



Visión Electrónica

Más que un estado sólido

<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/visele>



VISIÓN INVESTIGADORA

Análisis de resolución en imágenes de fotoelasticidad: caso carga dinámica

Analysis of resolution on photoelasticity images: dynamic load case

Juan C. Briñez de León.¹, Hermes A. Fandiño Toro.², Alejandro Restrepo Martínez.³, John W. Branch Bedoya.⁴

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Enviado: 25/01/2017

Recibido: 26/01/2017

Aceptado: 05/02/2017

Palabras clave:

Campos de esfuerzos

Concentración de esfuerzos

Densidad de franjas

Fotoelasticidad digital

Imágenes sintéticas

Open access



Keywords:

Stress field

Stress concentration

Fringe density

Digital photoelasticity

Synthetic images

RESUMEN

En imágenes de fotoelasticidad, los patrones de franjas envuelven el campo de esfuerzos de un cuerpo birrefringente bajo cargas mecánicas; en estos casos, zonas con concentraciones de esfuerzos producen altas densidades de franjas dificultando la recuperación, en ocasiones hasta la pérdida de la información envuelta en la imagen. Este artículo evalúa el crecimiento de tales regiones y su efecto en el campo de esfuerzos para un caso donde el cuerpo es sometido a cargas dinámicas. Aquí, una secuencia sintética de imágenes de fotoelasticidad es generada partiendo del modelo analítico de la distribución de esfuerzos en un disco bajo compresión diametral; el tamaño de las regiones con pérdida de información es estimado mediante la implementación de transformadas de Fourier y filtros paso alto. Los resultados muestran que el incremento de la carga introduce aumentos en las regiones con pérdida de información; en estos casos, los esfuerzos máximos recuperados a partir de las imágenes se alejan de los valores en el modelo analítico, esto permite identificar regiones en las imágenes de fotoelasticidad donde el campo de esfuerzos debe ser corregido.

ABSTRACT

In photoelasticity images, fringe patterns wrap the stress field in birefringent bodies under mechanical loads. In these cases, high stress concentrations produce zones with high fringe densities, which makes difficult to recover the information wrapped by the image. This paper evaluates the size of such regions, and their effect into the stress field for a case with dynamic loads. Here, a synthetic sequence of photoelasticity images is generated by modeling the stress distribution on a disc under diametric compression. The size of regions with limitations is estimated by implementing the discrete Fourier transform and high pass filters. Our results show that increasing the load values, the size of the regions gets bigger. In these cases, the maximum stress one can recover does not match with the values in the analytical model. This allow to identify regions in the photoelasticity images, where the stress field must be corrected.

¹Ingeniero electrónico, Universidad de Pamplona; magíster en Automatización y Control Industrial, Instituto Tecnológico Metropolitano. Grupo de Investigación y Desarrollo en Inteligencia Artificial, Universidad Nacional de Colombia. Correo electrónico: jcbriñezl@unal.edu.co

²Ingeniero electrónico, Universidad Nacional de Colombia; magíster en Automatización Industrial, Universidad Nacional de Colombia. Grupo de Automática, Electrónica y Ciencias Computacionales, Instituto Tecnológico Metropolitano. Grupo de Investigación y Desarrollo en Inteligencia Artificial, Universidad Nacional de Colombia. Correo electrónico: hafandinot@unal.edu.co; hermesfandino@itm.edu.co

³Ingeniero mecánico, Universidad Nacional de Colombia; doctor en Ingeniería de Sistemas, Universidad Nacional de Colombia. Grupo de Investigación en Automática y Electrónica, Instituto Tecnológico Metropolitano. Correo electrónico: arestre5@unal.edu.co

⁴Ingeniero de minas y metalurgia, Universidad Nacional de Colombia; magíster en Ingeniería de Sistemas, Universidad Nacional de Colombia; doctor en Ingeniería de Sistemas, Universidad Nacional de Colombia. Grupo de Investigación y Desarrollo en Inteligencia Artificial, Universidad Nacional de Colombia. Correo electrónico: jwbranch@unal.edu.co

1. Introducción

La fotoelasticidad es una técnica experimental para describir la distribución de esfuerzos en materiales birrefringentes bajo cargas mecánicas [1]; este fenómeno se basa en la ley de esfuerzo óptico y se caracteriza por envolver la información de los esfuerzos en patrones de franjas de color [1]. Lo anterior ha hecho que el objetivo de los trabajos en fotoelasticidad se vea centrado en la recuperación de la información de los esfuerzos, a partir del análisis y procesamiento de los patrones de franjas de color [3]; en estos estudios, la información mecánica que se obtiene está asociada a la diferencia de esfuerzos principales (mapa isocromático) y a sus direcciones (mapa isoclínico) [4].

Si bien la literatura reporta múltiples métodos en fotoelasticidad para extraer información de los esfuerzos a partir del procesamiento de los patrones de franjas, tales como corrimiento de fase (phase shifting) [5], demodulación de color (three fringe photoelasticity) [6], técnicas de problema inverso (inverse problem) [7], la relación entre los esfuerzos y sus direcciones forman zonas donde la información recuperada es incorrecta (inconsistencias y ambigüedades), como fue explicado por Ramesh en [2]. Estos problemas suelen ser atendidos con algoritmos de corrección, tales como los presentados en [8], [9], [10].

Adicional a las inconsistencias y ambigüedades, las zonas con concentraciones de esfuerzos representan otra limitación para la fotoelasticidad; allí, la densidad de los patrones de franjas hace que el contraste entre ellas sea bajo (intensidades promediadas), limitando la recuperación de los esfuerzos en esa región específica [11]. Este efecto conlleva a que el campo de esfuerzos recuperado contenga zonas con pérdida de información, lo que en este trabajo es denominado como pérdida de resolución.

En trabajos tradicionales de fotoelasticidad, la pérdida de resolución en el campo de esfuerzos suele ser ignorada descartando las zonas con altas densidades de franjas, y asumiendo por lo general que la pérdida de información no afecta el campo de esfuerzos recuperado [12]; sin embargo, la pérdida de información introduce incertidumbres en el campo de esfuerzos recuperado, la información faltante podría estar asociada a los esfuerzos críticos que hacen que el modelo entre en una condición de falla. En estos casos, investigar sobre el efecto que la región con pérdida de información introduce dentro del campo de esfuerzos recuperados cobra importancia; también gana importancia la evaluación de la diferencia entre los esfuerzos máximos de un modelo analítico y los máximos recuperados a partir de imágenes de

fotoelasticidad. Todo ello considerando diferentes valores de carga.

Como una respuesta a las limitaciones expresadas en los párrafos anteriores, la presente investigación se orienta al análisis de las regiones donde la concentración de esfuerzos afecta a la información envuelta en los patrones de franjas. En este caso, la alternativa propuesta inicialmente evalúa la diferencia entre los esfuerzos analíticos y los recuperados a partir de los patrones de franjas; posteriormente, se cuantifica el tamaño de estas regiones en situaciones dinámicas, resaltando el efecto que la pérdida de información introduce en la precisión de la medida de los esfuerzos.

Como caso de estudio, este trabajo evalúa el campo de esfuerzos de un disco bajo compresión diametral; para ello, una secuencia de imágenes sintéticas de fotoelasticidad fue generada a partir del modelo analítico del disco, considerando la aplicación de una carga dinámica incremental [13]. Para la generación de las imágenes se considera un modelo de polarización circular.

El documento se estructura así: inicialmente, se presentan en los materiales y métodos los mapas con las componentes rectangulares de los esfuerzos y los mapas de esfuerzos principales con su dirección, así como la secuencia de imágenes sintéticas de fotoelasticidad; posteriormente, se presentan las pruebas a través de las que se estima la región con pérdida de resolución; luego se exhiben los resultados y su discusión cuando se incrementa la carga; finalmente, se entregan las conclusiones de la investigación.

2. Materiales y Métodos

2.1. Mapa de esfuerzos en un disco bajo compresión diametral

En estudios de fotoelasticidad digital, el disco bajo compresión diametral es un modelo de referencia para validar la información recuperada de los patrones de franjas. Para este caso específico, las componentes de los esfuerzos (mapas de esfuerzos) son generadas analíticamente mediante (1), (2), y (3), como se describe en [13].

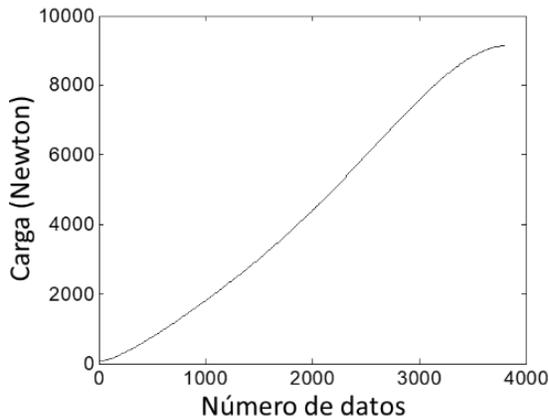
$$\sigma_x = \frac{-2P}{\pi h} \left\{ \frac{x^2(R-y)}{[(R-y)^2 + x^2]^2} + \frac{x^2(R+y)}{[(R+y)^2 + x^2]^2} - \frac{1}{2R} \right\} \quad (1)$$

$$\sigma_y = \frac{-2P}{\pi h} \left\{ \frac{(R-y)^3}{[(R-y)^2 + x^2]^2} + \frac{(R+y)^3}{[(R+y)^2 + x^2]^2} - \frac{1}{2R} \right\} \quad (2)$$

$$\tau_{xy} = \frac{-2P}{\pi h} \left\{ \frac{x(R-y)^3}{[(R-y)^2 + x^2]^2} + \frac{x(R+y)^3}{[(R+y)^2 + x^2]^2} \right\} \quad (3)$$

Donde x e y son las coordenada rectangulares de cada uno de los puntos contenidos en el disco, R corresponde al radio del modelo y P es la carga aplicada. En este caso P no es un valor constante, sino una secuencia de valores dinámicos de carga, como se muestra en la Figura 1, para la compresión de un disco de acrílico. Se consideraron 3800 valores de carga que fueron incrementados desde 0 hasta 9000 N.

Figura 1: Carga dinámica aplicada para la compresión del disco



Fuente: elaboración propia

Una vez generados los mapas con las componentes rectangulares de los esfuerzos, las expresiones (4) y (5) son utilizadas para obtener los mapas de esfuerzos principales y su dirección, respectivamente.

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (4)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (5)$$

2.2. Secuencia de imágenes sintéticas de fotoelasticidad

La fotoelasticidad se basa en que la diferencia de los esfuerzos principales está relacionada con las propiedades ópticas del material mediante la ley de esfuerzo óptico, como se presenta en (6); en esta relación, cuando un rayo de luz de longitud de onda λ , atraviesa un material birrefringente con espesor h y coeficiente óptico C , la diferencia de esfuerzos principales $\sigma_1 - \sigma_2$ genera un mapa de retardos de fase δ que modula la intensidad de la luz emergente del modelo [3]. En estos modelos, la modulación de la luz produce patrones de franjas de color.

$$\delta = \frac{2\pi h C (\sigma_1 - \sigma_2)}{\lambda} \quad (6)$$

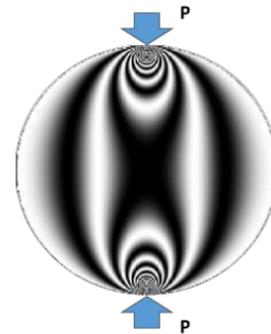
En estudios de fotoelasticidad, la intensidad de luz que emerge del modelo no solo depende del retardo de fase asociado a la diferencia de esfuerzos principales, también varía con el montaje óptico implementado para la observación del fenómeno. En el caso de un polariscopio circular en configuración de fondo claro [2], la luz emergente I puede ser expresada como una función de la fuente de iluminación I_b , la luz de fondo I_a y el retardo de fase, como se presenta en (7).

$$I = I_a + I_b \cos(\delta) \quad (7)$$

Como una primera aproximación, se puede decir que la expresión anterior valida que una imagen de fotoelasticidad es una función de las fuentes de iluminación, de los elementos ópticos, y de la información asociada a los esfuerzos; en este caso, a la diferencia de esfuerzos principales. Bajo esta aproximación, las imágenes de fotoelasticidad pueden ser generadas sintéticamente asignando valores de iluminación, posiciones fijas para los elementos ópticos y mapas analíticos de esfuerzos [11].

En este trabajo, un disco de policarbonato de 30 mm de radio, 8 mm de espesor y coeficiente óptico de 35×10^{-12} Pa fue modelado analíticamente utilizando una carga dinámica. Aquí, la longitud de onda de la luz fue considerada de $\lambda = 560 \text{ nm}$. Las intensidades para la fuente de iluminación y para la luz de fondo se asumieron como 255 y 0, respectivamente. La Figura 2 presenta una imagen sintética generada para el modelo del disco bajo compresión diametral cuando la carga aplicada es de 6000 N. Los puntos superior e inferior de la imagen corresponden a la zona de aplicación de la carga.

Figura 2: Imagen de fotoelasticidad para un modelo de disco cargado con $P=6.000$ N

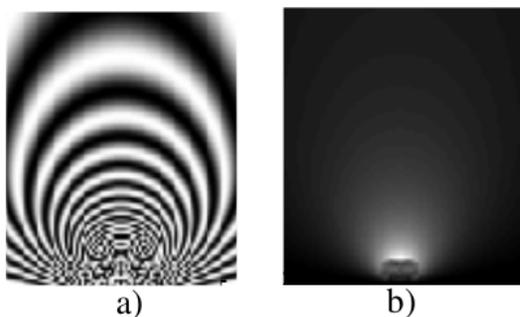


Fuente: elaboración propia

En un disco bajo compresión diametral, las zonas donde se aplican las cargas experimentan concentración de esfuerzos; allí, el bajo contraste de las franjas hace que las intensidades parezcan promediadas, lo cual limita

la recuperación de los esfuerzos, como se muestra en la Figura 3, para un patrón de franjas y los esfuerzos recuperados respectivamente. En casos dinámicos, este ejercicio se realiza por cada incremento de carga.

Figura 3: Patrones de franjas y retardo de fase en la zona inferior de concentración de esfuerzos



Fuente: elaboración propia

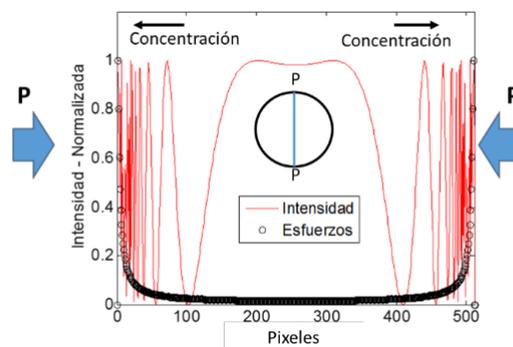
En relación a las imágenes anteriores, la densidad de franjas en el límite inferior de la Figura 3a produce una región donde el mapa de fase pierde continuidad. Este trabajo analiza la resolución de las imágenes de fotoelasticidad, en términos de la cuantificación del tamaño de la región con información borrosa de los esfuerzos; además, presenta la diferencia entre los esfuerzos del modelo analítico y los recuperados de los patrones de franjas. En esta investigación, la diferencia de los esfuerzos principales es evaluada utilizando el método de corrimiento de fase [5].

2.3. Pruebas de estimación de la región con pérdida de resolución

Un análisis espacial de la imagen muestra que las densidades de franjas se caracterizan por tener mayor contenido en frecuencia, es decir, para una línea de perfil en la imagen las intensidades oscilan más rápido en ubicaciones cercanas al concentrador de esfuerzos como se muestra en la Figura 4. En este caso, los extremos horizontales de la gráfica corresponden a los puntos de aplicación de la carga para un disco comprimido en sus extremos.

Como fue mostrado en la Figura 4, las concentraciones de esfuerzos muestran intensidades con alto componente de frecuencia, lo que indica que la pérdida de resolución está asociada a respuesta en frecuencia de las intensidades en la imagen.

Figura 4: Diferencia de esfuerzos e intensidad de patrones de franjas en un perfil del disco



Fuente: elaboración propia

En procesamiento de imágenes, una de las técnicas convencionales soportadas en la literatura para el análisis de frecuencia en una imagen es la transformada discreta de Fourier 2D. Las ventajas de este tipo de análisis, entre otras cosas, radican en la simplicidad matemática para efectuar operaciones que son complejas en el dominio espacial y en la posibilidad de identificar información que esté asociada a una frecuencia específica [14]. La transformada de Fourier, en principio, plantea que una señal periódica puede ser descompuesta en términos de sumatorias de senos y cosenos con diferente amplitud, frecuencia y fase. Para una matriz de datos I , la transformada discreta de Fourier $F(u, v)$ es realizada a través de (8).

$$F(u, v) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{y=0}^{M-1} \sum_{x=0}^{N-1} I(x, y) * e^{-j2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})} \quad (8)$$

Donde M y N son las dimensiones de la imagen, x e y son cada coordenada de los píxeles, u y v son las componentes espectrales. A manera de síntesis, la transformada de Fourier puede ser utilizada para expresar la información espacial de la imagen en términos de la frecuencia, como se muestra en la Figura 5 para la transformada de Fourier de una imagen de fotoelasticidad. En este caso, las intensidades centrales envuelven la información de alta frecuencia en la imagen y los extremos envuelven la información de las bajas frecuencias.

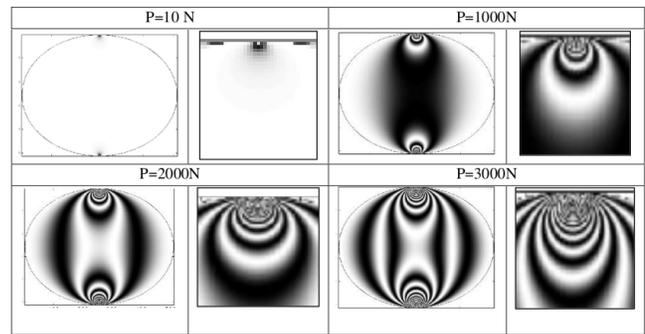
En vista de que la información de las concentraciones de esfuerzos se caracteriza por contener componentes de alta frecuencia, esta información puede ser identificada mediante la implementación de filtros que trabajen en una frecuencia específica. En este caso, la concentración de esfuerzos puede ser identificada operando el resultado

de la transformada de Fourier, con un filtro pasa altas; el efecto de este tipo de filtros consiste en atenuar la información de las bajas frecuencias en la imagen. Posterior al filtrado, las imágenes son devueltas al dominio espacial usando la transformada inversa de Fourier [14]. Finalmente, un conteo de los pixeles filtrados en la imagen permite estimar el tamaño de la región con pérdida de información en el mapa de esfuerzos. La Figura 6 resume el proceso de filtrado y estimación del tamaño con pérdida de información; así, la Figura 6a presenta el resultado de la transformada de Fourier aplicada a una imagen de fotoelasticidad, la Figura 6b representa el filtro utilizado para atenuar las bajas frecuencias y la Figura 6c muestra el esquema del disco, recuperado después de la transformada inversa de Fourier, y las regiones con pérdida de información.

3. Resultados y discusión

La compresión dinámica del disco generó patrones de franjas que crecen y se desplazan espacialmente a través de la secuencia de imágenes de fotoelasticidad, como se muestra para cuatro valores de carga en la Tabla 1. En estas imágenes, las concentraciones de esfuerzos producen altas densidades de franjas, las cuales tienden a tomar un comportamiento caótico en la medida que aumenta la carga. Este efecto puede ser observado en los extremos de las siguientes imágenes, los cuales fueron expandidos en la celda derecha de cada una.

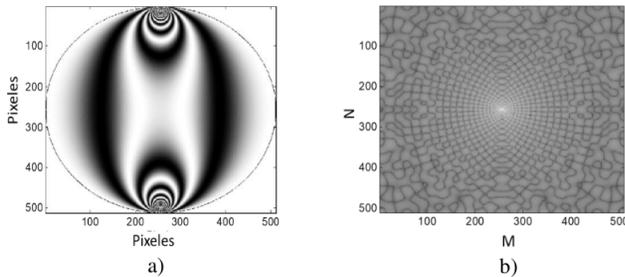
Tabla 1: Efecto del incremento de la carga en imágenes de fotoelasticidad.



Fuente: elaboración propia

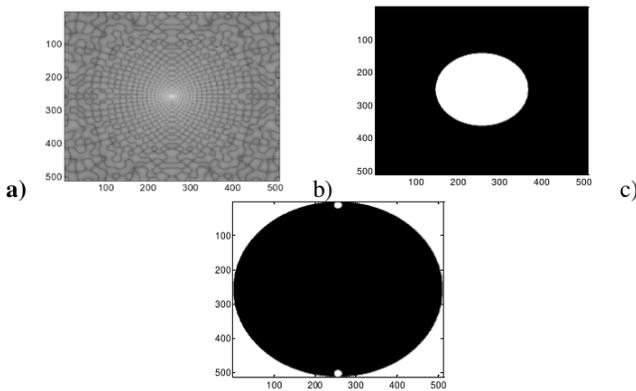
En las zonas de altas densidades de franjas, los valores analíticos de esfuerzos difieren de los valores recuperados a través de las imágenes, como se presenta en la Tabla 1 para los cuatro valores de carga citados en la tabla anterior. En estos casos, los esfuerzos son comparados a través de líneas de perfil extraídas verticalmente de los mapas generados.

Figura 5: Transformada discreta de Fourier aplicada a una imagen de fotoelasticidad. (a) Imagen de fotoelasticidad. (b) Transformada de Fourier de la imagen de fotoelasticidad



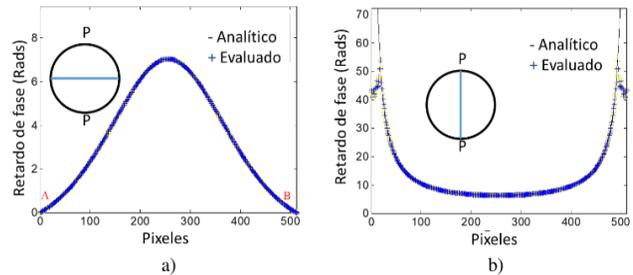
Fuente: elaboración propia

Figura 6: Estimación del tamaño de la región con pérdida de información. (a) Transformada de Fourier de una imagen de fotoelasticidad. (b) Filtro pasa altas. (c) Región con pérdida de información.



Fuente: elaboración propia

Figura 7: Comparación entre los esfuerzos generados analíticamente y los evaluados de las imágenes de fotoelasticidad. (a) Esfuerzos en línea horizontal. (b) Esfuerzos en línea vertical.

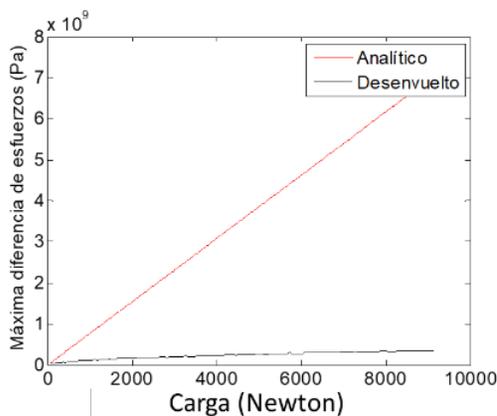


Fuente: elaboración propia

En la Figura 7, los esfuerzos recuperados en la línea de perfil horizontal corresponden fielmente a los esfuerzos generados analíticamente; sin embargo, los esfuerzos recuperados en la línea de perfil vertical muestran que, en los extremos donde se concentran los esfuerzos, la información pierde correspondencia. Este resultado, en primera medida confirma que existen diferencias entre la información recuperada por los métodos utilizados. En este trabajo las diferencias de esfuerzos mencionadas son las que validan el concepto de pérdida de resolución.

Como expansión del caso anterior, la Figura 8 presenta la diferencia entre los esfuerzos máximos generados analíticamente y los recuperados mediante el procesamiento de las imágenes de fotoelasticidad, para cada uno de los incrementos de carga considerados en este trabajo. Esta figura muestra que los esfuerzos máximos recuperados de las imágenes tienden a establecerse en un valor constante, mientras que los analíticos muestran un incremento significativo durante todo el proceso de compresión del disco. El efecto podría estar asociado al hecho que en un caso dinámico las imágenes de fotoelasticidad solo permiten recuperar los esfuerzos hasta cierto número de franjas. Este resultado podría ser de utilidad para caracterizar el rango de operación de la técnica.

Figura 8: Máxima diferencia de esfuerzos principales en función de la carga dinámica. Modelo analítico de esfuerzos y esfuerzos evaluados

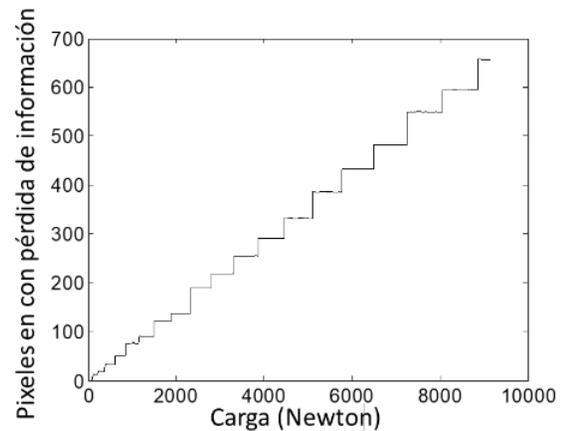


Fuente: elaboración propia

En el caso dinámico de la carga, el concepto de pérdida de resolución de las imágenes toma fuerza al observar que el tamaño de las regiones con pérdida de información aumenta con el incremento de la carga, como se presenta en la Figura 9. En este caso, el filtrado de altas frecuencias en las imágenes de fotoelasticidad permite identificar las regiones con

pérdida de información asociada al campo de esfuerzos en el modelo del disco. El comportamiento escalonado que presenta en la gráfica para la pérdida de resolución, podría estar asociado al hecho de que la densidad de franjas aumenta a lo largo del tiempo en la medida que se genera un nuevo orden en el mapa de retardos de fase, lo cual no sucede de manera proporcional con el incremento de la carga. El comportamiento de la secuencia muestra que hay rangos de carga que solo introducen variaciones de intensidad, y que hay valores específicos de carga que permiten la transición entre los diferentes valores en los mapas de fase.

Figura 9: Crecimiento de región con pérdida de información en imágenes de fotoelasticidad



Fuente: elaboración propia

4. Conclusiones

La densidad de franjas en regiones de aplicación de fuerza aumenta con el incremento de la carga trae como consecuencia que la información de los retardos de fase, la cual está asociada al campo de esfuerzos, no pueda ser recuperado en su totalidad. Para puntos del perfil vertical, ubicados en un vecindario de 30 píxeles de la aplicación de la fuerza, los esfuerzos que se recuperan de las imágenes de fotoelasticidad no superan el 75 % de los esfuerzos modelados analíticamente; este fenómeno solo es observado para las altas concentraciones de esfuerzos, en las otras zonas de las imágenes la información evaluada corresponde con los valores generados a través del modelo analítico.

Para el caso del disco bajo compresión diametral, el incremento de la carga introduce aumentos en las zonas con pérdida de información, los cuales presentan un comportamiento escalonado que podría estar asociado a la presencia de nuevos ordenes en los patrones de franjas.

5. Reconocimientos

Este trabajo fue financiado por el proyecto: Caracterización de dinámicas en campos de esfuerzos usando estrategias de visión artificial en el análisis de videos de fotoelasticidad, de la Convocatoria Nacional de Proyectos para el Fortalecimiento de la Investigación, Creación e Innovación de la Universidad Nacional de Colombia, 2016-2018.

Código del proyecto: 35135.

Se agradece el apoyo proporcionado por el departamento de Ingeniería Mecánica y la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Agradecimiento especial al grupo de investigación GIDIA de la Universidad Nacional de Colombia.

Agradecimientos a Colciencias por apoyar con la beca doctoral de la convocatoria 647.

Referencias

- [1] E. Patterson y Z. Wang, "Towards Full Field Automated Photoelastic Analysis of Complex Components". *Strain*, vol. 27, no. 2, pp. 49-53, 1991. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.1991.tb00752.x>
- [2] K. Ramesh y V. Ramakrishnan, "Digital Photoelasticity Of Glass: A Comprehensive Review". *Optics and Lasers in Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.03.017>
- [3] E. A. Patterson, "Digital Photoelasticity: Principles, Practice and Potential". *Strain*, vol. 38, no. 1, pp. 27-39, 2002. <https://doi.org/10.1046/j.0039-2103.2002.00004.x>
- [4] [4] A. Asundi, "Phase Shifting in Photoelasticity". *Experimental Techniques*, vol. 17, no. 1, pp. 19-23, 1993. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.1993.tb00269.x>
- [5] K. Ramesh y V. Ganapathy, "Phase-Shifting Methodologies in Photoelastic Analysis the Application Of Jones Calculus". *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 31, no. 6, pp. 423-432, 1996. <https://doi.org/10.1243/03093247V316423>
- [6] M. Ramji y K. Ramesh, "Whole Field Evaluation of Stress Components In Digital Photoelasticity issues, Implementation And Application". *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 46, no. 3, pp. 257-271, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2007.09.006>
- [7] G. S. Grewal y V. N. Dubey, "Inverse Problem of Photoelastic Fringe Mapping Using Neural Networks". *Measurement Science and Technology*, vol. 18, no. 5, p. 1361, 2007. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/18/5/024>
- [8] J. Quiroga y A. Gonzalez-Cano, "Separation of Isoclinics and Isochromatics from Photoelastic Data With A Regularized Phase-Tracking Technique". *Applied optics*, vol. 39, no. 17, pp. 2931-2940, 2000. <https://doi.org/10.1364/AO.39.002931>
- [9] W. Shang, X. Ji, y X. Yang, "Study on Several Problems of Automatic Full-Field Isoclinic Parameter Measurement By Digital Phase Shifting Photoelasticity". *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 126, no. 19, pp. 1981-1985, 2015.
- [10] K. Ramesh y S. Mangal, "Data Acquisition Techniques in Digital Photoelasticity: a Review". *Optics and lasers in engineering*, vol. 30, no. 1, pp. 53-75, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0143-8166\(97\)00105-X](https://doi.org/10.1016/S0143-8166(97)00105-X)
- [11] J. Bri-ez de Leon, A. Restrepo, y J. W. Branch, "Time-Space Analysis In Photoelasticity Images Using Recurrent Neural Networks To Detect Zones.
- [12] J. C. Bri-ez de Leon, A. Restrepo, y J. W. Branch, "High
- [13] P. M. Junior, F. Vieira, C. Magalhaes, J. Ribeiro, y I. Ríos, "Numerical Method to Digital Photoelasticity Using Plane Polariscopes". *Optics express*, vol. 24, no. 12, pp. 12 617-12 624, 2016.
- [14] C. Erik, Z. Daniel, y P. Marco, "Procesamiento digital de imágenes con matlab y simulink". RA-MA Editorial, México, 2010.