoritmo utilizado es *Zero-Normalized Cross-Correlation* (ZNCC) [7]. La ecuación (1) representa el criterio de correlación empleado para la detección de cada una de las facetas de $(2M+1) \times (2M+1)$ píxeles en las que ha sido dividida virtualmente la superficie.

$$C_{ZNCC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left\{ \frac{[f(x_i, y_j) - f_m] * [g(x'_i, y'_j) - g_m]}{\Delta f \Delta g} \right\}, \quad (1)$$

donde $f(x_i, y_j)$ y $g(x_i, y_j)$ son valores de tono de grises en el pixel (x_i, y_j) .

El resto de términos se expresa mediante las ecuaciones (2-5).

$$f_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{j=-M}^{i=M} \sum_{j=-M}^{i=M} f(x_i, y_j) \quad (2)$$

$$g_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{j=-M}^{i=M} \sum_{j=-M}^{i=M} g(x'_i, y'_j) \quad (3)$$

$$\Delta f = \sqrt{\left[\sum_{j=-M}^{i=M} \sum_{j=-M}^{i=M} f(x_i, y_j) - f_m \right]^2} \quad (4)$$

$$\Delta g = \sqrt{\left[\sum_{j=-M}^{i=M} \sum_{j=-M}^{i=M} g(x_i, y'_j) - g_m \right]^2} \quad (5)$$

Una vez realizada la correlación, se obtienen los resultados de la medida de desplazamientos, el valor del vector desplazamiento de cada faceta es posicionado en su centro.

Se ha desarrollado un algoritmo con el programa de cálculo Matlab® que, mediante postprocesado de los datos obtenidos con DIC, permite la determinación del volumen asociado daño y otros parámetros geométricos. En lo que sigue téngase en cuenta que DIC digitaliza superficies que matemáticamente corresponden a funciones univaluadas; aquellas que asocian a cada punto del dominio plano (x, y) una única altura z .

Paso 1: El algoritmo de procesado se compone de los siguientes pasos: Se eliminan los datos en el entorno de la zona del daño. Con esta operación nos quedamos con una nube de puntos que presenta un vacío en la región de estudio.

Paso 2: Se ajusta la nube de puntos obtenida en el Paso 1 mediante una función polinómica [8]. Con esta acción se consigue reconstruir la forma original de la superficie con anterioridad al defecto.

Paso 3: Se recupera la nube de puntos en la zona dañada y se triangulan [9] sus proyecciones en el plano (x, y) .

Paso 4: Finalmente, se procede a calcular los parámetros geométricos de interés.

La suma de las áreas de los triángulos obtenidos en el Paso 3 permite calcular el área proyectada del defecto.

Por otro lado, se puede calcular la diferencia, en los puntos (x, y) obtenidos en el Paso 3, entre la superficie reconstruida (Paso 2), y la nube de puntos de la zona dañada. Estas diferencias permiten medir el volumen del daño (sumando los volúmenes sobre los triángulos del Paso 3), e incluso estimar su máxima profundidad (que será la máxima de las diferencias).

Las medidas de los parámetros realizadas son cuantitativas, lo que pone de manifiesto el potencial del uso de la técnica DIC para la determinación de la caracterización geométrica de daños superficiales.

2.2. Validación de la metodología

Para la validación de la metodología desarrollada se realiza un ensayo de impacto sobre una placa metálica. Para la ejecución del impacto se utiliza un objeto punzante y se genera sobre la probeta un daño cuya geometría es sencilla y fácilmente determinable con técnicas de medida clásicas (Fig. 2). La probeta es posicionada en plano de referencia y mediante la medición de la profundidad del daño en distintos planos con el uso de un reloj comparador son determinados los desplazamientos fuera de plano, además el contorno del daño es medido con un perfilómetro (Fig. 3). Así pues se determinan una serie puntos de la geometría del daño que nos permiten identificar la forma del defecto.

La geometría caracterizada a partir de los puntos obtenidos mediante las técnicas tradicionales, se aproximan a un volumen de revolución donde se puede distinguir dos partes, un tronco de cono y un casquete esférico (Fig. 4). Donde r representa el radio del casquete esférico y h su altura, R es el radio mayor del tronco de cono, y h' la altura de este. Los valores medidos se representan en la tabla 1.

Mediante las ecuaciones (6-9) se determina el volumen obtenido a partir de la medición realizada con las técnicas tradicionales de medida.

$$V_{\text{casquete esférico}} = \frac{\pi \times h}{6(3 \times r^2 + h^2)} \quad (6)$$

$$V_{\text{tronco cono}} = \frac{1}{3} \times \pi \times h' \times (r^2 + R^2 + R \times r) \quad (7)$$



Fig. 2. Defectos superficiales sobre plancha metálica.



a



b

Fig. 3. a) Medición de profundidad del impacto mediante un reloj comparador, b) Medición del contorno mediante un medidor de perfiles.

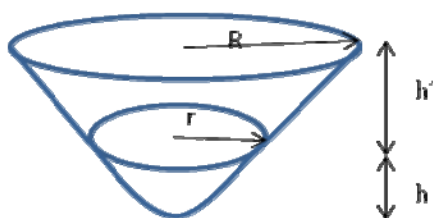


Fig. 4. Geometría del daño caracterizada mediante técnicas de medición tradicionales.

Tabla 1. Resultados de la medición.

Valores Medidos
$R = 12.03 \text{ mm}$
$R = 4.73 \text{ mm}$
$h = 1.2 \text{ mm}$
$h' = 1.53 \text{ mm}$

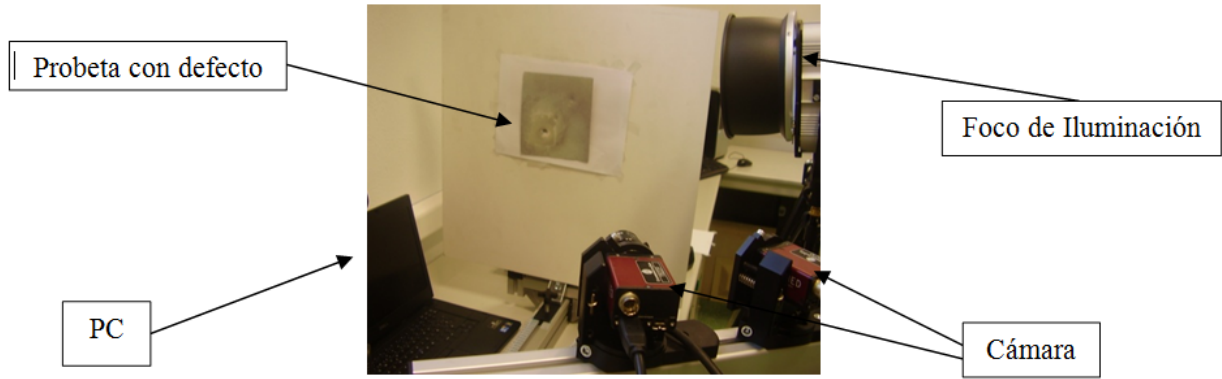


Fig. 5. Medición de los desplazamientos fuera de plano.

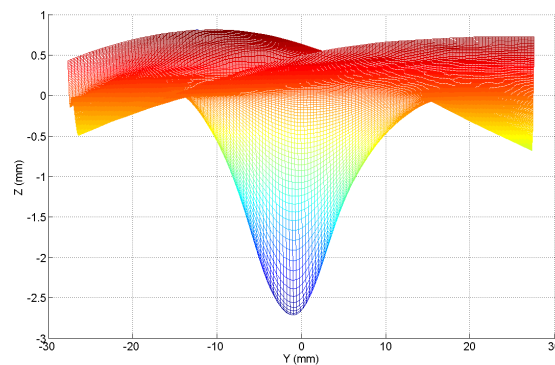


Fig. 6. Detección del daño mediante DIC.

$$V_T = V_{\text{casquete esférico}} + V_{\text{tronco cono}} \quad (8)$$

A continuación se realiza la medición del volumen con la metodología propuesta y así poder comparar los resultados obtenidos anteriormente. Sobre la probeta se genera un moteado negro sobre una capa de pintura blanca aplicada previamente. Mediante la técnica de Correlación Digital de Imágenes se obtienen los desplazamientos fuera de plano. En la realización del ensayo se utilizan dos cámaras CCD 5Mpixel IEEE 1394 Stingray blanco y negro, y dos lentes Schneider de distancia focal de 23 mm, el área de interés es iluminada mediante un foco de luz halógena de 150 W para obtener mejor calidad de las imágenes (Fig. 5). El sistema es calibrado con una rejilla que presenta puntos espaciados distancias conocidas, se toman 25 imágenes de la rejilla en distintas posiciones y se determinan los parámetros extrínsecos e intrínsecos del sistema DIC-3D. A continuación toma una imagen con cada una de las cámaras, el área de interés se divide en facetas cuyo es de 45 píxeles cuadrados y se aplica un solapamiento entre facetas de 5 píxeles. Este solapamiento consiste en que una faceta de la siguiente está desplazada tanto en dirección horizontal como vertical un determinado número de píxeles. Los resultados del vector desplazamiento de una faceta en la imagen de referencia con respecto a la misma faceta en la imagen tomada por la segunda cámara se asignan al centro de la faceta. Así pues el solapamiento entre faceta proporcionará mayor información que será de utilidad para el postprocesado de los resultados. Los datos fueron procesados mediante un software comercial (*Correlated Solution*) [10].

Una vez realizada la correlación se obtienen los desplazamientos fuera de plano del defecto presente en la probeta. Estos resultados obtenidos mediante DIC son exportados para aplicar la metodología desarrollada (Fig. 6).

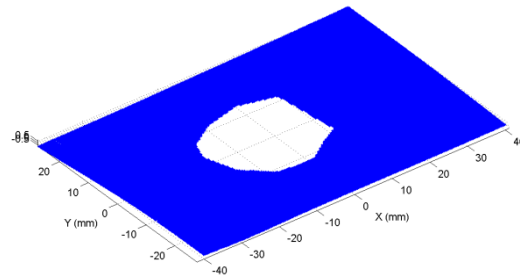


Fig. 7. Eliminación de la zona dañada.

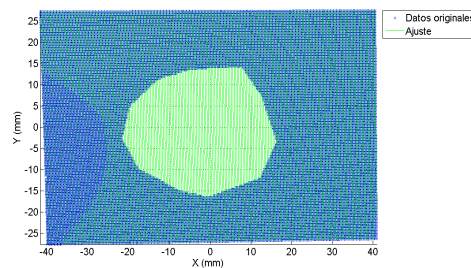


Fig. 8. Reconstrucción de la superficie previa a ser ensayada.

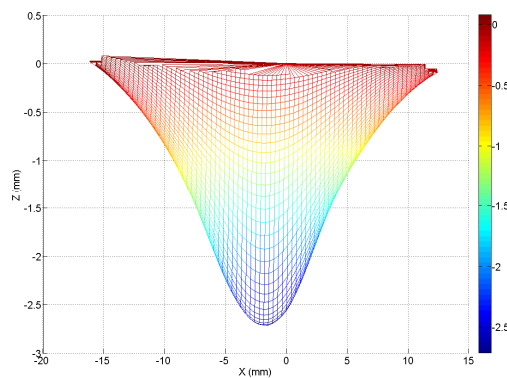


Fig. 9. Obtención del volumen del impacto.

A continuación se selecciona la zona dañada y se elimina reconstruyendo la geometría original de la probeta (anterior a producirse el daño) (Fig. 7).

Una vez eliminada la superficie dañada, se toman los puntos restantes para ajustar una superficie polinómica, pudiendo generar en la zona dañada puntos de información que representan a la superficie original previa a ser dañada (Fig. 8).

Aproximada la superficie original se determina el volumen del daño. Para ello se realiza la sustracción entre la información reconstruida y la obtenida mediante DIC (Fig. 9).

Por último se procede al cálculo de los parámetros geométricos. Para ello se calcula el área proyectada del daño, que junto con los desplazamientos medidos mediante DIC permiten obtener el volumen del impacto (VALG) (Fig. 10).

Comparando las mediciones mediante ambos procedimientos, Tabla 2, se puede observar que el error cometido es 2.10%. Dicho error es debido principalmente a la aproximación que se ha hecho de la geome-

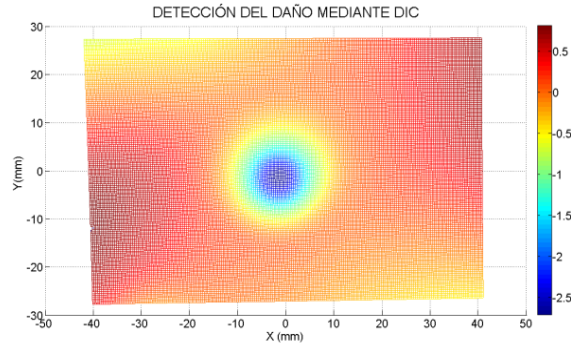


Fig. 10. Medición del volumen del daño (VALG).

Tabla 2. Volumen mediante técnicas tradicionales (VT) y la metodología propuesta (VALG).

VT (mm ³)	VALG (mm ³)	Error (%)
403.5	412.16	2,10

tría dañada mediante su medición por técnicas tradicionales a los cuerpos de revolución comentados. Otra posible causa del error es la aproximación de la superficie original mediante el algoritmo planteado en la metodología. Además, hay que tener en consideración que la técnica DIC tiene una resolución de 0.01 píxeles.

Los resultados mediante la metodología experimental propuesta muestran que se puede calcular con gran precisión el volumen de un daño producido en una estructura.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para aplicar la metodología desarrollada se realizan una serie de ensayos, en los cuales se obtiene el volumen del daño producido tras realizar un impacto sobre distintas estructuras. Las geometrías del defecto son difícilmente cuantificables mediante técnicas tradicionales de medida.

3.1. Ensayo sobre probeta con múltiples daños

La placa metálica sobre la que se validó la metodología propuesta se han realizado otra serie de ensayos donde se obtienen una serie de defectos cuyo volumen es difícilmente aproximable a un cuerpo de revolución con las medidas realizadas mediante el uso de técnicas tradicionales de medida. Sin embargo el potencial de la técnica DIC puede ser utilizado en estas ocasiones y se pueden determinar parámetros geométricos del defecto.

En la Fig. 11, se representan las zonas dañadas que son analizadas mediante DIC, las cuales se encuentran virtualmente divididas en facetas para proceder a su análisis.

La metodología es aplicada obteniendo el volumen en cada uno de los daños (Fig. 12).

Así pues se determina el parámetro geométrico del volumen para el ensayo de mayor energía de impacto obteniendo VALG = 507.97 mm³ y en el ensayo de menor energía de impacto el volumen de daño obtenido es VALG= 229.18 mm³.

Por lo tanto se puede concluir en los resultados obtenidos que a mayor energía aplicada en el ensayo, mayor es el defecto pudiéndose cuantificar el volumen del daño.

3.2. Ensayo sobre superficie curvada

Para el análisis sobre una superficie curva se aplica la metodología experimental sobre una lata de geometría cilíndrica, la cual se ha deformado previamente para generar un defecto en la superficie de la mis-

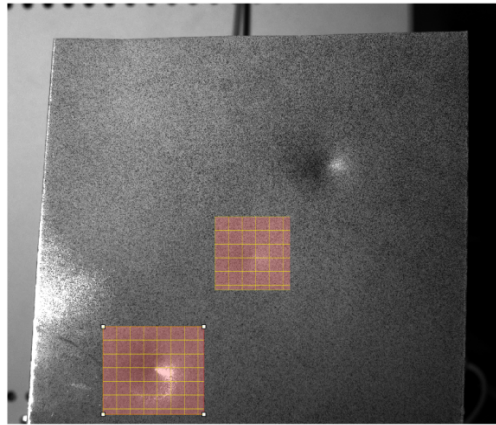


Fig. 11. Selección de las zonas dañadas a analizar.

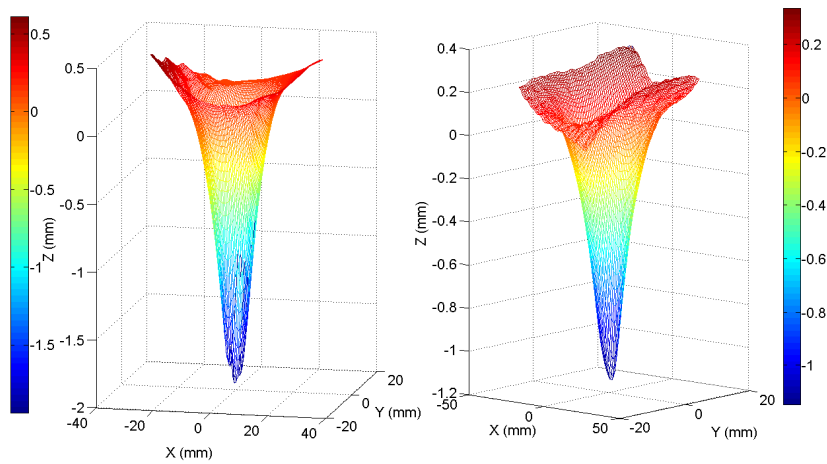


Fig. 12. Volumen de los daños que presenta la probeta.



Fig. 13. Superficie cilíndrica dañada.

ma (Fig. 13). Mediante DIC se han obtenido los desplazamientos fuera de plano (Fig. 14). Aplicando el algoritmo de cálculo se obtiene el volumen del daño ocasionado. Para ello una vez eliminada la zona dañada de los datos obtenidos mediante DIC se realiza el ajuste para obtener la geometría original previa al daño (Fig. 15).

Una vez obtenidas ambas superficies, se procede al cálculo del volumen, obteniendo un valor de $V_T = 1073.7 \text{ mm}^3$.

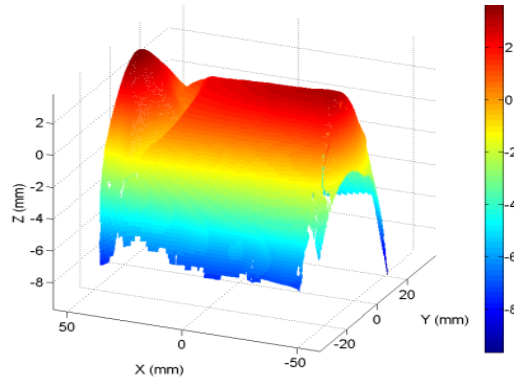


Fig. 14. Resultados obtenidos mediante DIC.

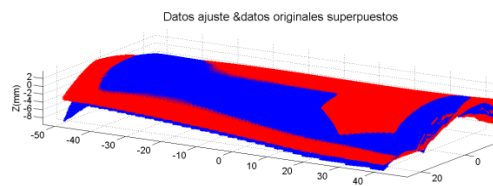


Fig. 15. Superposición de la superficie mediante datos originales y el ajuste tras la eliminación de la zona dañada.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha puesto de manifiesto el potencial mediante el uso de la técnica DIC para la detección y medición de los desplazamientos fuera de plano originados en estructuras con defectos superficiales. Tras un postprocesado de estos datos permiten también caracterizar estos daños mediante su geometría.

Se ha desarrollado una metodología experimental basada en el desarrollo de un algoritmo que permite cuantificar el volumen del daño generado reconstruyendo la superficie original, eliminando previamente la zona de daño (Sección 2.1).

La metodología propuesta se ha validado comparando los resultados con la medida de un daño usando técnicas experimentales tradicionales de medición, como son el uso de un reloj comparador y un perfilómetro para determinar el contorno y profundidad del defecto (Sección 2.2). La diferencia de los resultados del volumen del daño obtenidos mediante ambas técnicas (DIC y tradicional) es del 2% aproximadamente. Posteriormente se ha aplicado la metodología experimental en daños de distintas geometrías y en probetas cuya superficie es curva obteniendo el volumen del daño generado (Sección 3).

REFERENCIAS

- [1] Wu, G., Yang, J.M., Hahm, H.T., "The impact properties and damage tolerance and of bi-directionally reinforced fiber metal laminates", *Journal of Materials Science*, **42**, 948-957 (2007)
- [2] Karbhari, V.M., "Impact characterization of RTM composites-II: Damage mechanisms and damage evolution in plain weaves", *Materials Science*, **34**, 5641-5648 (1999)
- [3] Riedel, W., Nahme, H., White, D.M., Clegg, R.A., "Hypervelocity impact damage prediction in composites: Part II experimental investigation and simulations", *Impact Engineering*, **33**, 670-680 (2006)

- [4] Okafor, A.C, Otieno, A.W., Dutta, A., Rao, V.S., “Detection and characterization of high-velocity impact damage in advanced composite plates using multi-sensing techniques”, *Composite Structure*, **54**, 289-297 (2001)
- [5] Meo, M., Polimeno, U., Zumpano, G., “Detecting Damage in Composite Material Using Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy Methods”, *Applied Composite Materials*, **15**, 115-126 (2008)
- [6] Chu, T., Ranson, W.F., Sutton, M.A., Peters, W.H., “Applications of digital image correlation to experimental mechanics“, *Experimental Mechanics*, **253**, 232-244 (1985)
- [7] Pan, B., Qian, K., Xie, H., Asundi, A., “Two dimensional digital image correlation for in plane displacement and strain measurement. A review”, *Measurement Science and Technology*, **20**, 1-17 (2009).
- [8] Farin, G., *Curves and Surfaces for CAGD. A Practical Guide*, 5th Edition. Morgan Kaufmann Publishers (2002)
- [9] Lee, D.T., Schachter, B., ”Two Algorithms for Constructing Delaunay Triangulations”, *International Journal of Computer Information Sciences*, **10**, 219-242 (1980)
- [10] www.correlatedsolution.com/vi-3d-2010

SURFACE DAMAGE CHARACTERIZATION USING FULL FIELD OPTICAL TECHNIQUES

Abstract – In this research, it is studied the damage produced on specimens with different geometries. To develop the investigation the non contact optic technique Digital Image Correlation (DIC) is used to measure the out of plane displacements of the defect. The information provided by DIC is post processed with an algorithm designed to quantify geometrical aspects, for example, the area, the volume or the maximum depth of the damage. The results are compared with other obtain with traditional experimental techniques as a dial indicator and a profile projector. Finally damage with irregular geometries, difficult to measure with traditional techniques, are measured with the experimental methodology proposed, highlighting the potential of DIC to analyze external structural damage.

Keywords – Surface damage, Digital Image Correlation, Geometry Measurement.