

APLICACIONES INDUSTRIALES DE TÉCNICAS ÓPTICAS DE CAMPO COMPLETO PARA LA MEDIDA DE TENSIONES Y DEFORMACIONES EN ELEMENTOS DE MÁQUINAS

INDUSTRIAL APPLICATION OF FULL FIELD OPTICAL TECHNIQUES TO MEASURE STRESS AND STRAIN IN MACHINE ELEMENT

ELÍAS LÓPEZ-ALBA

Ing. Universidad de Jaén, España, elalba@ujaen.es

LUÍS FELIPE SESÉ

Ing. Universidad de Jaén, España lfelipe@ujaen.es

JOSÉ MANUEL VASCO-OLMO

Ing. Universidad de Jaén, España jvasco@ujaen.es

FRANCISCO ALBERTO DÍAZ-GARRIDO

Dr. Universidad de Jaén, España fdiaz@ujaen.es

Recibido para revisar 31-10-2012, aceptado Mayo 17 de 2013, versión final Septiembre 27 de 2013.

RESUMEN: En las últimas décadas, diversas técnicas ópticas utilizadas de modo experimental han tenido una repercusión significativa en el avance de la investigación en diversas disciplinas de la ingeniería. Técnicas ópticas como Correlación Digital de Imágenes, técnicas basadas en el efecto Moiré o fotoelasticidad han sido desarrolladas, mejoradas y aplicadas en diversos ámbitos de la ciencia. El continuo desarrollo de estas técnicas ha hecho posible extender su uso a diferentes aplicaciones industriales. El objetivo de este artículo, es presentar el potencial de las citadas técnicas en el campo de la industria, para lo cual se hará una revisión de los estudios documentados y se pondrá de manifiesto su posible aplicabilidad en diversos sectores industriales.

PALABRAS CLAVE: Correlación Digital de Imágenes, Moiré, Fotoelasticidad, Aplicaciones Industriales

ABSTRACT: In the last decades, several optics techniques have been experimentally applied to solve engineering problems, having a considerable impact on the advances of researchers in different engineering disciplines. Techniques such as Digital Image Correlation, techniques based in Moiré effect or photoelasticity have been developed, improved and applied in different fields. The continuous improvement of these techniques has made it possible to extend the use of these techniques to industrial application. The objective of this paper is to look into the potential of the mentioned techniques in the field of the industry. Thus a review of the publications is done and emphasis of their applicability in different areas of the industry is commented.

KEYWORDS: Digital Image Correlation, Moiré, Photoelasticity, Industrial Applications

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de los defectos originados en estructuras al ser sometidas a cargas de diversa naturaleza, así como la integridad estructural de las mismas ha sido de gran interés en el campo de la investigación. Muchas han sido las técnicas experimentales desarrolladas para su aplicación sobre la medición de diversos parámetros de los daños producidos, pudiéndose dividir en dos grandes áreas: Técnicas destructivas (como la Microscopía, Metalografía, Fractografía, técnica de delaminación)

y no destructivas (éstas últimas incluyen Rayos X, C-Scan, Ultrasonidos, Espectroscopia, Extensometría, Serografía o Termografía entre otras [1]).

Los continuos avances de la tecnología y su abaratamiento han permitido la aplicabilidad y evolución de técnicas ópticas experimentales. Estas técnicas pueden clasificarse en técnicas interferométricas, como holografía interferométrica, speckle interferométrico, interferometría por Moiré; y técnicas no-interferométricas como métodos de rejilla [2] y Correlación Digital de Imágenes.

La técnica Correlación Digital de Imágenes, es una técnica de campo completo para la medida de desplazamientos y deformaciones [3]. La técnica se puede aplicar para medir el campo de desplazamientos y deformaciones en sólidos sujetos a una sollicitación mecánica. Gran número de investigaciones se han basado en el uso de la técnica de Correlación Digital de Imágenes (DIC).

Las técnicas ópticas basadas en el efecto Moiré tales como Proyección de franjas, Moiré por proyección o Moiré por sombra son técnicas ópticas de campo completo que permiten la medida de geometrías o desplazamientos fuera de plano de manera experimental. No obstante, la técnica de Moiré geométrico es usada para la determinación de desplazamientos en el plano [4]. Por otro lado, Proyección de Franjas has sido utilizada en áreas como la metrología, detección de formas [5,6], la caracterización de materiales [7], o el análisis de vibraciones [8].

La fotoelasticidad es una técnica óptica de campo completo que se emplea para el análisis de tensiones en elementos mecánicos. A través de esta técnica se puede analizar la distribución de la diferencia de tensiones principales sobre el modelo de estudio [9]. Esta técnica es muy útil en la fase de modelización ya que permite el estudio de tensiones en prototipos así como validar experimentalmente estudios numéricos previos.

En el presente artículo se pretende dar un enfoque industrial en el uso de las técnicas ópticas de campo completo. Para ello se realizará una revisión de las aplicaciones industriales desarrolladas, y se comentarán las ventajas y desventajas que las técnicas pueden tener para su uso en la industria.

2. DESCRIPCIÓN DE LAS TÉCNICAS: FUNDAMENTOS

2.1. Correlación Digital de Imágenes

Correlación Digital de Imágenes (DIC) es un método óptico no invasivo, que mediante análisis de imágenes digitales de un objeto sometido a ensayo, permite obtener el campo completo de desplazamientos en la superficie del mismo. Cuando los desplazamientos o deformaciones producidos durante el ensayo son fuera del plano de la probeta, el estudio se realiza en tres

dimensiones (sistema estereoscópico).

Para poder analizar mediante DIC las imágenes de un ensayo, la probeta debe presentar una distribución de intensidad en la escala de grises (Figura 1).

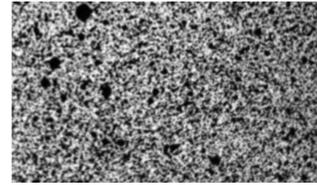


Figura 1. Imagen de speckle para procesar mediante DIC

Tras capturar imágenes durante el ensayo (mientras se aplica carga), se tiene una secuencia de estados desde el estado inicial de deformación o de referencia (antes de comenzar el ensayo) hasta el estado final tras la realización del ensayo. Mediante el procesado de las imágenes, correspondientes a los diferentes estados, la técnica de correlación digital de imágenes calcula el desplazamiento ocurrido durante el ensayo, comparando cada imagen de la secuencia obtenida durante el ensayo con la de referencia. Para un punto P cualquiera en la imagen de referencia, se genera una faceta cuadrada de dimensiones $(2M+1) \times (2M+1)$ de pixeles centrada en el punto $P = (X_o, Y_o)$ que será buscada en la imagen deformada mediante los algoritmos disponibles en la bibliografía [10] (Figura 2).

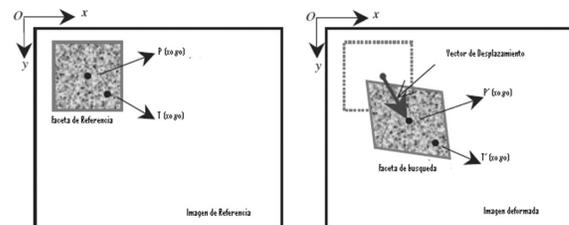


Figura 2. Imagen de referencia e imagen deformada [10]

La correlación se realizará para cada faceta en la que se halla dividido el área de interés. Para el análisis en tres dimensiones es necesario un sistema estereoscópico compuesto por dos cámaras (Figura 3).

El esquema mostrado en la Figura 3 debe ser debidamente calibrado, consistiendo en la determinación de la posición relativa entre las cámaras y el objeto y los parámetros propios de las cámaras.

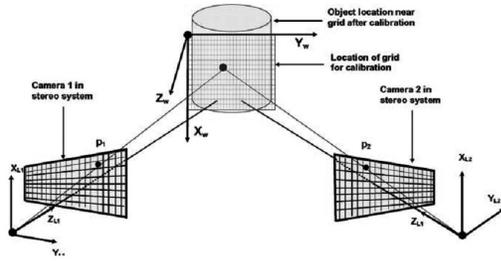


Figura 3. Esquema del sistema de estereovisión 3D [11]

Si bien, el proceso de calibración es relativamente sencillo, empleándose unas rejillas con determinados puntos equiespaciados y cuyas cotas son conocidas.

2.2. Técnicas basadas en el efecto Moiré

Estas técnicas se basan en la interferencia de las ondas de luz [4]. Su principio es la comparación de una rejilla de referencia con otra rejilla que se ha deformado durante el ensayo. Al hacerlas interferir aparecerá un patrón de franjas de Moiré, resultado de la interferencia constructiva y destructiva de las ondas de luz, a partir de las cuales se conoce los movimientos relativos que han ocurrido. Las técnicas basadas en éste efecto se pueden dividir en función de si se desean medir desplazamientos en el plano o fuera del mismo.

Si se desea información sobre los desplazamientos ocurridos en el plano, se debe de comparar un patrón de referencia con un patrón de franjas unido a la probeta que sea ensayada, siendo esta técnica conocida como Moiré Geométrico [4]. En la Figura 4 se observa cómo la luz atraviesa una primera rejilla de referencia y seguidamente una rejilla adherida a la probeta, la cual al deformarse creará unas interferencias constructivas y/o destructivas, generando citadas franjas de Moiré.

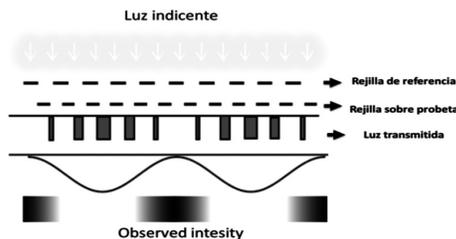


Figura 4. Efecto Moiré para desplazamientos en una dirección

Denotando U al desplazamiento en el plano medido, N al orden de franja de Moiré y p al paso de la rejilla, se puede relacionar de la siguiente manera:

$$U = Np \tag{1}$$

Recordando las reglas de los sólidos deformables y la relación entre la tensión y los desplazamientos:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \tag{2}$$

Siendo ε_x la deformación unitaria, u es la longitud final y x la longitud inicial.

Sabiendo la relación entre el orden de franja (N) y el desplazamiento (Np), la deformación unitaria queda como sigue:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial(Np)}{\partial x} = p \frac{\partial N}{\partial x} \tag{3}$$

Este resultado permite calcular la deformación unitaria y, a partir de ésta, la tensión, a lo largo del eje perpendicular a las líneas de la rejilla.

Si lo que se desea es conocer los desplazamientos fuera de plano, la rejilla que se compara con la de referencia no está unida a la probeta, sino que está proyectada [4]. En este grupo, se enmarcan técnicas como Moiré por sombra, o proyección de franjas.

En el caso de Moiré por sombra (Figura 5), la rejilla se encuentra sobre la probeta y está iluminada de forma oblicua. Esta iluminación proyecta la sombra de la rejilla sobre el objeto, por lo que las franjas de Moiré aparecen debido a la interferencia de rejilla y sombra de la misma.

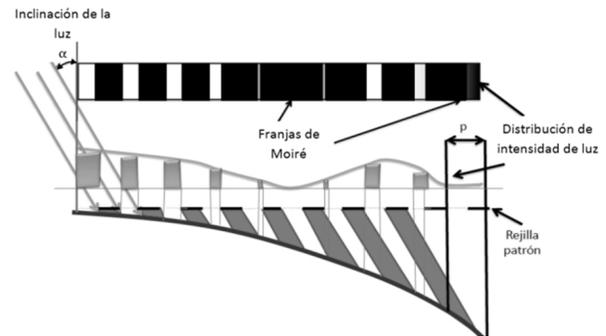


Figura 5. Esquema Moiré por sombra

La relación entre el orden de franja y la separación de la probeta a la rejilla es similar a lo descrito para deformaciones en plano en el caso anterior, aunque en este caso hacen referencia al espaciado entre rejilla y objeto.

Proyección de Franjas es una técnica óptica de campo completo, que se puede considerar como una evolución de la técnica de Moiré por proyección, permitiendo determinar desplazamientos o diferencia de forma en dirección Z de una superficie con respecto a otra de referencia. Para ello recurre a la captura de imágenes en dos fases. La primera corresponde a la proyección de un patrón de franjas sobre una superficie que se toma de referencia [12]. En el siguiente paso el elemento sobre el que se proyecta la rejilla es sometido a un ensayo con desplazamiento fuera de plano, el cual se quiere medir, o es dispuesto sobre esta superficie un elemento del que se quiera determinar su forma. Debido a que la imagen de referencia tiene un patrón de franjas de amplitud, frecuencia y fase características, se puede calcular la información de la diferencia de cota fuera de plano entre estados [13].

2.3. Fotoelasticidad

La fotoelasticidad es una técnica óptica experimental que se emplea para el análisis de tensiones en elementos mecánicos. Existen distintas formas de implementarla, en transmisión y en reflexión.

2.3.1. Fotoelasticidad en transmisión

Ciertos materiales transparentes no cristalinos son ópticamente isotrópicos bajo condiciones normales, pero pasan a ser doblemente refractivos o birrefringentes cuando son sometidos a sollicitaciones de carga. Este fenómeno se denomina birrefringencia o doble refracción [9] (Figura 6).

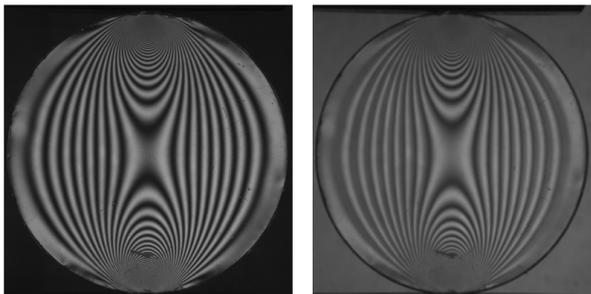


Figura 6. Patrón de franjas, iluminando al modelo con: luz monocromática (izquierda), luz blanca (derecha)

Así, a través de la técnica de fotoelasticidad, la diferencia de tensiones principales sobre el modelo puede ser evaluada:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{NF_\sigma}{h} \tag{4}$$

Donde N es el orden de franja, F_σ es la constante de franja del material (N/mm) y h es el espesor del modelo.

El equipo empleado en fotoelasticidad es el polariscopio (Figura 7).

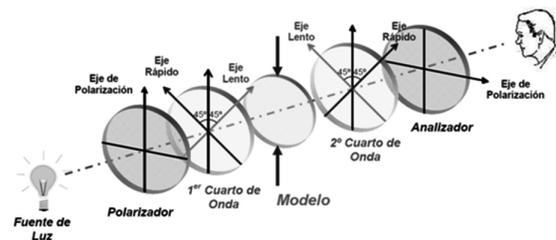


Figura 7. Esquema polariscopio circular

Para el análisis y procesado de las franjas son tres los métodos más comúnmente empleados [14]: el método de análisis del contenido espectral, el método basado en las transformadas de Fourier y el método de variación de fase o phase-stepping. Para el caso particular del método de phase-stepping es preciso el empleo de algoritmos de desenrollamiento o unwrapping [15] con el fin obtener mapas continuos de tensiones, Figura 8. Dentro de la literatura son numerosos los métodos de phase-stepping desarrollados por distintos autores [9]. Entre estos métodos cabe destacar los desarrollados por Hecker y Morche [16] y Patterson y Wang [17].

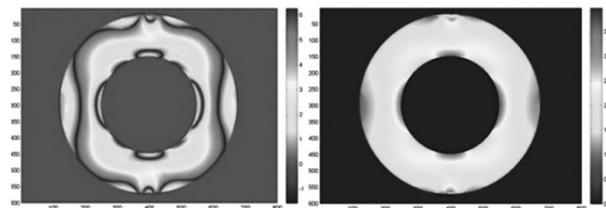


Figura 8. Mapa isocromático envuelto (arriba), mapa isocromático desenrollado (abajo)

2.3.2. Fotoelasticidad en reflexión

La fotoelasticidad en reflexión es una extensión de la fotoelasticidad en transmisión para el análisis de

materiales opacos [9]. Así, un fino recubrimiento birrefringente es pegado en el prototipo con un adhesivo reflectante (Figura 9). A diferencia de la fotoelasticidad en transmisión, el plástico birrefringente no es cargado directamente, pero las deformaciones desarrolladas sobre la superficie del modelo son transmitidas a través del adhesivo al recubrimiento. En vista de esto el coeficiente de Poisson tiene una gran influencia en la interpretación de la respuesta óptica del recubrimiento.

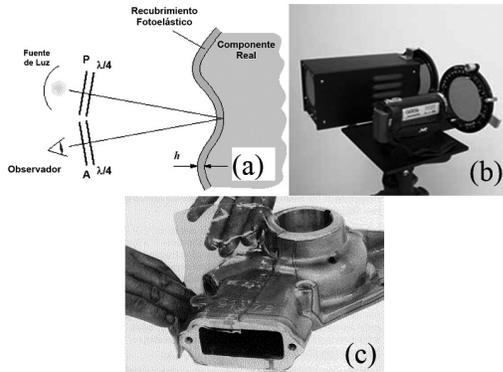


Figura 9. a) Principio de la fotoelasticidad en reflexión, b) Polariscopio de reflexión, c) Recubrimiento fotoelástico aplicado sobre una bomba de agua

3. APLICACIONES INDUSTRIALES

3.1. Aplicaciones industriales de la técnica DIC

La técnica de Correlación Digital de Imágenes, ha sido empleada en diversos sectores industriales. En el sector aeronáutico Du et al. [18] analizaron el crecimiento de una grieta ante un estado de carga en un panel perteneciente al ala de un avión, siendo utilizada la técnica DIC por primera vez en este campo. En el estudio explica cómo puede influir la propagación de la grieta debido a los refuerzos existentes, (Figura 10).

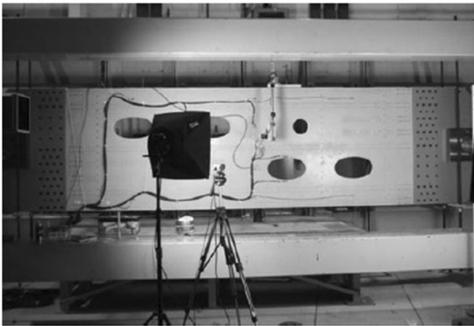


Figura 10. Ensayo realizado usando DIC [18]

En el campo de la automoción, Lichtenberger y Schreier [19] analizaron un impacto producido por la colisión de un vehículo contra un peatón. Para ello mediante el uso de cámaras de alta velocidad, fue posible ver los efectos del impacto producido contra el vehículo evaluando la energía absorbida.

Reu y Miler [20] realizaron un análisis de la utilización de la técnica DIC combinada con el uso de cámaras de alta velocidad para poder analizar eventos a altas frecuencias, potencialmente a 100kHz. Para ello analizaron impactos a alta velocidad sobre estructuras y estudiaron el comportamiento de los mismos ante eventos sísmicos, comparando los resultados con técnicas experimentales tradicionales como medidores de desplazamientos, presentando DIC la ventaja de obtener datos en toda la región de interés y obteniendo la medida de desplazamientos y deformaciones. Adicionalmente, Yoneyama et al. [21] analizaron la deflexión en estructuras de acero siendo pioneros en el uso de la técnica DIC para la medición en campo, como es el caso de inspecciones rutinarias en grandes estructuras como puentes (Figura 11).

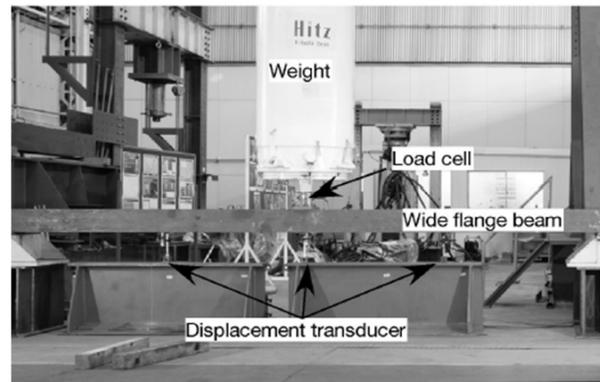


Figura 11. Ensayo realizado para obtener la deflexión [21]

En relación a la mejora en los análisis de los procesos de fabricación, Tiwari et al. [22] analizaron las deformaciones que surgen en el conformado de chapas por explosión. En sus ensayos analizaron el comportamiento dinámico de la estructura tras producirse el fenómeno de explosión (Figura 12).

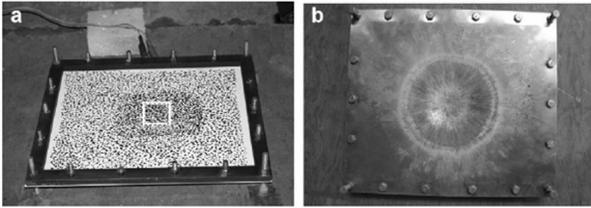


Figura 12. a) Aluminio 6061 montado sobre un marco de acero. b) Parte trasera de la placa tras la explosión DIC [22]

Así mismo, Helfrick et al. [23] analizaron mediante DIC la funcionalidad de elementos de máquinas sometidos a vibraciones, validando de forma numérica los modelos desarrollados.

En el campo de la medicina, Evans y Holt [24] realizaron avances sobre las propiedades mecánicas de la piel humana comparando los resultados con DIC y elementos finitos. Wang et al. [25] analizaron las propiedades microscópicas mecánicas de un cartílago, concluyendo sobre las ventajas de la utilización de la técnica DIC frente a otros métodos convencionales.

Los resultados mostrados reflejan el potencial de la técnica Correlación Digital de Imágenes en distintos campos de la ingeniería. Las ventajas que presenta la técnica se resumen en una fácil preparación de los objetos a medir, sencilla calibración del sistema estereoscópico con respecto al objeto y una relativa rapidez para obtener resultados. Si bien en la situación actual también se encuentran algunas desventajas como es: la exactitud de los resultados depende de la calidad de las imágenes, teniendo especial importancia las condiciones lumínicas de los ensayos; en ciertas aplicaciones se requieren cámaras de alta velocidad cuyo coste es elevado; a medida que el tamaño del objeto a ser analizado aumenta, disminuye la precisión de los resultados.

3.2. Aplicaciones industriales de las técnicas basadas en el efecto Moiré

Como se ha comentado, Moiré Geométrico permite determinar desplazamientos y deformaciones ocurridas en el plano de estudio, por lo que ha sido muy útil en diferentes áreas de la industria como la electrónica

El avance de la tecnología electrónica está basado en el procesado de señales cada vez más rápido lo que

normalmente conlleva a un aumento de temperatura en los componentes electrónicos, los cuales están ensamblados cada día de manera más compacta. Además, estos componentes están contruidos de muy diferentes materiales, con diferentes propiedades térmicas y mecánicas, lo cual crea una serie de tensiones y deformaciones que deben de ser estudiadas para diseñar de manera óptima dicho ensamblaje.

Para la determinación estas deformaciones y tensiones en el plano se ha recurrido a Moiré Geométrico [7]. Un desafío en estos estudios ha sido la adhesión de una rejilla de pequeño tamaño al elemento estudiado y que no rigidice el conjunto (Figura 13). En ocasiones esta rejilla ha sido creada por métodos no mecánicos como ha sido la interferometría de haces láser o haces de electrones, consiguiendo rejillas con un paso del orden del tamaño de la longitud de onda de la luz.

La biomecánica también ha sido una de las que han utilizado Moiré geométrico. En éste caso se ha aplicado en el estudio de las tensiones a las que se someten piezas dentales como muestran Wang y Weiner [26], estudiando la distribución de rigidez a lo largo de la sección de dicha pieza dental experimentalmente (Figura 14).

Por otro lado, la información que ofrece Proyección de Franjas sobre las formas o deformaciones fuera de plano que experimenta un objeto también es de gran interés en la industria.

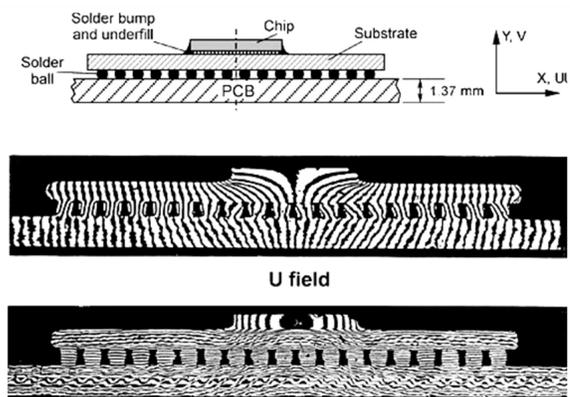


Figura 13. Campo de desplazamientos de un ensamblaje electrónico tipo FC-PBGA utilizando una carga bi-térmica de $\Delta T = -60^\circ\text{C}$ [7]

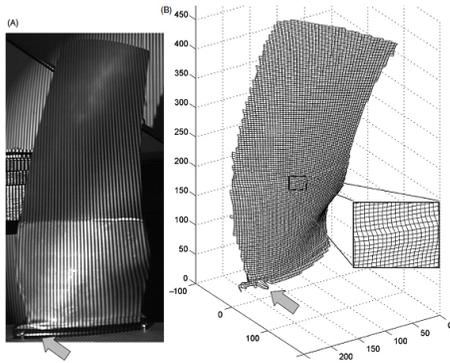


Figura 14. Campo de desplazamientos en dirección X y campo de distribución de tensiones en porcentaje [26]

En el análisis del comportamiento de materiales, Proyección de Franjas ha logrado realizar el estudio dinámico del proceso de fractura de una probeta sometida a tracción. León-Huerta y Martínez [7] realizaron un seguimiento de la variación del espesor de probetas de tracción para detectar la formación de la estricción y la banda de cizalladura, determinando el comportamiento del material cuando se somete a deformaciones elásticas, plásticas y en el momento de la rotura.

Por otro lado, Heredia y Patterson [13] muestran que utilizando un set up sencillo formado por un proyector y una cámara se consigue realizar un control de calidad de elementos manufacturados para la industria aeronáutica. De esta manera se puede incluso realizar una comparativa del elemento fabricado con su modelo en formato CAD, pudiendo realizar el proceso de calidad y sirviendo de realimentación al proceso de diseño y producción (Figura 15).

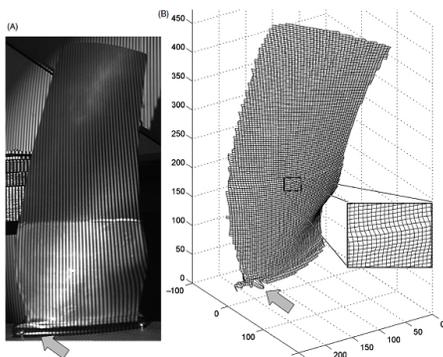


Figura 15. Determinación de la forma de un alabe de turbina. A) Imagen con rejilla proyectada B) Imagen digitalizada del alabe. La flecha muestra errores debidos a recubrimientos brillantes del álabe [13]

Otra aplicación que se desprende de esta técnica es la ingeniería inversa como muestran Burke y Bothe [27] donde mediante proyección de franjas se consigue realizar un modelo en CAD de un objeto de formas complejas como es una maqueta de avión (Figura 16).

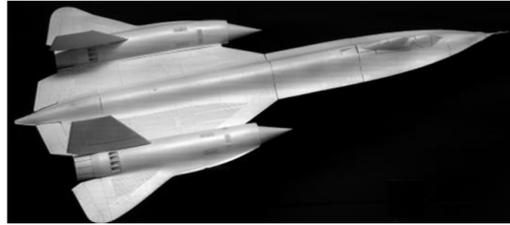


Figura 16. Digitalización de una maqueta de un avión en tres dimensiones [27]

Para facilitar el set up y el proceso experimental, se recurre a un sencillo proceso de calibración basado en fotogrametría, el cual no necesita más que tomar algunas imágenes de un patrón de formas determinado en diferentes posiciones permitiendo parametrizar el sistema óptico. Para la unión de las diferentes partes digitalizadas del modelo, se recurre a un software comercial denominado InnovMetric Polyworks™.

La posibilidad de poder llevar a cabo la técnica de Proyección de imágenes en tiempo real ha permitido utilizarla para determinar deformaciones a alta velocidad. En el campo de la mecánica de vibraciones, Rodríguez-Vera y Genoves [8] desarrollaron un procedimiento para medir vibraciones de elementos de pequeño tamaño consiguiendo una resolución de micrómetros mediante la técnica de proyección de franjas (Figura 17), la cual permite dicho estudio sin recurrir a recubrimientos de la probeta, no interfiriendo así a la integridad de la misma. De esta manera se logró estudiar el campo de desplazamientos completo al ser excitados con su frecuencia de resonancia, utilizándose para la caracterización de materiales, detección de zonas de rotura o tensiones residuales.

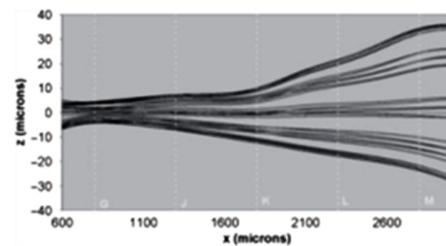


Figura 17. Perfiles de la vibración de una viga en voladizo para el análisis de frecuencia de vibración y la amplitud [8]

También se ha aplicado esta técnica para el estudio de la vibración de instrumentos musicales como un tambor [28] (Figura 18).

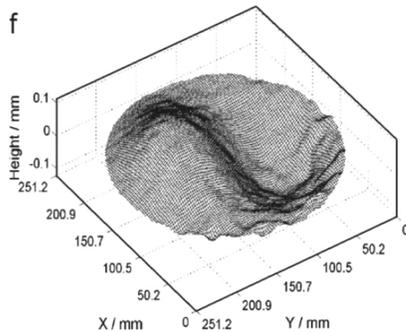


Figura 18. Gráfica del parche de un tambor vibrando[28]

Este análisis es importante para la optimización de su diseño al poder estudiar su comportamiento dinámico fuente de su sonido característico.

En los casos anteriores se recurre a una cámara con una velocidad de captura de imágenes alta para poder procesar el movimiento estudiado. Si no se dispone de cámaras de esa tasa de captura, se puede recurrir a la utilización de una iluminación electroboscópica como realizaron Arai y Yokozeki [29], quienes recurrieron a esta iluminación combinada con Moiré por sombra para el estudio del comportamiento de un álabe de turbina sometido a su frecuencia de resonancia.



Figura 19. Mapa de fase de la superficie escapular (izquierda), imagen 3D de la superficie escapular (derecha) [30]

Proyección de Franjas también se han aplicado ampliamente en la biomecánica. Gomes y Sesselmann [30] recurrieron a ella para realizar el estudio cinemático del movimiento de la escápula (Figura 19), evitando así los complejos sistemas intrusivos propuestos entonces. De esta manera se logra un conocimiento del movimiento de dicho elemento estructural humano al realizar movimientos de hombro y brazo y de la

progresión en la recuperación del músculo, pudiendo ser también una herramienta de control en procesos de rehabilitación.

3.3. Aplicaciones industriales de la técnica de fotoelasticidad

La técnica de fotoelasticidad, ya sea en transmisión o reflexión, se ha aplicado en distintas áreas. Patterson et al. [31] llevaron a cabo un estudio del campo de tensiones en un álabe de un compresor cuando es sometida a vibración hasta su estado de resonancia como alternativa al estudio mediante galgas extensométricas, obteniendo de esta forma información a lo largo de toda la superficie y no sólo de puntos específicos de la misma (Figura 20). Para ello, fue necesaria la adhesión de material fotoelástico de reflexión.

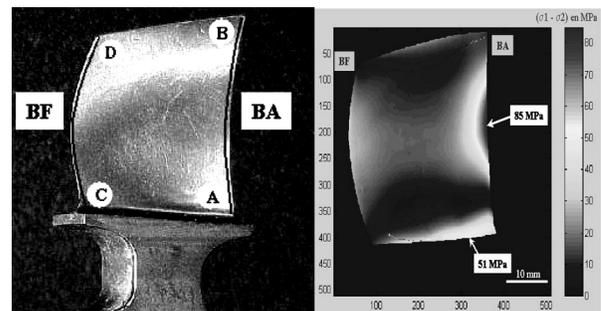


Figura 20. Álabe de compresor ensayado a 5 kHz (izquierda) y el mapa resultante de esfuerzo cortante máximo (derecha) [31]

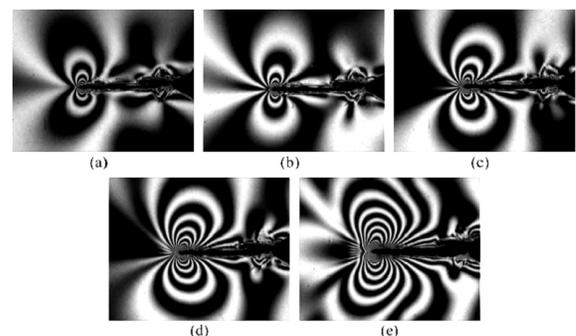


Figura 21. Secuencia de patrones de franjas isocromáticas a incrementos de 45 N de carga durante un ciclo de sobrecarga. a) 10 N, b) 55 N, c) 100 N, d) 145 N, e) 190 N [34]

Muchos investigadores han mostrado gran interés en la aplicación de la técnica de fotoelasticidad al campo de la mecánica de la fractura. Así, Sanford y Dally

[32] fueron los primeros autores que desarrollaron una metodología para la determinación de los factores de intensificación de tensiones para modo mixto y el T-stress a partir del análisis de datos isocromáticos. Por otro lado, James et al [33] llevaron a cabo un estudio del cierre prematuro de grieta originado por plasticidad debido a cargas de fatiga. Además de esto, Colombo et al. [34] estudiaron el efecto de una sobrecarga en el cierre prematuro de grieta por plasticidad bajo cargas de fatiga (Figura 21).

Lesniak, Zhang y Patterson [35] diseñaron un nuevo instrumento para el análisis fotoelástico de eventos transitorios. Este instrumento se basa en el método de phase-stepping de Patterson y Wang [17], permitiendo que cuatro imágenes de dicho método fueran capturadas simultáneamente, requiriendo sólo una cámara. El grado de innovación aportado fue que se incrementó notablemente el potencial de la técnica de fotoelasticidad para estudios transitorios y dinámicos. En la actualidad, este instrumento denominado poleidoscopio se emplea extensamente en la industria del vidrio como dispositivo para el control de calidad [36].

4. CONCLUSIONES

Se han mostrado los fundamentos teóricos de DIC, de las técnicas basadas en el efecto Moiré y de Fotoelasticidad. A partir de esa base teórica se ha podido comprobar que existen numerosas aplicaciones en diferentes campos de la ciencia. De esta manera, se pone de manifiesto, que el uso de la técnica de DIC, es aceptada en el campo de la investigación al igual que otras técnicas tradicionales. Presentando un extraordinario potencial de desarrollo pudiendo extrapolar su uso análisis de calidad en procesos (medida de ajustes), estudio de problemas estructurales o estudio de problemas en biomecánica.

Dentro de la familia de técnicas basadas en Moiré, proyección de franjas es una de las más utilizadas dado que tiene un coste reducido y permite la determinación de formas y deformaciones en fuera de plano. Tiene aplicabilidad en procesos de metrología, ingeniería inversa, estudio de deformaciones a baja o alta velocidad e incluso la biomecánica con buenos resultados de manera sencilla. No obstante, se ha detectado que aun existen puntos objeto de investigación para la mejora de las técnicas mostradas y su aplicabilidad a la industria.

La técnica de fotoelasticidad no sólo es una herramienta experimental para evaluar el campo de tensiones sino que ha contribuido significativamente en la validación experimental de modelos analíticos y numéricos para el análisis de tensiones. Los resultados obtenidos en las distintas aplicaciones han sido satisfactorios, con lo que pone de manifiesto el gran potencial que presenta esta técnica, demostrando que es de gran aplicabilidad a nivel industrial.

Se pueden enumerar una serie de ventajas y desventajas (Tabla 1) observadas para cada una de las técnicas y, de esta forma, dejar a disposición del lector decidir cuál de ellas emplear en función de sus necesidades.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de las técnicas

DIC
<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> Fácil preparación de los modelos de estudio. Rapidez en la obtención de los resultados. Obtención directa del campo de desplazamientos.
<p>Desventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> Necesidad de calibración. Resultados dependientes de la calidad de las imágenes.
Técnicas basadas en el efecto Moiré
<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> Sencillez de procesado de datos. Reducido coste.
<p>Desventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> En Moiré Geométrico puede ser complejo aplicar la rejilla En Proyección de Franjas, necesidad de calibración y proceso de desenvolvimiento de fase. Resultados muy sensibles a la calidad de las imágenes.
Fotoelasticidad
<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> Equipo relativamente económico. Fácil implementación. En reflexión: Aplicable a modelos opacos.
<p>Desventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> Necesidad de polariscopio. Necesidad de desenvolvimiento de fase (unwrapping). En transmisión: Sólo aplicable a modelos transparentes.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha llevado a cabo con la financiación de la Junta de Andalucía a través del Proyecto de

Investigación de Excelencia TEP 2009-5177, proyecto financiado con Fondos Europeos de Desarrollo Regional (FEDER).

REFERENCIAS

- [1] Gao, S.L. and Kim, J.K. Scanning acoustic microscopy as a tool for quantitative characterisation of damage in CFRP's specimens, *Composites*, 59, pp. 345-354, 1999.
- [2] Sirkis, J.S. and Lim, T.J. Displacement and strain-measurement with automated grid methods, *Experimental Mechanics*, 31, pp. 382-388, 1991.
- [3] Peters, W.H. and Ranson W.F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis, *Optics Engineering*, 21, pp. 427-431, 1981.
- [4] Cloud, G.L. *Optical Methods in Experimental Mechanics*. Experimental Techniques, 2005-2006.
- [5] Heredia-Ortiz M. and Patterson, E.A., On the Industrial Applications of Moiré and Fringe Projection Techniques, *Strain*, 39, pp. 95-100, 2003.
- [6] Múnera, N., Lora, G.J. y García-Sucerquia, J., Evaluación de Proyección de Franjas y escaneo Láser para la reconstrucción 3D de piezas dentales, *DYNA Colombia*, 79, pp. 65-73, 2012.
- [7] León-Huerta, A., Martínez A., Rayas J.A. and Cordero, R. Dynamic measurement of strain in test specimen by fringe projection, *Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering*, 7063, 2008.
- [8] Rodriguez-Vera, R., Genovese K., Rayas J.A. and Mendoza-Santoyo F., Vibration analysis at microscale by Talbot fringe projection method, *Strain*, 45, pp. 249-258, 2009.
- [9] Ramesh, K., *Digital Photoelasticity. Advanced Techniques and Applications*, Berlin, Springer-Verlag, 2000.
- [10] Pan B., Qian K., Xie H. And Asundi A., Two dimensional digital image correlation for in plane displacement and strain measurement. A review, *Measurement Science and Technology*, 20, 2009.
- [11] Sutton M. A., Orteu J.J. And Schreier H.W, *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*, Springer, 2009.
- [12] Takeda K. and Mutoh K., Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes, *Applied Optics*, 22, pp. 3977-3982, 1983.
- [13] Heredia-Ortiz, M. and Patterson, E.A. Location and Shape Measurement Using a Portable Fringe Projection System, *Experimental Mechanics*, 45, pp.197-204, 2005.
- [14] Patterson, E.A., *Digital Photoelasticity: Principles, Practices and Potential*, *Strain*, 38, pp. 27-39, 2002.
- [15] Siegmann, P., Backman D, and Patterson E.A. A robust approach to demodulating and unwrapping phase-stepped photoelastic data, *Society for Experimental Mechanics*, 45-3, pp. 278-289, 2005.
- [16] Hecker, F.W. and Morche, B. Computer-aided measurement of relative retardations in plane photoelasticity, In: Wieringa H (ed) *Experimental stress analysis*, Martinus Nijhoff, Dordrecht, The Netherlands, pp. 535-542, 1986.
- [17] Patterson, E.A. and Wang, Z.F. Towards full-field automated photoelastic analysis of complex components, *Strain*, 27, pp 49-56, 1991.
- [18] Du, Y., Diaz F.A., Burguete R.L. and Patterson E.A., Evaluation Using Digital Image Correlation of Stress Intensity Factors in an Aerospace Panel, *Experimental Mechanics*, 51, pp 45-57, 2010.
- [19] Lichtenberger, R. and Schreier, H. Contactless and full field 3D-deformation measurement for impact and crash test. Article, Limes Messtechnik und Software GmbH, 2005.
- [20] Reu, P.L. and Miler, T.J. The application of high-speed digital image correlation, *J Strain Analysis*, 43,2008.
- [21] Yoneyama, S., Kitagwa A., Kitamura, K. and Kikuta, H. Deflection distribution measurement of steel structure using digital image correlation, *Optical Diagnostics, Proceedings of SPIE*, 5880, 2005.
- [22] Tiwari, V., Sutton, M.A., Mcneill, S.R., Shaowen X., Xiaomin, D., Fourney, W.L. and Bretall D. Application of 3D image correlation for full field transient plate deformation measurements during blast loading, *International journal of Impact Engineering*, 36, pp. 862-874, 2009.
- [23] Helfrick, M.N., Niezrecki, C., Avitabile P. and Cchmidt T. 3D digital image correlation methods for full-field vibration measurement, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25, pp. 917-927, 2011.
- [24] Evans, S. L. and Holt, C.A. Measuring the mechanical properties of human skin in vivo using digital image

- correlation and finite element modeling, *J. Strain Analysis*, 44, pp. 337-345, 2009.
- [25] Wang, Y., Liu, H., Gao L., Xu B. and Zhang C., Test the Mechanical Properties of Articular Cartilage using Digital Image Correlation Technology, *Procedia Environmental Sciences*, 8, pp. 191-196, 2011.
- [26] Wang, R.Z., and Weiner S. Strain-structure relations in human teeth using Moiré fringes, *Journal of Biomechanics*, 31, pp. 135-141, 1998.
- [27] Burke, J., Bothe T., Osten, W. and Hess, C. Reverse engineering by fringe projection, *Proceedings of SPIE*, pp. 4778, 312-324, 2002.
- [28] Su, X.Y., Zhang, Q.C., Li, J. and Li, Z.R., Optical 3D shape measurement for vibrating drumhead, *Proc SPIE*, 6027, pp. 449-455, 2006.
- [29] Arai, Y. and Yokozeki, S. Experimental Modal Analysis for Vibration with Large Amplitude using Moiré Topography, *SPIE Proc*, 3098, pp.176-182,1997.
- [30] Gomes P.F., Sesselmann, M., Faria, C.D., Araújo, P. and Teixeira-Salmela, L. Measurement of scapular kinematics with the moiré fringe projection technique, *Journal of Biomechanics*, 43, pp. 1215-1219, 2010.
- [31] Patterson, E.A., Brail, P. and Taroni, M. High Frequency Quantitative Photoelasticity Applied to Jet Engine Components, *Experimental Mechanics*, 46, pp. 661-668, 2006.
- [32] Sanford, R.J. and Dally, J.W. A general method for determining the mixed-mode stress intensity factors from isochromatic fringe patterns, *Engineering Fracture Mechanics*, 11, pp. 621-633, 1979.
- [33] James, M.N., Pacey, M.N., Wei, L.W. and Patterson, E.A. Characterisation of plasticity-induced closure – crack flank contact force versus plastic enclave”. *Engineering Fracture Mechanics*, 70, pp 2473-2487, 2003.
- [34] Colombo, C., D.U, Y., James, M.N. and Paterson, E.A., On crack tip shielding due to plasticity-induced closure during an overload, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 33, pp. 766-777, 2010.
- [35] Lesniak, J., Zhang, S.J. and Patterson, E.A. Design and Evaluation of the Poleidoscope: A Novel Digital Polariscope, *Society for Experimental Mechanics*, 44 (2), pp. 128-135, 2004.
- [36] Tomlinson, R.A., Conway, A.R. and Calvert, G.C., A photoelastic investigation into spontaneous glass fracture, *Society for Experimental Mechanics*, 11th International Congress and Exhibition on Experimental and Applied Mechanics, 4, pp. 1829-1836, 2008.