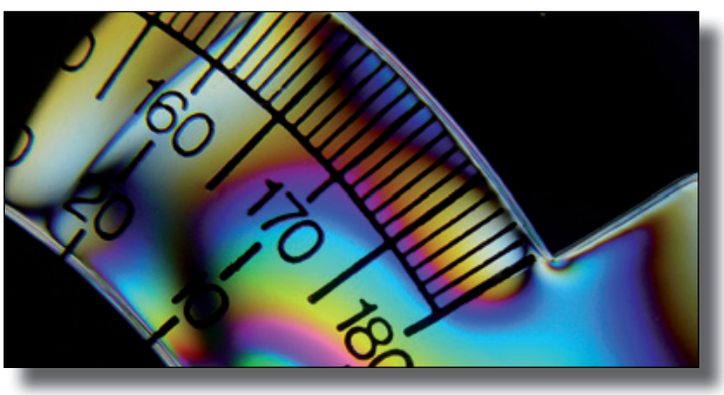
Fotoelasticimetría:
Modernizando una vieja técnica



Manuel Solaguren-Beascoa Fernández Doctor Ingeniero Industrial

Universidad de Burgos. Escuela Politécnica Superior. Avda. de Cantabria, s/n - 09006 Burgos. Tfno: +34 947 258920. msolaguren@ubu.es

Recibido: 28/10/2010 • Aceptado: 21/03/2011

Photoelasticimetry: Upgrading an old technique

ABSTRACT

• Among the various strain measurement techniques, photoelasticity is one of the oldest and, in turn, more versatile and powerful. In recent years, important contributions are being carried out, which are transforming this technique in a modern measurement tool: software is being developed to implement it easily and without a highly skilled operator, and standards have been developed for the calibration of equipments, which will allow express measurements with their corresponding uncertainties, making them valid, comparable and reproducible. Moreover, significant progresses are being made in the use of stereolithography for the manufacture of photoelastic models, as well as their use for three-dimensional analysis by tomographic photoelasticity. This article describes all these contributions in order to provide potential users the understanding of the different photoelastic techniques, the extent to which these are developed and commercially available and their application possibilities.

• Keywords: experimental techniques, photoelasticity, stress, strain, metrology, uncertainty.

RESUMEN

Dentro de las diferentes técnicas experimentales de medida de deformaciones, la fotoelasticimetría es una de las más antiguas y, a la vez, más versátiles y potentes. En los últimos años se están produciendo importantes aportaciones que están haciendo de esta técnica una moderna herramienta de medida: se están desarrollando programas informáticos para aplicarla de forma sencilla y sin necesidad de un operador altamente cualificado, y se han elaborado normativas para la calibración de los equipos, lo cual permitirá expresar las medidas con sus correspondientes incertidumbres, haciéndolas válidas, comparables y reproducibles. Por otra parte, se están realizando avances relevantes en el empleo de la estereolitografía para la fabricación de modelos, así como en el uso de éstos para su análisis tridimensional mediante fotoelasticimetría tomográfica. Este artículo describe todas estas contribuciones con el propósito de facilitar a los potenciales usuarios la comprensión de las diferentes técnicas fotoelasticimétricas, el grado en que éstas se encuentran desarrolladas y disponibles comercialmente, así como sus posibilidades de aplicación.

Palabras clave: técnicas experimentales, fotoelasticidad, tensión, deformación, metrología, incertidumbre.

1. INTRODUCCIÓN

Las técnicas experimentales de medida de deformaciones tienen numerosas aplicaciones industriales (Figura 1), que van desde la caracterización de materiales o la validación de cálculos sobre prototipos, hasta la monitorización del comportamiento de grandes estructuras a lo largo de su vida útil.

Numerosas empresas ofrecen actualmente equipos de medida de deformaciones basados en dispares tecnologías, promocionándose como rápidos, precisos o de fácil manejo. La técnica más utilizada (Figura 2) - por ser sencilla, barata y suficientemente precisa - es la extensometría eléctrica, pero presenta el inconveniente de proporcionar una información puntual, de modo que

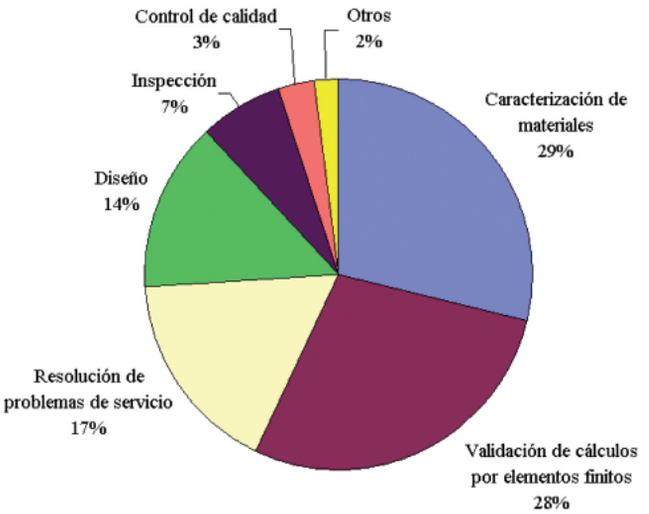


Fig. 1: Áreas de aplicación industriales de las diferentes técnicas experimentales de medida de tensiones/deformaciones (datos del año 2006 procedentes del JSEM, Japan Society for Experimental Mechanics, www.jsem.jp).

para obtener una imagen completa del comportamiento mecánico de un elemento estructural es necesaria una instrumentación con gran número de galgas. Del resto de técnicas tienen especial interés las de campo completo, es decir, aquéllas que permiten obtener una visión general del estado de deformación sobre la superficie de la pieza objeto de análisis. Entre ellas, la fotoelasticimetría fue una de las primeras técnicas en surgir, allá por la década de 1930, y desde entonces se ha empleado con éxito en prácticamente todos los campos de la ingeniería. Aunque posteriormente surgieron otras técnicas ópticas de campo completo menos intrusivas, basadas en la interferometría y en el láser, la fotoelasticimetría mantiene la particularidad de ser la única técnica que permite medir el estado de deformaciones en todo el volumen tridimensional de un componente. Si bien de

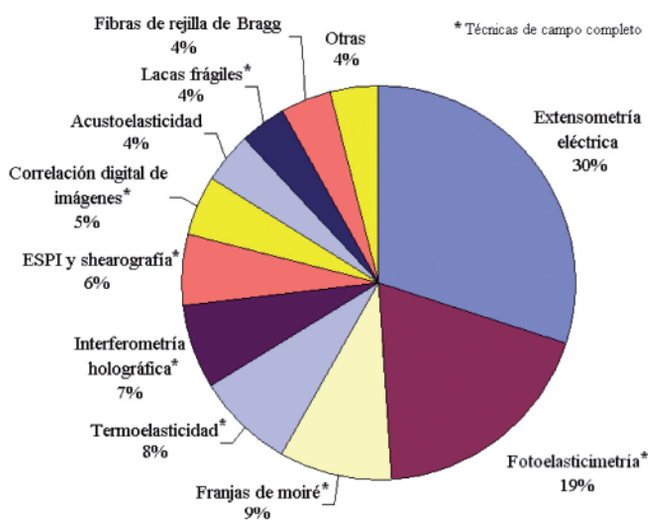


Fig. 2: Grado de utilización en la industria de las diferentes técnicas de medida de tensiones y deformaciones (datos procedentes del JSEM, 2006).

momento su aplicación tridimensional es lenta y laboriosa, su aplicabilidad está mejorando gracias a los avances que se están produciendo actualmente.

Un aspecto común a todas las técnicas experimentales de medida de deformaciones, que hasta el momento ha permanecido en el olvido, es el metrológico. No existen normas estandarizadas para la calibración de los equipos, lo cual supone un importante obstáculo al uso con validez y calidad de las medidas realizadas con dichas técnicas. También se están produciendo avances en este sentido.

En este artículo se revisa la evolución de la fotoelasticimetría y las recientes aportaciones (tanto técnicas como de normativa) que están transformándola en una técnica moderna y con posibilidades de aplicación excepcionales.

2. LAS TÉCNICAS FOTOELASTICIMÉTRICAS Y SU EVOLUCIÓN

La fotoelasticimetría es una técnica basada en la utilización de materiales fotoelásticos. Estos materiales transparentes se caracterizan por ser ópticamente isótropos cuando no están sometidos a deformación; sin embargo, al deformarlos se comportan como birrefringentes, es decir, producen doble refracción de la luz. El resultado de la visualización de estos materiales cuando están deformados a través de un polariscopio es la aparición de unos patrones de franjas, conocidas como isoclinas e isocromas. Dichas franjas suelen ser fotografiadas o grabadas en vídeo para su posterior análisis.

Como ya hemos adelantado, esta técnica permite una serie de posibilidades que no son posibles con otras: permite el análisis del interior de las piezas, no sólo de su superficie. Esto se consigue fabricando con material fotoelástico un modelo tridimensional a escala del elemento a analizar y sometiéndolo simultáneamente a carga y a un tratamiento térmico de horneado que lo endurece. Este tratamiento, conocido como de "congelación de tensiones", deja así permanentemente la huella de deformaciones de la solicitación. Mediante su posterior corte en rebanadas es posible analizar el estado interior de deformaciones en el modelo.

En general, hay dos tipos de técnicas que hay que aplicar a la hora de realizar medidas mediante fotoelasticimetría:

- Las "técnicas de adquisición de datos" analizan las imágenes del polariscopio para obtener, en cada punto de la pieza, dos parámetros: a partir de las franjas isoclinas se determina el ángulo α de orientación de las direcciones principales del estado de deformaciones; y mediante las franjas isocromas, el orden de franja N, proporcional a la diferencia de deformaciones principales.
- Las "técnicas de separación de tensiones" utilizan los datos obtenidos mediante las técnicas anteriores para determinar los valores de las tensiones/deformaciones principales por separado.

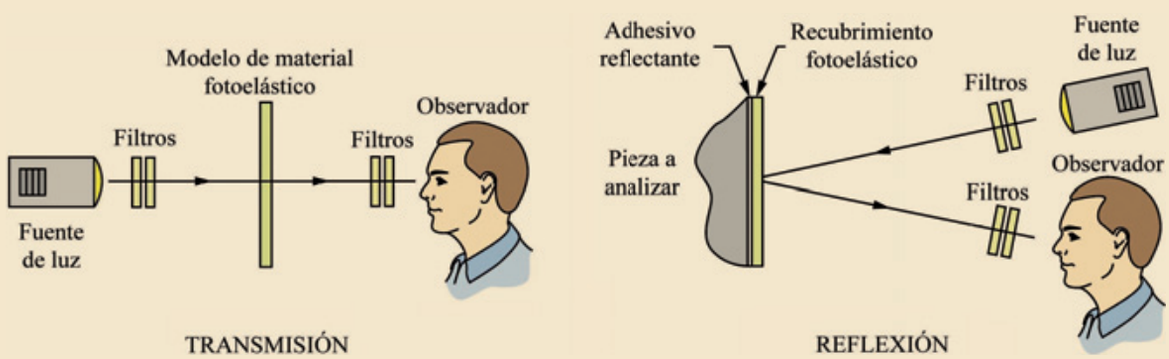
EQUIPOS Y TIPOS DE ANÁLISIS EN FOTOELASTICIMETRÍA

Un polariscopio es un instrumento que permite observar y medir el estado de polarización de objetos transparentes. Existen distintas disposiciones de filtros que constituyen un polariscopio:

- El polariscopio más simple, llamado lineal o plano, consta de dos filtros polarizadores entre los cuales se coloca el material fotoelástico a analizar. Con él se observan las franjas isoclinas e isocromas superpuestas.
- Intercalando dos filtros de cuarto de onda en la disposición del polariscopio plano se obtiene el denominado polariscopio circular, el cual permite ver únicamente las franjas isocromas.

Asimismo, es posible realizar dos tipos distintos de análisis:

- En los análisis de transmisión se fabrica con material fotoelástico un modelo de la pieza a analizar (a tamaño real o a escala), se le somete a carga de la misma forma que la pieza original, se ilumina por un lado con luz polarizada y se observa por el otro a través de un polariscopio.
- En los análisis de reflexión, con un adhesivo reflectante se pega sobre la pieza a analizar un recubrimiento de material fotoelástico. Una vez que la pieza se encuentra bajo carga, dicho recubrimiento es iluminado con luz polarizada y observado a través de un polariscopio.



2.1. TÉCNICAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Desde las primeras aplicaciones prácticas de la fotoelasticimetría, allá en la década de 1930, han surgido una gran cantidad de técnicas de adquisición de datos [1] con el propósito de proporcionar un rápido y preciso análisis de las franjas isoclinas e isocromas (Tabla 1). Algunas de las

	Técnica	Año	Difusión
Manuales	Aparatos compensadores	1930s	Comercializada
	Compensación goniométrica	1930s	Comercializada
	Fringe Skeletonization	1950	Obsoleta
	Fringe Sharpening	1955	Obsoleta
	Polariscopios automatizados	1959	Obsoleta
Automatizadas de primera generación	Fringe Multiplication	1970	Obsoleta
	Fringe Thinning	1979	Obsoleta
	Half Fringe Photoelasticity	1983	Obsoleta
	Spectral Content Analysis	1985	Obsoleta
	Digital Fringe Multiplication	1990	Obsoleta
Automatizadas de segunda generación	Phase Shifting o Phase Stepping	1986	Comercializada
	Fourier Transform	1993	No comercial
	Digital Spectral Content Analysis	1995	No comercial
	RGB Photoelasticity	1995	No comercial
	Tricolor Photoelasticity	1998	No comercial

Tabla 1: Principales técnicas de adquisición de datos

más antiguas han quedado obsoletas por la aparición de otras mejores; sin embargo otras han mantenido su aplicabilidad debido fundamentalmente a su simplicidad y bajo coste. Así, por ejemplo, el compensador de **Babinet-Soleil** es todavía comercializado por la marca *Vishay* para la medida puntual del orden de franja, mientras que todas las técnicas que denominamos "automatizadas de primera generación" sólo tienen interés histórico por ser la base de las actuales técnicas digitales.

La última meta perseguida por los investigadores ha sido la adquisición de datos automatizada de campo completo. Las técnicas *"Phase Shifting"* [2], *"Fourier Transform"* [3], *"Digital Spectral Content Analysis"* [4], *"RGB"* [5] y "*Tricolor*" [6] han alcanzado esta meta. Algunas dieron lugar a prototipos que incluso han alcanzado difusión comercial [7-9].

Sin embargo, cada método posee sus propias ventajas y limitaciones, no existiendo una única técnica óptima para todas las situaciones. La técnica *"Phase Shifting"* combinada con otras basadas en el uso del color, como "RGB" o "Tricolor" [10-12] son las que parecen tener mayores posibilidades. Éstas técnicas mixtas son relativamente sencillas y evitan ciertos errores inherentes a cada una de ellas por separado. No obstante, su salto de la investigación a la industria requiere algo más. Los fabricantes de equipos comerciales demandan técnicas simples, en las que la intervención de un experto operador sea mínima, y esto es lo que frena de momento su difusión comercial. Aún requieren procesos de ajuste, calibración o resolución de ambigüedades que no pueden ser llevados a cabo por cualquier usuario.

Técnica	Año	Difusión
Integración de las ecuaciones de equilibrio	1931	No comercial
Integración de las ecuaciones de Lamé-Maxwell	1931	No comercial
Método del agujero	1932	No comercial
Separación por incidencia oblicua	1943	Comercializada
Separación mediante las franjas isopacas	1955	No comercial
Utilización de un recubrimiento en tiras	1965	No comercial
Solución de la ecuación de compatibilidad	1966	Limitada
Utilización de una galga extensométrica	1986	Comercializada
Corte del recubrimiento fotoelástico	1987	Comercializada
Combinación con termoelasticidad	1996	Limitada

Tabla 2: Principales técnicas de separación de tensiones

2.2. TÉCNICAS DE SEPARACIÓN DE TENSIONES

El orden de franja N es proporcional a la diferencia de tensiones/deformaciones principales en cada punto. Aunque esta información puede ser suficiente en algunas disciplinas, como la mecánica de fractura, para muchas aplicaciones prácticas es necesario conocer los valores de las tensiones/deformaciones principales por separado. Para ello se necesita una ecuación más, aparte de su diferencia. Esto es lo que buscan las denominadas técnicas de separación de tensiones [13].

Para hallar los valores de las tensiones principales por separado surgieron diversas técnicas de separación, (Tabla 2). Todas ellas presentan características que las hacen no viables bajo determinadas circunstancias: no todas pueden ser aplicadas en análisis de transmisión y reflexión, ni sobre el campo completo de tensiones/deformaciones; algunas de ellas deterioran el material fotoelástico; otras técnicas son complejas por requerir la aplicación de tecnologías basadas en otros fenómenos físicos; y sólo unas pocas, las más sencillas, han alcanzado desarrollo comercial.

El método del agujero, la separación por incidencia oblicua, por galga extensométrica y por corte del recubrimiento son técnicas puntuales, mientras que el resto pueden ser aplicables en el campo completo, lo cual es una importante y deseable característica. Entre éstas últimas, la técnica de integración de las ecuaciones de equilibrio es la que en la actualidad presenta un mayor potencial para su desarrollo comercial. Es barata porque no se necesita equipamiento especial para su uso, y su aplicación en el campo completo está únicamente limitada por el requerimiento de un punto en un borde libre o, en su ausencia, un punto del que se conozca su estado tensional (lo cual puede conseguirse mediante una galga extensométrica). En busca de una herramienta más potente y versátil que las actualmente comercializadas, los esfuerzos de los investigadores se centran en el desarrollo de un software que integre la adquisición de datos y la separación de tensiones en el campo completo [14-16].

3. RECIENTES APORTACIONES

La fotoelasticimetría se ha empleado con éxito en numerosas aplicaciones, prácticamente en todos los campos de la ingeniería, desde edificios, puentes o aviones hasta motores y válvulas. A pesar de que su historia se remonta 150 años, a las observaciones de Brewster, en todo este tiempo ha habido largos períodos de relativa quiescencia. El primero abarcó desde el descubrimiento inicial de fenómeno fotoelástico hasta que fue posible disponer de los polímeros necesarios para su aplicación práctica, en la década de 1930. El desarrollo del policarbonato y de las resinas epoxi en la década de 1960 como materiales para recubrimientos fotoelásticos supuso un fuerte impulso que revolucionó sus aplicaciones prácticas. Su versatilidad permitía repetir o modificar las condiciones de carga así como realizar

FRANJAS ISOCLINAS E ISOCROMAS

Dos son los tipos de franjas que proporcionan información sobre el estado de deformación en un punto:

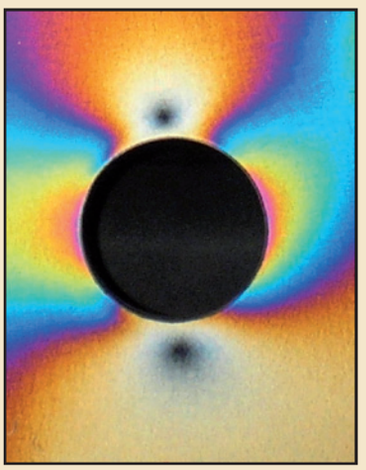
- Las isoclinas son una serie de franjas negras que aparecen sobre el material fotoelástico al ser observado a través de un polariscopio plano. Pueden definirse como el lugar geométrico de los puntos que tienen una misma orientación α de sus direcciones principales.

- Las franjas isocromas son una serie de franjas coloreadas (si se ilumina con luz blanca) que aparecen sobre el material fotoelástico al ser observado, bien a través de un polariscopio plano, o bien a través de un polariscopio circular. En el primer caso, aparecen en combinación con las isoclinas. Su color corresponde con un determinado orden de franja N, relacionado con la diferencia de deformaciones principales mediante la ley de Brewster:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \frac{N\lambda}{hK}$$

Siendo λ la longitud de onda media de la luz empleada, h el espesor de material fotoelástico atravesado por ésta y K el coeficiente óptico de deformaciones del material.

a) Polariscopio plano



b) Polariscopio circular

medidas tanto en laboratorio como en campo. Un segundo periodo de quiescencia comenzó con la aparición del método de los elementos finitos (MEF). Su profusa utilización con los avances de la informática a partir de la década de 1980 redujeron el uso y desarrollo de técnicas experimentales como la fotoelasticimetría. Actualmente, los recientes avances, como el uso de diodos láser y LED como fuentes de luz o el desarrollo de las técnicas de procesamiento de imágenes, han ampliado sus posibilidades de aplicación y hacen que esté ganando de nuevo popularidad (monitoreo on-line de estructuras, análisis de tensiones residuales en vidrio, plásticos o componentes microelectrónicos, o visualización dinámica de las ondas de tensiones). El futuro de esta técnica se presenta prometedor, y dos son los aspectos responsables de ello: el perfeccionamiento de la estereolitografía para la fabricación de modelos de resina epoxi y el desarrollo de software para la automatización del análisis de los datos. Ninguna de estas dos tecnologías están aún lo suficientemente maduras como para ser utilizadas por cualquier laboratorio o empresa, sin embargo ambas ofrecen un gran potencial en la medida tridimensional de deformaciones.

La estereolitografía permite fabricar modelos tridimensionales en resina epoxi directamente a partir de sus diseños por ordenador, sin el empleo de las herramientas y técnicas tradicionales de moldeo [17]. Para ello se emplea un depósito lleno de resina líquida fotopolimerizante dentro del cual puede moverse verticalmente un plato metálico (Figura 3). Un láser montado encima del depósito va polimerizando capa a capa la resina hasta conseguir el modelo. Las resinas epoxi empleadas son fotoelásticas, de modo que la estereolitografía posibilita fabricar modelos fotoelásticos de componentes complejos con una rapidez similar a la de los modelos numéricos que utiliza el MEF. Sin embargo, actualmente los modelos así obtenidos a menudo contienen elevados e inaceptables niveles de birrefringencia residual que no puede eliminarse completamente mediante un tratamiento posterior de recocido. Diversas investigaciones [18, 19] tratan de superar este inconveniente mediante el

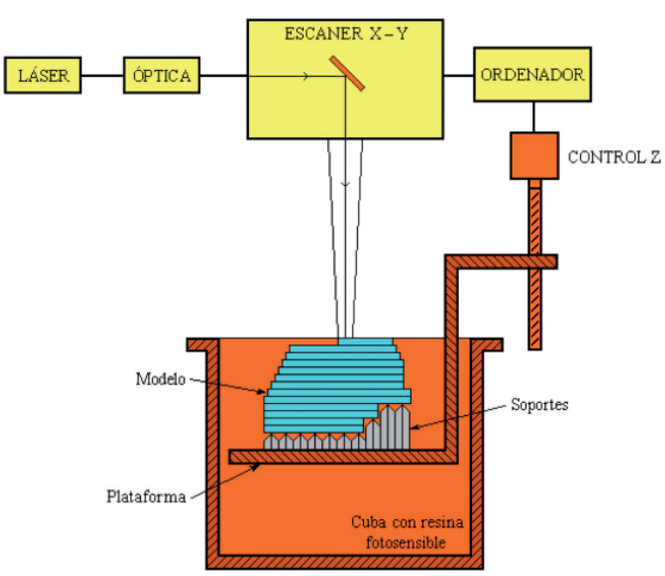


Fig. 3: Esquema del proceso de modelado por estereolitografía

empleo de nuevas generaciones de resinas. De momento, los modelos generados mediante estereolitografía pueden ser usados como modelos maestros para la fabricación rápida de moldes de silicona y, a partir de ellos, obtener modelos fotoelásticos con el tradicional y más lento método de moldeo.

El modelado rápido debe ser complementado con un rápido análisis de los datos para que la fotoelasticimetría tridimensional pueda llegar a ser una técnica económicamente viable. Como se ha comentado en el apartado anterior, numerosas investigaciones actuales centran sus esfuerzos en el desarrollo de un software que implemente conjuntamente una técnica de adquisición de datos y una de separación de tensiones [20]. El objetivo: la comercialización de equipos fácilmente operables que obtengan medidas de deformaciones directamente a partir de las imágenes captadas por el polariscopio.

Todos estos avances aún dejan de lado un mayor inconveniente que presenta la fotoelasticimetría tridimensional: la necesidad de "congelar las tensiones" y seccionar el modelo en rodajas para su análisis. Aparte del trabajo que ello conlleva, traducido en tiempo y costes, implica que sólo puede analizarse un estado de carga con cada modelo. Para evitar estos inconvenientes, se ha investigado desde hace tiempo en fotoelasticimetría tomográfica (obtención de las tensiones internas en modelos tridimensionales mediante la captura y combinación de imágenes fotoelasticimétricas desde distintos puntos de vista), pero la técnica fue considerada como demasiado compleja para su uso generalizado [21]. Los nuevos avances en tomografía tensorial van salvando las dificultades [22-26]; no obstante, la fotoelasticimetría tomográfica no es todavía viable técnicamente.

4. UN ASPECTO PENDIENTE: EL METROLÓGICO

Las actividades metrológicas son fundamentales para garantizar la calidad de las actividades científicas e industriales. La norma ISO/IEC 17025:2005 [27] exige que toda medida vaya acompañada por su incertidumbre de medida. Sin embargo, el cálculo de la incertidumbre de medida es inútil si ésta carece de trazabilidad, y esto es lo que ha sucedido durante décadas con las técnicas ópticas de medida de deformaciones. La trazabilidad es una propiedad del resultado de una medición por la que ésta puede relacionarse con un patrón de referencia nacional o internacional a través de una cadena ininterrumpida de comparaciones, todas con sus correspondientes incertidumbres (Figura 4). Así, si en una empresa se utiliza un pie de rey, la incertidumbre de las medidas con él realizadas es evaluable a partir de su certificado de calibración y, por ejemplo, puede afirmarse que la longitud de una determinada pieza es de 2,34 ± 0,01mm con un 95% de probabilidad. La calibración del aparato de medida se realiza por un laboratorio acreditado mediante un juego de bloques patrón, y el laboratorio, a su vez, habrá calibrado éstos mediante interferometría a partir de la definición internacional de la unidad de medida, el metro en este caso. De este modo, la cadena de trazabilidad asegura que las incertidumbres de las medidas realizadas con el pie de rey se refieran a la unidad de medida aceptada internacionalmente y sean, por tanto, válidas, comparables y reproducibles.

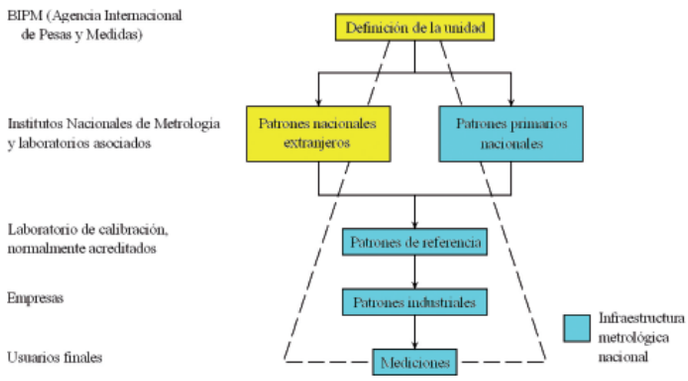


Fig. 4: Cadena de trazabilidad

Hasta ahora no se habían definido unas normas que estableciesen los materiales de referencia para la calibración de los sistemas ópticos de medida de deformaciones y las rutas de trazabilidad hacia un patrón primario. Para cubrir esta carencia, en 2007, elaborado por el consorcio europeo SPOTS (Standardization Project for Optical Techniques of Strain Measurement) en el marco del proyecto VAMAS (Versalles Agreement on Materials and Standards), concluyó el desarrollo de un borrador de normativa que asegurará la trazabilidad de las medidas realizadas con éstas técnicas. Tras la aprobación por parte del comité ejecutivo del VAMAS, el borrador está siendo considerado por ISO (*International Organization for Standardization*) para su posible publicación como norma internacional.

El documento elaborado por SPOTS tiene por título "Calibración y evaluación de las técnicas ópticas de medidas de deformaciones" y se divide en tres partes:

- La primera parte [28] describe los materiales y procedimientos a utilizar para la calibración de los instrumentos ópticos utilizados para medir deformaciones. La calibración implica la comparación de las medidas realizadas con los instrumentos con respecto a un patrón local, lo que constituye el primer eslabón de la cadena de trazabilidad hacia un patrón primario.
- La segunda parte [29] describe los materiales y procedimientos a utilizar para evaluar y comparar la aptitud de cada una de las diferentes técnicas; lo cual es de importancia para los diseñadores de los sistemas y sus algoritmos, para los fabricantes respecto a su calidad, para los compradores a la hora de comparar las posibilidades de cada técnica y para los usuarios finales en la puesta a punto y mantenimiento de la instrumentación.

EVALUACIÓN DE INCERTIDUMBRES DE MEDIDA

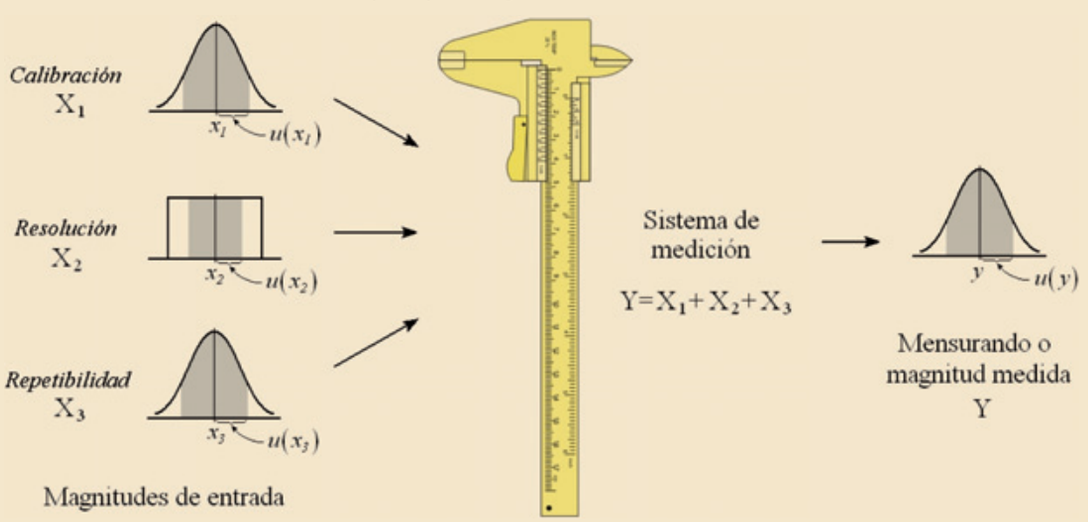
La incertidumbre de medida es un parámetro que permite estimar el intervalo de valores dentro del cual es de esperar que se encuentre, con una determinada probabilidad, el resultado de la medición. Evaluada su incertidumbre, una medida se expresa como:

$$Y = y \pm U(y)$$

En donde "Y" es la magnitud medida o mensurando, "y" la estimación o resultado de la medición y "U(y)" la llamada incertidumbre expandida de medida.

Los métodos para la evaluación de incertidumbres de medida parten de la idea de que la medición es un proceso en el que a partir de unas magnitudes X_i (aquellas que influyen en el resultado de la medición [31, 32], denominadas de entrada) se determina el valor del mensurando Y (denominada magnitud de salida). Todas se consideran variables aleatorias. Dos son los métodos de evaluación de incertidumbres aceptados internacionalmente: GUF *(Guide to the expression of Uncertainty in measurement Framework)* [33] y MCM *(Monte Carlo Method)* [34].

- El GUF es un método determinista basado en la combinación matemática de distribuciones de probabilidad, a través de la ley de propagación de incertidumbres y del teorema central del límite.
- El MCM es un método probabilístico que realiza la combinación de distribuciones de probabilidad por simulación numérica, mediante sistemas de cómputo para la generación de números aleatorios.



- La tercera parte [30] constituye una serie de guías de buenas prácticas de uso de cada una de las técnicas. Estas guías recopilan información procedente sobre todo de los fabricantes de equipos y describen las técnicas con el suficiente detalle para permitir planificar y ejecutar medidas así como interpretar los resultados.

Una vez que esta normativa entre en vigor y los laboratorios de calibración estén en condiciones de aplicarla, la trazabilidad de las medidas quedará asegurada a través de sus dos pilares básicos: el reconocimiento de la competencia metrológica en cada nivel de la cadena de trazabilidad y la calibración de los instrumentos de medida. Con ello será posible evaluar la incertidumbre de las medidas realizadas, lo que supondrá un importante estímulo para la difusión de estas técnicas en la industria.

5. CONCLUSIONES

Aunque la fotoelasticimetría es una técnica antigua para la medida de tensiones y deformaciones, está alcanzando su madurez en los últimos años gracias a los avances recientes en diversos campos: por un lado, el perfeccionamiento de las técnicas computerizadas de procesamiento de imágenes en busca de programas informáticos que hagan posible medir de forma simple, integrando tanto la adquisición de datos como la separación de tensiones, por otro, la redacción de normativa para asegurar la trazabilidad de las medidas y la expresión de éstas con su correspondiente incertidumbre; y con vistas a un futuro no muy lejano, el uso de la estereolitografía para la fabricación de modelos y el desarrollo de la fotoelasticimetría tomográfica, que permitirá analizar piezas en todo su volumen sin necesidad de seccionarlas.

Todos estos avances están transformando a la fotoelasticimetría en una técnica moderna cuyas posibilidades de aplicación están creciendo: ensayos estáticos, dinámicos, análisis de fatiga o test de impacto, tanto en geometrías y estados de carga complejos como en materiales homogéneos, heterogéneos o compuestos. Además, la sencillez de los equipos la hacen ventajosa económicamente frente a otras técnicas experimentales.

El propósito de este artículo ha sido el de presentar las diferentes técnicas, tanto de adquisición de datos como de separación de tensiones, las recientes aportaciones que se están produciendo en la actualidad y las líneas de investigación que se encuentran abiertas. Se ha pretendido así facilitar a los potenciales usuarios la comprensión de las diferentes técnicas fotoelasticimétricas, el grado en que éstas se encuentran desarrolladas y disponibles comercialmente, así como sus posibilidades de aplicación.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Solaguren-Beascoa Fernández M. "Data acquisition techniques in photoelasticity". *Experimental Techniques*. 2010. (aceptado para su publicación, doi: 10.1111/j.1747-1567.2010.00669.x).
- Hecker F W y Morche B. "Computer-aided measurement of relative retardations in plane photoelasticity". En: *Experimental Stress Analysis*. Dordrecht (Holanda): Wieringa ed. 1986. p. 535-542.
- Quan C, Bryanston-Cross P J y Judge T R. "Photoelasticity stress analysis using carrier fringe and FFT techniques". *Optics and Lasers in Engineering*. 1993. Vol.18 p. 79-108.
- Haake S J y Patterson E A. "Photoelastic analysis using automated polariscopes". En: *Proceeding of the International Conference on Mechanics of Solids and Materials Engineering* (Singapore, 5-7 de Junio de 1995). 1995. p. 884-888.
- Ajovalasit A, Barone S y Petrucci G. "Towards RGB photoelasticity: full-field automated photoelasticity in white light". Experimental Mechanics. 1995. Vol.35-3 p.193-200.
- Yoneyama S, Shimizu M, Gotoh J y Takashi M. "Photoelastic analysis with a single tricolour image". Optics and Lasers in Engineering. 1998. Vol.29 p.423-435.
- Yoneyama S, Morimoto Y, Nomura T, Fujigaki M y Matsui R. "Real-time analysis of isochromatics and isoclinics using the phase shifting method". *Experimental Mechanics*. 2003. Vol.43-1 p.83-89.
- Hobbs J W, Greene R J y Patterson E A. "A novel instrument for transient photoelasticity". *Experimental Mechanics*. 2003. Vol.43-4 p.403-409.
- Lesniak J R, Zhang S J y Patterson E A. "Design and evaluation of the poleidoscope: A novel digital polariscope". *Experimental Mechanics*. 2004. Vol.44-2 p.128-135.
- Jones I A y Wang P, "Complete fringe order determination in digital photoelasticity using fringe combination matching". *Strain*. 2003. Vol. 39-3 p.121-130.
- Ajovalasit A, Petrucci G y Scafidi M. "Phase shifting photoelasticity in white light". *Optics and Lasers in Engineering*. 2007. Vol.45-5 p. 596-611.
- Pinit P y Umezaki E. "Digitally whole-field analysis of isoclinic parameter in photoelasticity by four step colour phase-shifting technique". *Optics and Lasers in Engineering*. 2007. Vol.45-7 p. 795-807.
- Solaguren-Beascoa Fernández M, Alegre Calderón J M, Bravo Díez P M y Cuesta Segura I I. "Stress-separation techniques in photoelasticity: a review". *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2010. Vol.45-1 p.1-17.
- Ramji M y Ramesh K. "Stress separation in digital photoelasticity, Part A – photoelastic data unwrapping and smoothing". *Journal of Aerospace Science and Technology*. 2008. Vol.60-1 p.5-15.
- Ramji M y Ramesh K. "Stress separation in digital photoelasticity, Part B – whole field evaluation of stress components". *Journal of Aerospace Science and Technology*. 2008. Vol.60-1 p.16-25.
- Ashokan K y Ramesh K. "An adaptive scanning scheme for effective whole field stress separation in digital photoelasticity. *Optics and Laser Technology*. 2009. Vol.41-1 p.25-31.
- Curtis J, O´Brien E W y Patterson E A. "Stereolithography for photoelastic analysis". *Proceedings of the SEM Spring Conference on Experimental and Applied Mechanics. (Houston, Texas, 1-3 de Junio de 1998)*. 1998. p.252-253.
- Curtis J D, Hanna S D, Patterson E A y Taroni M. "On the use of stereolithography for the manufacture of photoelastic models". *Experimental Mechanics*. 2003. Vol.43-2 p.148-162.
- Karalekas D E y Agelopoulos A. "On the use of stereolithography built photoelastic models for stress analysis investigations". *Materials & Design*. 2006. Vol.27-2 p.100-106.
- Ramji M y Ramesh K. "Whole field evaluation of stress components in digital photoelasticity – issues, implementation and application". *Optics and Lasers in Engineering*. 2008. Vol.46-3 p.257-271.
- Aben H. *Integrated photoelasticity*. London: Mc Graw-Hill, 1979. p. ISBN: 0-07-000043-3.
- Ainola L y Aben H. "Principal formulas of integrated photoelasticity in terms of characteristic parameters". *Journal of the Optical Society of America A*. 2005. Vol.22 p.1181-1186.
- Ainola L y Aben H. "Transformation equation in three-dimensional photoelasticity". *Journal of the Optical Society of America A*. 2006. Vol.23 p.741-746.
- Ainola L y Aben H. "Factorization of the polarization transformation matrix in integrated photoelasticity". *Journal of the Optical Society of America A*. 2007. Vol.24 p.3397-3402.
- Ainola L y Aben H. "On the generalized Wertheim law in integrated photoelasticity". *Journal of the Optical Society of America A*. 2008. Vol.25 p.1843-1849.
- Ainola L y Aben H. "Fringe patterns in integrated photoelasticity". *Journal of the Optical Society of America A*. 2009. Vol.26 p.1714-1720.
- International Organization for Standardization. *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*. ISO/IEC 17025:2005. Ginebra: ISO, 2005.
- VAMAS TWA26. *Draft VAMAS TWA26 pre-standard: Calibration and assessment of optical strain measurements systems – Part I: Reference material for optical methods of strain measurement*. Sheffield: University of Sheffield, 2007.
- VAMAS TWA26. *Draft VAMAS TWA26 pre-standard Calibration and assessment of optical strain measurements systems – Part II: Standardised test materials for optical methods of strain measurement systems*. Sheffield: University of Sheffield, 2007.
- VAMAS TWA26. *Draft VAMAS TWA26 pre-standard Calibration and assessment of optical strain measurements systems – Part III: Good Practice Guide to (1) Geometric Moiré for in-plane displacement/strain analysis, (2) Grating (moiré) interferometry for in-plane displacement/strain analysis, (3) Image correlation for in-plane displacement/strain analysis, (4) Thermoelastic stress analysis, (5) Reflection photoelasticity, (6) Transmission photoelasticity, (7) Electronic Speckle pattern interferometry for displacement/strain analysis*. Sheffield: University of Sheffield, 2007.
- Vishay Measurements. *Tech Note 701-1: Calibration of photostress coatings*. Vishay Measurements Group Inc.: Raleigh, North Carolina, USA, 2003.
- Vishay Measurements. *Tech Note 706: Corrections to photoelastic coating fringe-order measurements*. Vishay Measurements Group Inc.: Raleigh, North Carolina, USA, 2005.
- International Organization for Standardization. *Guide to the expression of Uncertainty in Measurement*. ISO Guide 98-3:2008. Ginebra: ISO, 2008.
- International Organization for Standardization. *Propagation of distributions using a Monte Carlo method*. ISO Guide 98-3 / Supplement 1:2008. Ginebra: ISO, 2008.