



CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN OPTICA, A.C.

“INTERFEROMETRÍA ELECTRÓNICA DE PATRONES DE MOTEADO Y DESPLAZAMIENTO DE FASE SIMULTÁNEO USANDO TÉCNICAS DE POLARIZACIÓN”



Tesis que para obtener el grado de Doctor en Ciencias (Óptica)

Presenta: Gustavo Adolfo Gómez Méndez

Directora de Tesis: Dra. Amalia Martínez García

León · Guanajuato · México
Agosto de 2020



Vo.Bo Asesora
Agosto 14, 2020



**CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN OPTICA, A.C.**

Derechos reservados por
Gustavo Adolfo Gómez Méndez
2020

Dedicatoria

*A mis padres
María Lilia y William*

*A mis hermanos
Diego y Milton*

*A mis sobrinos
Valery, Sebastián, César y Daniel*

A la familia Urbano Franco

Agradecimientos

Agradezco al CIO y a su valioso recurso humano por la confianza y apoyo para llevar a cabo esta parte de mi proyecto de vida.

De manera muy especial, agradezco a la Dra. Amalia Martínez García por su maravillosa labor académica y humana para conmigo, al Dr. Juan Antonio Rayas Alvarez por su incondicional apoyo académico y forma de impulsar retos, a la M. en C. Ana Karen Reyes por su colaboración en pro del cumplimiento de algunos objetivos, así como al resto de los integrantes del Grupo de Pruebas Ópticas y Mecánicas.

Al comité de seguimiento de la presente tesis: Dr. Abundio Dávila Álvarez, Dr. Moisés Cywiak Garbarcewicz y Dr. David Moreno Hernández, por sus importantes comentarios y sugerencias a lo largo del desarrollo de este trabajo.

Agradezco al Dr. Noel Iván Toto Arellano y a su grupo de trabajo por el cordial apoyo académico y por todas las gestiones durante mi estancia de investigación en el Laboratorio de Óptica y Fotónica en la Universidad Tecnológica de Tulancingo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por su apoyo durante el periodo 2016-2020 mediante la beca 789043/616460.

De manera atenta, agradezco y reconozco el inmenso apoyo que me brindaron mis amigos-seres queridos, en el pasado y presente, en Colombia y desde Colombia, y el apoyo incondicional de mis amigos y de la familia Urbano-Franco en México.

Resumen

En la presente tesis se implementaron las dos configuraciones de la técnica de interferometría electrónica de patrones de moteado (ESPI por sus siglas en inglés: Electronic Speckle Pattern Interferometry) correspondientes a los interferómetros con sensibilidad fuera-de-plano (FP) y en-plano (EP). Dada la importancia de los estudios de eventos dinámicos se implementaron técnicas de polarización para producir corrimiento de fase simultáneo en un interferómetro FP.

Para el caso del sistema diseñado con sensibilidad fuera de plano, donde el ángulo de iluminación de la probeta de aluminio es de 20° , se calculó el vector de sensibilidad en los casos de iluminación colimada y divergente de acuerdo a la geometría del sistema óptico. Los resultados muestran un error del 3.41% y de 4.30% respectivamente en la evaluación del campo de desplazamiento $w(x,y)$ cuando en ambos casos se considera que la componente e_z del vector de sensibilidad es constante.

Por otra parte, haciendo uso de un sistema con sensibilidad en plano, se llevó a cabo la caracterización mecánica de una muestra correspondiente a un biopolímero que es sujeto a tracción evaluando secuencialmente 1360 estados, cada estado evaluado a una velocidad de $3 \mu\text{m/s}$. Ya que el tamaño de los mapas de los campos de desplazamiento cambia debido a la tracción de la muestra, se hace una corrección de escalamiento para relacionar los puntos del mapa con los correspondientes en el siguiente mapa. El método permite la evaluación correcta de los mapas de esfuerzo que describen la evolución mecánica de la probeta.

Finalmente, para el sistema FP, se implementó un método de corrimiento de fase simultáneo de dos pasos donde el corrimiento de fase es obtenido mediante modulación por polarización. La obtención de dos patrones con corrimiento de fase se logra mediante un

arreglo replicador basado en una configuración de Michelson. Se muestran resultados experimentales para el seguimiento de un evento dinámico en una probeta de aluminio que es sometida a flexión mecánica. El evento fue registrado mediante la captura de 290 patrones en 9.6 segundos (~30 fps).

Palabras Claves: ESPI, interferometría fuera-de-plano y en-plano, corrimiento de fase simultáneo, modulación por polarización, caracterización mecánica.

Abstract

In this thesis, two configurations of the Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI) technique, corresponding to the interferometers with out-of-plane and in-plane sensitivity, were implemented. Given the importance of dynamic event studies, polarization techniques were carried out to obtain simultaneous phase-shifting in an out-of-plane interferometer.

For the case of the designed system with out-of-plane sensitivity, where the illumination angle was 20° , the sensitivity vector was calculated in cases of collimated and divergent illumination, in accordance to the optical system's geometry. The results show an error of 3.41% and 4.30% respectively in the evaluation of the displacement field $w(x,y)$, when the component e_z of the sensitivity vector both is the reference value and is being considered as constant in both cases.

Using the in-plane configuration, a system was implemented in order to characterize the mechanical performance of a biopolymer sample subjected to traction along the y direction, sequentially capturing 1360 states, each state captured at a speed of $3\mu\text{m/s}$. Since the information of the maps changes with size due to the fact that the sample is being pulled at the upper end while it is clamped at the lower end, a scaling method to relate the maps to each other, point-to-point, is presented. The method allows one to correctly evaluate the stress maps that describe the mechanical evolution of the specimen.

On the other hand, for the out-of-plane system, a two-step simultaneous phase-shifting method was implemented. The obtention of two phase-shifted patterns is achieved by means of a replicating optical setup based on a Michelson configuration. Experimental results are shown from the monitoring of a dynamic event in an aluminum specimen that

is subjected to mechanical flexion. The event was registered by capturing 290 images during 9.6 seconds (30 frames per second).

Keywords: ESPI, out-of-plane and in-plane interferometry, simultaneous phase-shifting, polarization modulation, mechanical testing.

Contenido

Introducción	1
I. Objetivos.....	5
II. Sumario.....	6

Capítulo 1

Interferometría electrónica de patrones de moteado.....	7
1.1. Fenómeno de moteado.....	8
1.2. Correlación de patrones de moteado.....	10
1.3. Vector de sensibilidad	12
1.3.1. Caso de un haz de iluminación	12
1.3.2. Vector de sensibilidad para un haz de iluminación colimado incidiendo a ángulos pequeños.....	16
1.3.3. Caso de Iluminación Dual	17

Capítulo 2

Error relativo en la medida fuera-de-plano debido al tipo de iluminación.....	19
2.1. Interferómetro FP	20
2.1.1. Análisis del vector de sensibilidad para un haz de iluminación colimada y oblicua.....	20
2.1.2. Modelo geométrico	22
2.2. Análisis del vector de sensibilidad para iluminación divergente y colimada para un interferómetro con sensibilidad FP	23
2.2.1. Arreglo experimental FP	24
2.2.2. Obtención del vector de sensibilidad para iluminación divergente	25
2.2.3. Obtención del vector de sensibilidad para iluminación oblicua y colimada usando el modelo geométrico	26
2.2.4. Evaluación de error porcentual en la medida del campo de desplazamiento.....	26

2.2.5. Conclusión.....30

Capítulo 3

Uso de un interferómetro con sensibilidad en plano para la medición del módulo de Young de una membrana de PLA-NC31

3.1. Muestra de biopolímero reforzado32

3.2. Prueba óptica.....33

3.3. Seguimiento de la evolución mecánica35

3.3.1. Distribución de información en los mapas de desplazamiento v35

3.3.2. Escalamiento de mapas de desplazamiento y mapas de esfuerzo.....37

3.4. Conclusión.....44

Capítulo 4

Corrimiento de fase simultáneo en ESPI fuera de plano45

4.1. Corrimiento de fase mediante polarización45

4.2. Réplica de patrón de interferencia49

4.3. Obtención de fase con dos pasos.....50

4.4. Corrimiento de fase mediante modulación por polarización50

4.4.1. Arreglo FP con componentes de polarización 50

4.4.2. Resultados de corrimiento de fase por polarización.....52

4.5. Corrimiento de fase simultáneo en un interferómetro ESPI-FP57

4.5.1. Resultados del corrimiento de fase simultáneo..... 58

4.6. Conclusión.....61

Capítulo 5

Conclusiones generales y trabajo a futuro.....62

Bibliografía.....64

Anexo 172

Publicaciones	72
Trabajos presentados en congresos.....	72

Introducción

Comúnmente, una prueba mecánica, la cual comprende usar medidores de deformación, implica obtener una curva ingenieril de esfuerzo-deformación que describe el comportamiento mecánico de una muestra sometida a una carga [1]; por lo tanto, técnicas de metrología óptica que ofrecen alta sensibilidad y alta resolución se han reportado para evaluar tal comportamiento en campo completo [2-6]. Arreglos fuera-de-plano (FP) y en-plano (EP) ambos basados en interferometría electrónica de patrones de moteado (ESPI, por sus siglas en inglés: Electronic Speckle Pattern Interferometry) contribuyen en la investigación del comportamiento mecánico de una muestra sometida a una carga mediante una tracción o flexión mecánica [7-12]. Mediante la técnica de ESPI se obtiene un mapa de desplazamiento para un estado de la muestra de estudio y el respectivo mapa de deformación que describe las zonas de esfuerzo sufridas por la misma muestra [10,13-15]. Los efectos mecánicos pueden ser medidos mediante el análisis de los patrones de moteado asociado a la superficie ópticamente rugosa de la muestra. Esto se logra correlacionando dos patrones que corresponden a dos diferentes estados de la superficie [15-19]. El resultado es un patrón de franjas cuya fase está relacionada con el desplazamiento/deformación del objeto mediante el vector de sensibilidad. Entonces, la alteración en la fase debido al estrés puede ser determinado por el producto escalar entre el vector de desplazamiento y el de sensibilidad. El vector de sensibilidad depende de la geometría del arreglo ESPI, así como del tipo de iluminación y da cuenta de la dirección en la que el sistema tiene máxima sensibilidad.

Introducción

ESPI, como una técnica de campo completo para medir propiedades mecánicas, ya se ha implementado para evaluar el comportamiento de materiales [20]. Se ha reportado la obtención de patrones de moteado sucesivos de una membrana rígida de silicio sometida a carga por tracción hasta alcanzar una deformación del 0.2% [21]. Madjarova y otros [22] reportan la relación entre interferogramas y puntos sobre una curva esfuerzo-tiempo obtenida usando una máquina universal, así como los mapas de deformación para una zona de interés definida de una placa de aluminio. Labbé en [23] analiza la evolución del comportamiento mecánico de una muestra de aluminio mediante la comparación de la curva ingenieril y los campos de deformación correspondientes a un área iluminada. Xiangjun y otros [24] presentan una caracterización de una fractura en un concreto reforzado con fibras. Ellos obtuvieron curvas de carga-desplazamiento usando una máquina universal y asociaron mapas de desplazamiento con una zona definida del concreto. Respecto a compuestos reforzados, es necesario tener presente que el desempeño de un compuesto sometido a estrés puede cambiar obedeciendo a su anisotropía. Pomarède y otros [25] reportan una evaluación mecánica de un compuesto reforzado con fibra de vidrio de poliamida con tomografía de rayos X.

Materiales como compuestos fabricados por electrohilado (electrospinning, en inglés) han generado interés ya que se obtienen fibras con fuerza atractiva y con un diámetro reducido que contribuye al decremento en el número de defectos estructurales por unidad. Esta característica está fuertemente relacionada con la anisotropía de la red de fibras [26,27]; por lo tanto el comportamiento de la red está basado en las características individuales de las fibras y en las interacciones entre ellas [28]. Mahjoubi y otros [29] reportan efectos debido a anisotropía que pueden conllevar a un comportamiento mecánico inesperado. Estos trabajos muestran la necesidad de analizar materiales anisotrópicos usando métodos alternativos para medir la respuesta mecánica y que contribuyan al entendimiento del fortalecimiento mecánico de estos materiales.

Algunos de los trabajos mencionados arriba se rigieron en el estándar de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) para probetas con geometría tipo hueso. Este

tipo de geometría induce una falla en el centro de la muestra; de ahí que los reportes descritos presentan resultados para regiones específicas en materiales rígidos y especímenes reforzados. Adicionalmente, los mapas de desplazamiento y de deformación solo se calcularon para cada uno de los estados de la muestra. Los autores no consideraron que una deformación mayor al tamaño de pixel del sensor de una cámara implica un tamaño diferente de malla para cada mapa. Esta consideración debería tenerse en cuenta si se pretende hacer un análisis cuantitativo de la evolución de la probeta mediante los mapas de desplazamiento y deformación. Por último, las curvas de esfuerzo-deformación se calcularon mediante una prueba mecánica tradicional de tracción.

En pruebas mecánicas como compresión o tracción, el método de medida debe tener la capacidad de seguir el dinamismo con el que cambia la probeta mientras es sometida a carga. En estas pruebas, el uso de un transductor piezoeléctrico para generar un corrimiento de fase mientras la probeta cambia, implica tiempo para el control del transductor. Buscando suprimir el uso de estos dispositivos electromecánicos, se han propuesto técnicas de corrimiento de fase usando modulación de polarización [30]. Estas técnicas se han implementado en algunos sistemas con configuración Mach-Zender [30], interferómetro Michelson [31], interferómetros Twyman-Green y tipo Fizeau [32], e interferómetro de desplazamiento cíclico [33]. En ESPI, las técnicas de corrimiento de fase mediante polarización se han implementado para obtener solo fase envuelta a partir de cuatro pasos [34] así como en arreglos de shearografía donde el desplazamiento radial es introducido por un sistema de dos lentes para obtener la deformación de la muestra [35].

Ahora, para eliminar el tiempo de espera entre cada uno de los interferogramas para dos, tres o cuatro pasos, se han propuesto sistemas para captura simultánea de varios interferogramas [30,31,36,37], tales como interferómetro de difracción de punto [38], arreglo de polarizadores [32], interferómetro de rejilla de fase de doble ventana [37], y mascarilla de polarizadores que requieren: posición estratégica frente al sensor de la cámara usada, y un algoritmo para extraer la información de los pixeles respectivos que componen el primer,

Introducción

segundo, tercero y cuarto interferograma [39]. La segunda característica ha llevado a que se propongan algoritmos para la demodulación de fase a partir de interferogramas con información distribuida en superpíxeles [40,41].

En esta tesis, se estudió el vector de sensibilidad para un interferómetro fuera-plano usado para la medición del campo de desplazamiento de una probeta sometida a flexión mecánica. La probeta se flexionó en la misma dirección en que se aplicó una carga. El estudio comprende evaluar el vector de sensibilidad para los casos de iluminación colimada y divergente para el interferómetro. En iluminación colimada se propone un modelo geométrico para calcular la variación de las componentes del vector de sensibilidad. La geometría del sistema óptico permitió encontrar una mayor sensibilidad a lo largo de la dirección de flexión, las otras dos direcciones de las componentes presentaron valores relativamente pequeños. Se midió el campo de desplazamiento inducido a lo largo de la dirección de carga aplicada. Los errores obtenidos en la medida del campo de desplazamiento asociado a iluminación divergente y colimada, pueden ser predichos respectivamente cuando el vector de sensibilidad se considera como constante [11].

Usando un interferómetro en-plano acoplado a un sistema de tracción mecánico, se realizó la caracterización mecánica de campo completo de una probeta de biopolímero. Se obtuvieron mapas de desplazamiento y los respectivos mapas de deformación para cada uno de los 1360 estados evaluados. Ya que la muestra sufre una elongación debido a que es traccionada desde su parte superior mientras está anclada en su parte inferior, se presenta un método de escalamiento de mapas para relacionar punto a punto los mapas entre ellos. El método permite la correcta evaluación de mapas de deformación secuenciales, los cuales describen la evolución mecánica del material. Más allá de relacionar mapas, es posible extraer valores de deformación para zonas de interés de cada mapa con el propósito de construir las respectivas curvas esfuerzo-deformación. Se construyeron tres curvas asociadas a tres zonas (Superior, media e inferior) de la muestra. Las curvas representan el comportamiento no homogéneo de

la probeta. Para estas tres zonas, usando las curvas, se obtuvieron tres diferentes módulos de elasticidad: $E_S = 2.59$ MPa, $E_M = 1.97$ MPa y $E_I = 1.67$ MPa. Los resultados obtenidos muestran que la técnica de la mano con el método de escalamiento, es una propuesta novedosa para complementar la caracterización de materiales no homogéneos [12].

Finalmente, se implementó un arreglo fuera-de-plano empleando corrimiento de fase para dos pasos mediante modulación por polarización. El sistema genera estados de polarización circular, con direcciones opuestas en cada brazo del sistema, que se superponen a la salida del interferómetro. Para generar el corrimiento de fase, se opera manualmente un polarizador lineal convencional en tal salida. La técnica de corrimiento de fase se demuestra con la implementación de un algoritmo de dos pasos para medir el desplazamiento fuera de plano de una placa de aluminio [42]. Por último, se presenta un arreglo fuera-de-plano con componentes de polarización, acoplado a un sistema con configuración Michelson encargado de replicar dos patrones. Es decir, estos dos sistemas acoplados permiten la captura de dos patrones en una sola toma. Esta propuesta fue evaluada mediante la medición dinámica del campo de desplazamiento de una probeta sometida de forma continua a flexión [43].

I. Objetivos

- Analizar el vector de sensibilidad en los casos de iluminación colimada y divergente para un sistema con sensibilidad fuera de plano.
- Implementar técnicas de polarización en desplazamiento de fase para la obtención en una sola toma de dos patrones de franjas.
- Estudiar el compartimiento mecánico no homogéneo de una probeta de biopolímero sometida a tracción, mediante la obtención de módulos de elasticidad de diferentes zonas de la probeta usando la técnica de ESPI.

II. Sumario

En el **Capítulo 1** se presentan algunos conceptos básicos relacionados con el fenómeno de moteado y su uso en interferometría electrónica de patrones de moteado para la evaluación del campo de desplazamiento. Incluye la teoría relacionada a la obtención del vector de sensibilidad.

En el **Capítulo 2** se analiza el vector de sensibilidad para un interferómetro con sensibilidad fuera de plano. Se obtiene el error en la medición del campo de desplazamiento a partir del vector de sensibilidad para los casos de iluminación divergente y colimada con respecto a la suposición de que la componente del vector de sensibilidad en la dirección “z” es constante.

En el **Capítulo 3** se describe la implementación de la técnica de interferometría electrónica de patrones de moteado con un sistema con sensibilidad en-plano para la evaluación de los módulos de elasticidad en diferentes zonas de un biopolímero sometido a tensión axial en la dirección del eje “y”.

En el **Capítulo 4** se describe la implementación de la técnica de interferometría electrónica de patrones de moteado usando un sistema con sensibilidad fuera-de-plano y modulación por polarización para corrimiento de fase manual y un sistema para el corrimiento de fase simultánea de dos patrones basado en una configuración Michelson. Se presentan los resultados experimentales correspondientes a los mapas de desplazamientos que representen el comportamiento dinámico de una probeta que está siendo sometida a flexión.

En el **Capítulo 5** se presentan las conclusiones generales de la tesis, así como el trabajo futuro a desarrollar.

Finalmente, en el **Anexo 1** se enlistan las publicaciones y los trabajos presentados en congresos.

Interferometría electrónica de patrones de moteado

En este capítulo se presentan conceptos básicos del fenómeno de moteado, su uso como método de doble exposición en interferometría electrónica de patrones de moteado, y una descripción teórica del vector de sensibilidad para las configuraciones fuera-de-plano y en-plano. Para la primera configuración se presenta la teoría correspondiente al vector de sensibilidad para iluminación divergente, así como para iluminación colimada donde es considerado constante para ángulos de iluminación del objeto menores a 5° [44]. Haciendo un análisis vectorial que relaciona la fuente de iluminación, el objeto y el observador, se obtiene que el vector de sensibilidad para iluminación divergente se puede calcular como la diferencia de los vectores unitarios de iluminación y de observación.

Para la segunda configuración, el caso iluminación dual, el vector de sensibilidad es obtenido a partir del principio de superposición al considerar dos sistemas de un solo haz iluminación, obteniendo que éste se pueda calcular como la diferencia de los vectores unitarios de iluminación. Se encuentra que no hay dependencia del vector unitario de observación.

1.1. Fenómeno de moteado

El fenómeno de moteado (speckle) se caracteriza por ser una distribución aleatoria del esparcimiento de luz coherente a través de una superficie considerada ópticamente rugosa [45]. Este fenómeno, después de considerarse como un efecto granular no deseado, fue aprovechado en los primeros estudios de técnicas de holografía usando luz láser para mediciones con alta sensibilidad de desplazamientos y esfuerzos [46]. El fenómeno, en conjunto con los sistemas digitales de adquisición (cámara CCD o CMOS) conforman una técnica potente (electronic speckle pattern interferometry - ESPI) para medir campos de desplazamientos de superficies rugosas. En comparación con las técnicas mecánicas tradicionales que arrojan datos asociados al comportamiento en promedio de un objeto sometido a esfuerzo, esta técnica basada en el moteado permite obtener datos de campo completo del objeto.

Teóricamente, la interferometría se basa en las propiedades estadísticas de un punto y dos puntos en el espacio y tiempo (primer y segundo orden), para la intensidad y fase de los patrones de moteado [47,48]. Las siguientes son algunas consideraciones que plantea tal estadística y que definen la distribución de moteado como completamente desarrollado:

- La superficie del objeto es ópticamente rugosa si la raíz cuadrada del valor RMS de la altura de la rugosidad es mucho mayor que la longitud de onda de la fuente de irradiancia utilizada.
- La luz dispersada por el objeto llena uniformemente la pupila de salida del sistema óptico.
- La polarización lineal del haz incidente no cambia después de esparcirse por la superficie.

Capítulo 1. Interferometría de moteado

El moteado se puede generar de forma objetiva o subjetiva (Figura 1). La primera corresponde a la formación del patrón usando como objeto de esparcimiento una pantalla difusora o la superficie misma de interés (Figura 1(a)).

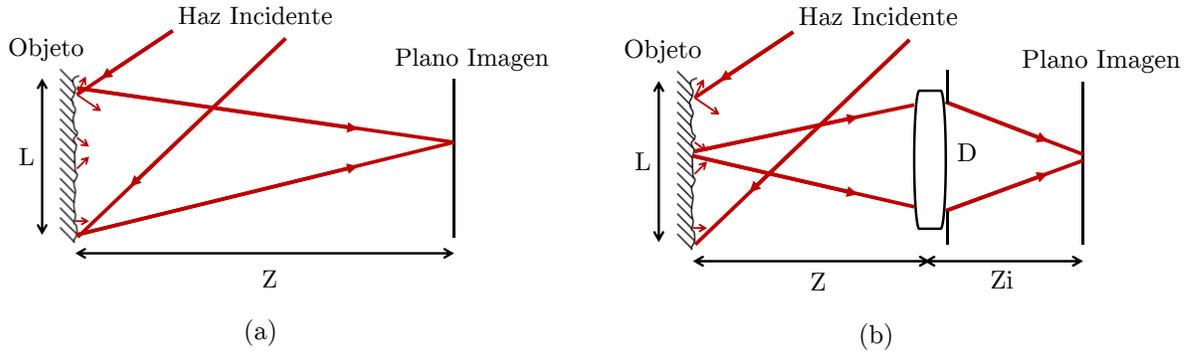


Figura 1. Esquema de la formación de un patrón de: (a) moteado objetivo y (b) moteado subjetivo.

En este caso de formación, la mota tiene un tamaño (Δx_s) que puede ser calculado como

$$\Delta x_s = \frac{\lambda Z}{L}, \quad (1.1)$$

donde λ es la longitud de onda del haz incidente, Z es la distancia entre la superficie rugosa y el plano imagen, y L es el tamaño de la zona iluminada.

La segunda implica el uso de un sistema óptico (lente) para formar la imagen del patrón (Figura 1(b)). Debido a esta componente óptica la intensidad en el plano imagen es limitada por el límite difracción, lo que lleva a que el tamaño medio de la mota subjetiva (d_s) en el plano imagen obedece al radio del disco de Airy [4], es decir que puede ser calculado como

$$d_s = 1.22 \frac{\lambda Zi}{D}, \quad (1.2)$$

donde Zi es la distancia entre el plano imagen y la lente, y D es el diámetro de la pupila. Debido a la presencia de la lente, la Ec. (1.2) indica que dos puntos, separados a una distancia mayor a la distancia $1.22 \lambda Zi/D$, tienen intensidades y fases independientes [49].

En la presente tesis, el desarrollo experimental involucra la generación de moteado subjetivo, ya que se usó una cámara con su sistema óptico para capturar los patrones. Para garantizar un moteado subjetivo completamente desarrollado, es necesario configurar una apertura numérica F que contribuya en el aumento del tamaño d_s y que a su vez sea comparable con el tamaño de pixel del detector de la cámara. Para buscar que el tamaño de la mota sea comparable, si $Z_i = f(1 + M)$, la Ec. (1.2) se puede reescribir como:

$$d_s = 1.22 \lambda F(1 + M), \quad (1.3)$$

donde $F = f/D$, siendo f la distancia focal de la lente, y M la magnificación.

1.2. Correlación de patrones de moteado

En la medición del campo de deformación de una superficie ópticamente rugosa es necesario analizar la interferencia de dos campos de amplitud asociados a distribuciones de moteado. Esta necesidad se debe a que un solo patrón de moteado presenta fase aleatoria que dificulta la extracción de información del cambio de la superficie. Entonces, se hace interferir un campo E_1 que se asocia al haz objeto, con un segundo campo E_2 que representa el haz referencia. La intensidad I de la interferencia en el detector con dimensiones $m \times n$ se expresa como sigue:

$$\begin{aligned} I(m, n) &= |E_1 + E_2|^2 = |E_1|^2 + |E_2|^2 + E_1 E_2^* + E_1^* E_2 \\ &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi), \end{aligned} \quad (1.4)$$

donde I_1 e I_2 son las intensidades de ambos campos, $2\sqrt{I_1 I_2}$ es la intensidad de modulación, y φ la fase resultante de ambos campos.

Definida la intensidad I , para obtener la información de fase, es necesario correlacionar dos intensidades: una asociada a la superficie sin deformación y otra a la deformación. Los

patrones de intensidad de la superficie capturados por la cámara antes (I_a) y después (I_d) de haber sufrido un cambio, se describen como:

$$I_a = I_{1a} + I_{2a} + 2\sqrt{I_{1a}I_{2a}} \cos(\varphi), \quad (1.5)$$

$$I_d = I_{1d} + I_{2d} + 2\sqrt{I_{1d}I_{2d}} \cos(\varphi + \Delta\phi), \quad (1.6)$$

donde $\Delta\phi$ es la variación de fase asociada al desplazamiento de la superficie rugosa.

Si la deformación de la superficie es suficientemente pequeña como para mantener constantes las intensidades medias y las de modulación, el valor absoluto de la diferencia de I_a e I_d resulta en un patrón de franjas expresado como [50]:

$$|I_a - I_d| \approx (I_a - I_d)^2 = \left(4\sqrt{I_1 I_2} \sin \left[\psi + \frac{\Delta\phi}{2} \right] \sin \frac{\Delta\phi}{2} \right)^2, \quad (1.8)$$

donde el término $4\sqrt{I_1 I_2}$ representa la modulación de la intensidad, $\sin \left[\psi + \frac{\Delta\phi}{2} \right]$ representa un moteado aleatorio y el tercer término $\sin \frac{\Delta\phi}{2}$ se asocia al patrón de franjas cuyo argumento es la fase de las franjas asociada al cambio en la superficie [16]. La Figura 2 muestra como ejemplo, patrones de moteado antes y después de una deformación, así como la correlación de ambos patrones de moteado resultando un patrón de franjas.

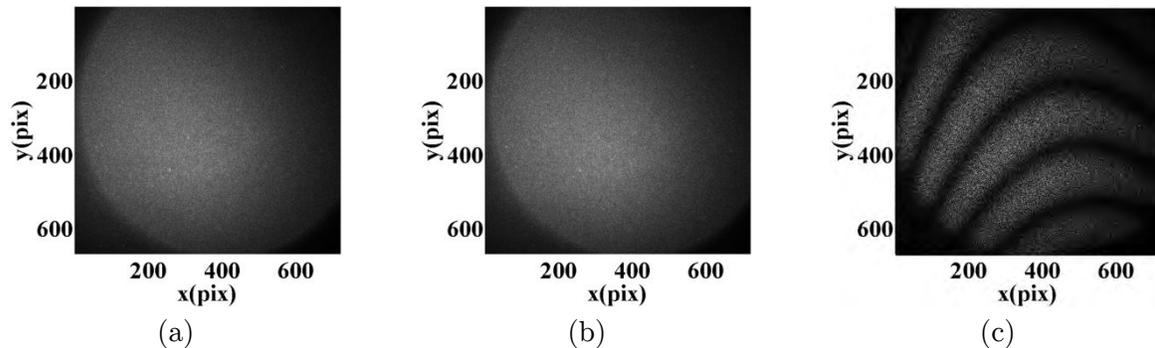


Figura 2. (a) Patrón de moteado asociado a un estado inicial, (b) Patrón de moteado asociado a un estado final y (c) Patrón de franjas resultante del valor absoluto de la sustracción entre los dos patrones de moteado (a) y (b).

Esta correlación de patrones de moteado capturados por una cámara para generar un patrón de franjas, se le denomina interferometría electrónica de patrones de moteado (ESPI).

1.3. Vector de sensibilidad

ESPI es una técnica de doble exposición que implica la correlación de dos patrones de moteado. El resultado de correlacionar dos patrones de moteado es un patrón de franjas cuya fase está relacionada con el desplazamiento relativo de la superficie mediante el vector de sensibilidad. Este vector depende de la geometría del arreglo y da la dirección en la que el sistema tiene máxima sensibilidad. ESPI tiene dos configuraciones: para medir campos desplazamiento fuera de plano y para medir desplazamiento en plano. La primera configuración comprende el uso de un solo haz de iluminación y la segunda dos haces de iluminación. En esta sección se presenta las expresiones matemáticas del vector de sensibilidad para ambas configuraciones.

1.3.1. Caso de un haz de iluminación

La Figura 3(a) presenta un esquema vectorial del caso fuera de plano que se compone de un haz de iluminación. Al aplicarse una deformación sobre una superficie, cada punto $P(x, y, z)$ en ella pasará de una posición inicial P_i a una segunda posición P_f . El desplazamiento en cada punto involucra una diferencia de camino óptico $\delta(P)$. Entonces la fase $\Delta\phi$ asociada a la deformación está dada por [28]:

$$\Delta\phi(P) = \frac{2\pi}{\lambda} \delta(P) \quad (1.9)$$

Dado el desplazamiento de un punto de una posición inicial a una final como se muestra en la Figura 3a, el vector asociado a este desplazamiento se calcula mediante la sustracción de los vectores de posición de P_i y P_f como:

$$\vec{d}(u, v, w) = \vec{P}_f - \vec{P}_i, \quad (1.10)$$

siendo u , v y w las componentes de desplazamiento en las direcciones x , y y z respectivamente.

Observando la Figura 3a, con respecto al punto inicial, un haz emergente de la fuente de iluminación S recorre una distancia $\overline{SP}_i + \overline{OP}_i$ hasta el observador O , y con respecto al segundo punto la distancia recorrida es $\overline{SP}_f + \overline{OP}_f$. Ya que δ es la diferencia entre estas dos distancias recorridas, entonces

$$\delta(P) = \overline{SP}_i + \overline{OP}_i - \overline{SP}_f - \overline{OP}_f \quad (1.11)$$

La anterior ecuación, en términos de vectores unitarios de iluminación \hat{s}_i y \hat{s}_f y de observación \hat{b}_i y \hat{b}_f , se puede reescribir como [47]:

$$\delta(P) = \hat{s}_i \cdot \overline{SP}_i + \hat{b}_i \cdot \overline{OP}_i - \hat{s}_f \cdot \overline{SP}_f - \hat{b}_f \cdot \overline{OP}_f \quad (1.12)$$

Siguiendo el análisis vectorial presentado en la referencia [47], se obtiene el bisector \hat{s} de los vectores unitarios \hat{s}_i y \hat{s}_f , y el bisector \hat{b} de los vectores unitarios \hat{b}_i y \hat{b}_f , así como las diferencias medias $\Delta\hat{s}$ y $\Delta\hat{b}$ de los vectores unitarios de iluminación y de observación respectivamente. La Figura 3b muestra un esquema de los vectores unitarios, los bisectores y los vectores medios. Las expresiones obtenidas son:

$$\begin{aligned} \hat{s} &= \frac{1}{2}[\hat{s}_i + \hat{s}_f] & \hat{b} &= \frac{1}{2}[\hat{b}_i + \hat{b}_f] \\ \Delta\hat{s} &= \frac{1}{2}[\hat{s}_i - \hat{s}_f] & \Delta\hat{b} &= \frac{1}{2}[\hat{b}_i - \hat{b}_f] \end{aligned} \quad (1.13)$$

Tomando los vectores unitarios en términos de los bisectores y vectores medios respectivos y la definición del vector de desplazamiento $\overline{OP}_i - \overline{OP}_f = \vec{d}$ y $\overline{SP}_f - \overline{SP}_i = \vec{d}$, la Ec. (1.12) queda como:

$$\begin{aligned} \delta(P) &= (\hat{s} + \Delta\hat{s}) \cdot \overline{SP_i} + (\hat{b} + \Delta\hat{b}) \cdot \overline{OP_i} - (\hat{s} - \Delta\hat{s}) \cdot \overline{SP_f} - (\hat{b} - \Delta\hat{b}) \cdot \overline{OP_f} \\ &= \hat{b} \cdot \vec{d} - \hat{s} \cdot \vec{d} + \Delta\hat{b} \cdot (\overline{OP_i} + \overline{OP_f}) + \Delta\hat{s} \cdot (\overline{SP_i} + \overline{SP_f}) \end{aligned} \quad (1.14)$$

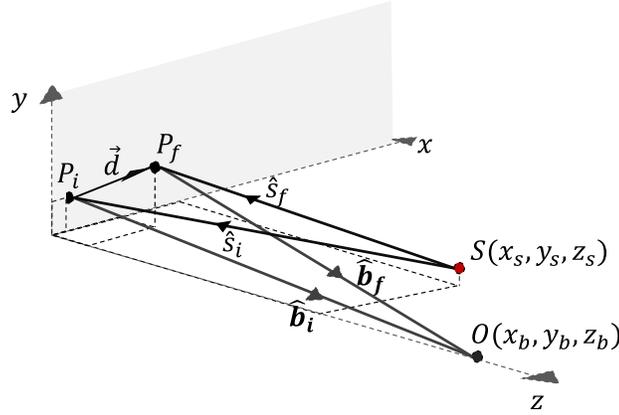


Figura 3a. Esquema fuera-de-plano para obtener el vector de sensibilidad.

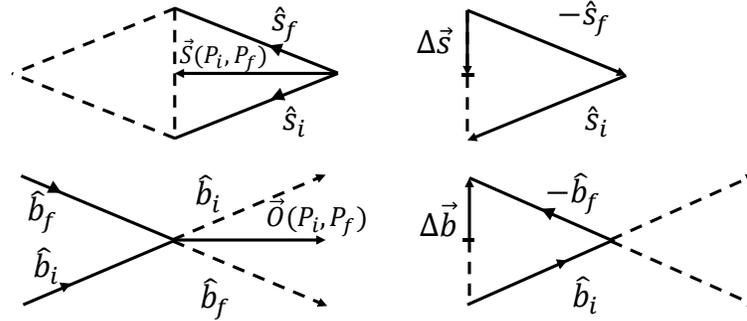


Figura 3b. Esquema vectorial de apoyo para obtener vectores bisectores y medios.

Ahora, como los desplazamientos son más pequeños que las dimensiones del arreglo, es decir, $|\vec{d}|$ está en el orden de micrómetros, mientras $\overline{SP_i}$ y $\overline{OP_i}$ en el rango de metros. Esta misma comparación se aplica para $\Delta\hat{s}$ y $\Delta\hat{b}$ con respecto a las longitudes que representan los vectores unitarios \hat{s}_i y \hat{b}_i . Más aún, ya que $\Delta\hat{s}$ es casi ortogonal a $\overline{SP_i} + \overline{SP_f}$ y $\Delta\hat{b}$ casi ortogonal a $\overline{OP_f} + \overline{OP_i}$, el producto escalar entre cada par es casi cero, es decir, se desprecian llevando a una indistinción en los puntos P_i y P_f . Entonces la Ec. (1.14) queda como

$$\delta(P) = \vec{d}(P) \cdot [\hat{b}(P) - \hat{s}(P)] \quad (1.15)$$

Capítulo 1. Interferometría de moteado

Sustituyendo la Ec. (1.15) en la Ec. (1.9) se determina que la fase asociada al desplazamiento del punto P y en función de los vectores unitarios de observación e iluminación, es:

$$\Delta\phi(P) = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{d}(P) \cdot [\hat{b}(P) - \hat{s}(P)], \quad (1.16)$$

de donde se define como el vector de sensibilidad [2,47]

$$\vec{e}(P) = \frac{2\pi}{\lambda} [\hat{b}(P) - \hat{s}(P)], \quad (1.17)$$

El vector $\vec{e}(P)$ es calculado a partir de sus componentes:

$$e_x = \frac{2\pi}{\lambda} (b_x - s_x), \quad e_y = \frac{2\pi}{\lambda} (b_y - s_y), \quad e_z = \frac{2\pi}{\lambda} (b_z - s_z), \quad (1.18)$$

donde las componentes de \hat{b} son:

$$b_x = \frac{x_b - x}{r_b}, \quad b_y = \frac{y_b - y}{r_b}, \quad b_z = \frac{z_b - z}{r_b}, \quad (1.19)$$

$$r_b = \sqrt{(x_b - x)^2 + (y_b - y)^2 + (z_b - z)^2} \quad (1.20)$$

Las componentes \hat{s} son:

$$s_x = \frac{x - x_s}{r_s}, \quad s_y = \frac{y - y_s}{r_s}, \quad s_z = \frac{z - z_s}{r_s}, \quad (1.21)$$

$$r_s = \sqrt{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s)^2} \quad (1.22)$$

1.3.2. Vector de sensibilidad para un haz de iluminación colimado incidiendo a ángulos pequeños

La Figura 4(a) muestra el esquema fuera-de-plano con iluminación colimada. La Figura 4(b) describe geoméricamente el desplazamiento del punto P_i a P'_i lo cual introduce una diferencia de camino óptico que es asociada a una diferencia de fase dada por la ecuación:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} [w(1 + \cos\theta) + u \operatorname{sen}\theta], \quad (1.23)$$

donde u y w son las componentes del vector de desplazamiento $\vec{d}(u, v, w)$ correspondientes al plano x - z donde se presenta variación del camino óptico, mientras que la componente v se relaciona con la dirección “ y ” en la que se asume no se presenta tal variación ya que la iluminación está desplazada en “ x ”.

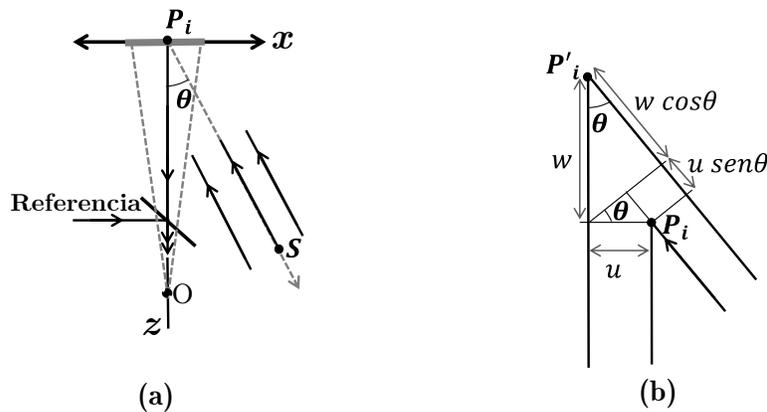


Figura 4. (a) Esquema FP. (b) Diagrama para obtener la componente fuera de plano.

Si $\theta \leq 5^\circ$, el término $\operatorname{sen}\theta \cong 0$, mientras que $\cos\theta \approx 1$. De esta manera la Ec. (1.23) se puede aproximar a:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} w, \quad (1.24)$$

por lo que el vector de sensibilidad para iluminación colimada se considera constante para todos los puntos de la superficie iluminada [47].

1.3.3. Caso de Iluminación Dual

La Figura 5 muestra un esquema EP con dos fuentes puntuales S1 y S2 ubicadas simétricamente a un ángulo θ con respecto al eje z y el observador O.

Con respecto al observador, el vector de sensibilidad para cada fuente de iluminación es [2,10,49]:

$$\vec{e}_1 = \frac{2\pi}{\lambda} [\hat{b} - \hat{s}_1], \quad \vec{e}_2 = \frac{2\pi}{\lambda} [\hat{b} - \hat{s}_2], \quad (1.25)$$

donde \hat{s}_1 y \hat{s}_2 son los vectores unitarios que describen las características vectoriales de los rayos emergentes de las fuentes S1 y S2.

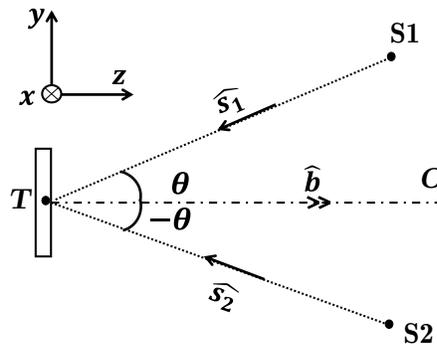


Figura 5. Esquema general del interferómetro en-plano.

La diferencia entre los vectores de la Ec. (1.25) resulta en el vector de sensibilidad para la configuración en plano como sigue:

$$\vec{e}(P) = \frac{2\pi}{\lambda} [\hat{s}_2(P) - \hat{s}_1(P)], \quad (1.26)$$

Capítulo 1. Interferometría de moteado

Las componentes del vector de sensibilidad son:

$$e_x = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{x - x_{s1}}{r_1} - \frac{x - x_{s2}}{r_2} \right], \quad e_y = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{y - y_{s1}}{r_1} - \frac{y - y_{s2}}{r_2} \right],$$

$$e_z = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{z - z_{s1}}{r_1} - \frac{z - z_{s2}}{r_2} \right], \quad (1.27)$$

donde $P(x, y, z)$ es la posición de un punto en el objeto en la Figura 5., x_{s1} , y_{s1} , z_{s1} y x_{s2} , y_{s2} , z_{s2} son las coordenadas de posición asociadas a las fuentes de S_1 y S_2 , respectivamente. Siendo

$$r_1 = \sqrt{(x - x_{s1})^2 + (y - y_{s1})^2 + (z - z_{s1})^2},$$

$$r_2 = \sqrt{(x - x_{s2})^2 + (y - y_{s2})^2 + (z - z_{s2})^2} \quad (1.28)$$

Es de notar que la Ec. (1.26) no depende de la dirección de observación \hat{b} [10].

Entonces, una alteración en la fase debida a una deformación de la superficie puede ser determinada por el producto escalar entre el vector de desplazamiento y el vector de sensibilidad:

$$\Delta\phi(\mathbf{P}) = \vec{d}(\mathbf{P}) \cdot \vec{e}(\mathbf{P}) \quad (1.29)$$

El campo de desplazamiento $\vec{d}(\mathbf{P})$ de un punto $P(x, y, z)$ ubicado sobre el objeto se puede medir de la expresión anterior al evaluar la fase del patrón de franjas y el vector de sensibilidad del sistema óptico.

Error relativo en la medida fuera-de-plano debido al tipo de iluminación

En este capítulo se presenta un análisis del vector de sensibilidad para iluminación oblicua colimada y divergente, para un arreglo fuera-de-plano. Como comúnmente se reporta en la literatura, en el caso de iluminación colimada se hace la consideración de que el vector de sensibilidad es constante cuando el ángulo de iluminación de la muestra es menor a 5° (caso analizado en la sección 1.3.2). Para este caso se analizó la variación de los componentes del vector de sensibilidad mediante la propuesta de un modelo geométrico que permite calcular la posición de las fuentes ubicadas en el plano medio de la lente colimadora y que es aplicable a cualquier ángulo de iluminación. El análisis permitió determinar que la geometría de la configuración óptica utilizada presenta la sensibilidad principal a lo largo de la dirección en la que se aplicó una carga, mientras que las otras dos componentes del vector de sensibilidad eran relativamente pequeñas. Medimos el desplazamiento inducido a lo largo de la dirección de flexión. Los errores en la medición de desplazamiento asociados con la iluminación divergente y colimada se pueden predecir cuando el vector de sensibilidad es considerado

constante. Se presentan resultados experimentales y teóricos para el interferómetro fuera-de-plano. El objeto de prueba es una placa de aluminio.

2.1. Interferómetro FP

Con un interferómetro FP se puede medir el campo de desplazamiento en la dirección z de la superficie. La Figura 6 muestra un interferómetro FP: un láser se divide en dos haces de iluminación (un haz de objeto y un haz de referencia). El haz objeto se dirige luego a la superficie de la muestra, y su haz reflejado se combina con el haz de referencia. La diferencia de fase entre el haz reflejado y el haz de referencia se registra indirectamente a través de la intensidad de un patrón de interferencia correspondiendo a un patrón de moteado. La alteración en la diferencia de fase $\Delta\phi$, antes y después de una carga mecánica está determinada por el producto escalar del vector de desplazamiento $\vec{d}(P)$, y el vector de sensibilidad $\vec{e}(P)$, como lo expresa la Ec. (1.29).

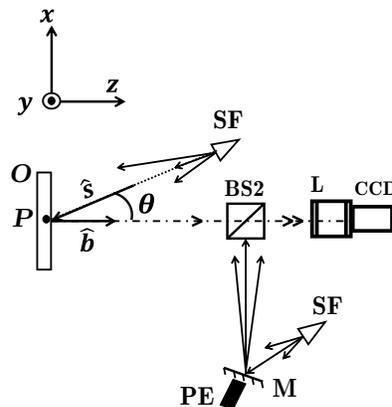


Figura 6. Esquema de interferómetro fuera de plano. \hat{s} : Vector unitario de la iluminación, \hat{b} : Vector unitario en dirección del observador, SF: Filtro espacial, BS2: Cubo divisor de haz, L: Lente, θ : Ángulo de iluminación, O: Objeto.

2.1.1. Análisis del vector de sensibilidad para un haz de iluminación colimada y oblicua

La consideración que se extrae de la Ec. (1.24) en un interferómetro Twyman-Green, conlleva a que la relación entre el desplazamiento y la fase es directamente proporcional. En

Capítulo 2. Error relativo en la medida FP

sistemas FP con iluminación oblicua y colimada, la sensibilidad varía. En el caso de un objeto de grandes dimensiones, la mayoría de interferómetros usan iluminación divergente; por lo tanto la sensibilidad varía de punto a punto, y para obtener el desplazamiento es necesario conocer las posiciones puntuales de la iluminación y observación como lo menciona la literatura [47,51]. Trabajos sobre la variación de la sensibilidad han reportado posibles errores en la medida del desplazamiento asociados a iluminación colimada y divergente. Veuster y otros [44] reportan la variación mediante el cálculo de errores debido a iluminación divergente, y sugieren usar iluminación colimada porque no es necesario conocer el punto de iluminación, el punto de observación y cada uno de los puntos del objeto. Puga y otros [52] presentan un modelo general que predice y corrige errores en un interferómetro FP mediante la introducción de factores analíticos extraídos de un análisis de un arreglo EP. El modelo fue obtenido a partir de una relación entre el vector de sensibilidad para haz divergente y el mismo vector asumido como constante para el caso de iluminación colimada. Albrecht [53] analiza el vector de sensibilidad aplicando un modelo vectorial a los rayos de un haz divergente y a los de un haz colimado. En el segundo caso, asume el vector de sensibilidad como constante. Farrant y otros [54] analizan errores significantes que dependen del uso de iluminación divergente y la consideración del vector unitario de iluminación como constante cuando se considera iluminación constante. Por último, Abdullah y otros en [55] describen un modelo para evaluar un error en mapas de fase cuando se usan iluminación colimada y no-colimada.

En los trabajos arriba referenciados, se ha supuesto como constante el vector de sensibilidad para iluminación colimada. Sin embargo, en esta situación la dirección del vector de sensibilidad cambia punto a punto sobre la superficie del objeto. En esta sección se describe un modelo geométrico que toma en cuenta cada punto de los rayos emergentes de una fuente colimada y los respectivos puntos donde incide cada rayo sobre la superficie del objeto, con el propósito de calcular el vector de sensibilidad respectivo. El objetivo con este modelo es evaluar aquella variación relativa a un haz colimado e incidencia oblicua.

2.1.2. Modelo geométrico

La Figura 7 muestra el caso de un haz colimado a incidencia oblicua. Las componentes del vector de sensibilidad son obtenidas considerando cada punto de una lente colimadora como fuente y su punto correspondiente en la superficie del objeto. Ya que las coordenadas del centro de la lente son conocidas, podemos calcular las coordenadas de cada punto de la lente en función del ángulo de incidencia. Una vez que las coordenadas (x_s, y_s, z_s) son establecidas para cada uno de los puntos de los rayos emergentes de la lente, podemos calcular el vector de sensibilidad usando las Ecs. (1.17)-(1.22) descritas en la sección 1.2.1.

La Figura 7(a) muestra un esquema básico de un arreglo FP con iluminación colimada con ángulo de incidencia θ . La Figura 7(b) muestra una sección ampliada de la Figura 7(a) y deja ver la geometría del haz. Esta geometría ayuda para la obtención de las coordenadas de los puntos en la superficie del objeto correspondientes a los rayos proyectados desde cada punto en la lente. Por claridad se ha tomado la fila $y = 0$ en el objeto para el análisis geométrico. En este caso P_i tiene coordenadas $(0,0,0)$, punto que será iluminado por un rayo que emerge del centro de la lente S_i , con coordenadas calculadas usando la Ec. (2.2).

$\overline{S_i P_i}$ y $\overline{S_{i+1} P_{i+1}}$ representan los rayos que viajan desde la lente hacia los puntos correspondientes en el objeto. El primero emerge desde el punto $S_i(x_s, 0, z_s)$ hacia el punto en el objeto $P_i(x, 0, 0)$, y el segundo va desde $S_{i+1}(x_s - \Delta x_s, 0, z_s + \Delta z_s)$ hasta $P_{i+1}(x - \Delta x, 0, 0)$.

Ahora, $\overline{P_i P_{i+1}}$ puede ser escrito como:

$$\Delta x = \frac{\Delta s}{\cos \theta} = \frac{\Delta x_s / \cos \theta}{\cos \theta} \quad (2.1)$$

Entonces, las coordenadas asociadas a cada uno de los puntos de la lente son dados por:

$$S_{i+1}(x_s \pm \Delta s \cos \theta, 0, z_s + \Delta s \sin \theta), \quad (2.2)$$

y las respectivas coordenadas donde cada rayo incide:

$$P_{i+1} \left(x \mp \frac{\Delta x_s}{\cos^2 \theta}, 0, 0 \right) \quad (2.3)$$

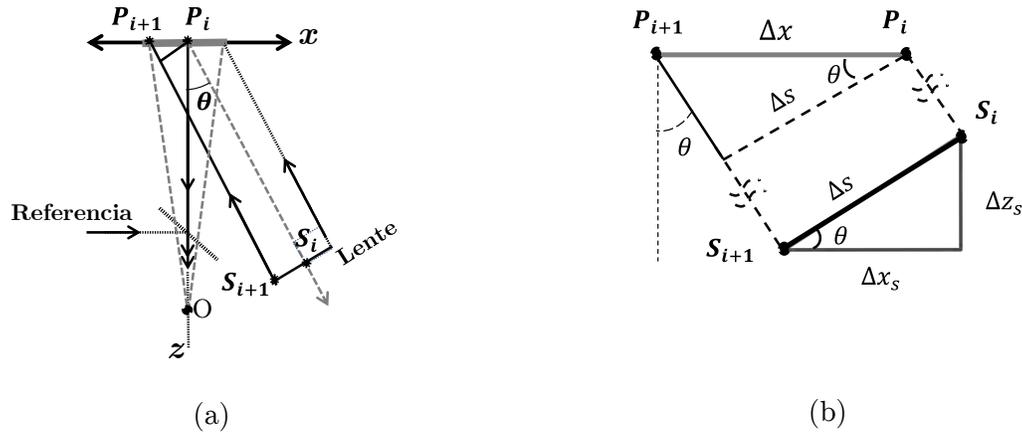


Figura 7. (a) Iluminación colimada a incidencia oblicua. (b) Geometría de haz colimado incidiendo a un ángulo θ .

2.2. Análisis del vector de sensibilidad para iluminación divergente y colimada para un interferómetro con sensibilidad FP

En esta sección se presenta un análisis del vector de sensibilidad para iluminación oblicua divergente y colimada para un arreglo FP. En el caso de iluminación colimada, se consideró la variación del vector de sensibilidad evaluando las coordenadas de posición de las fuentes ubicadas en el plano medio de la lente colimadora, haciendo uso del modelo geométrico descrito en la sección anterior. El uso de este modelo significa una reducción en el error dado que considera la variación del vector de sensibilidad para el caso de iluminación colimada a cualquier ángulo, en lugar de la consideración de una sensibilidad constante regularmente considerada en la literatura. De aquí que, los errores en el desplazamiento asociados a

iluminación colimada y divergente pueden ser calculados, antes de realizar la medida, cuando el vector de sensibilidad se considera como constante.

2.2.1. Arreglo experimental FP

El sistema óptico usado es un arreglo FP el cual usa una fuente divergente para iluminar una placa de aluminio (Figura 8). Debido a este tipo de iluminación, la sensibilidad del sistema tiene una variación del vector de sensibilidad, la cual es tenida en cuenta para calcular el desplazamiento fuera de plano de la placa. El sistema óptico está compuesto por un láser He-Ne (LB) con $\lambda = 632.5$ nm. El láser es direccionado hacia un divisor de haz (BS1) por un espejo (M). Los filtros espaciales (SF) expanden el haz de iluminación y el haz de referencia. La superficie del objeto (O) ubicada en el plano xy es iluminada y capturada por la cámara. El haz de referencia es llevado sobre el eje óptico a través de un cubo divisor (BS2) y a su vez es superpuesto con la imagen de moteado del objeto en el sensor de la cámara. Las imágenes son capturadas por una cámara digital CCD PixelinkTM de 1600×1200 pixeles, 8 bits, y con un tamaño de pixel de $4.4 \mu\text{m}$. Un transductor piezoeléctrico (PE) fue acoplado a un espejo para realizar el corrimiento de fase. De acuerdo al sistema de referencia mostrado en la Figura 8, la ubicación de la fuente es $S(x_s, y_s, z_s) = (9.79 \text{ cm}, 0, 26.90 \text{ cm})$ tal que el ángulo de incidencia medido con respecto al eje z es de 20° , la distancia entre la fuente y la placa es de 28.63 cm . La distancia cámara-objeto es de 45 cm , es decir que las coordenadas asociadas a $O(x_o, y_o, z_o)$ son $(0, 0, 45 \text{ cm})$. Las coordenadas espaciales de los puntos sobre la superficie del espécimen están etiquetados como (x, y, z) .

El origen del sistema de referencia usado para determinar las coordenadas (x, y, z) está localizado en el centro del área iluminada (ROI - Figura 8(a)). La muestra es una placa de aluminio cuya área de interés (ROI) iluminada es de $4.0 \times 3.2 \text{ cm}^2$. La placa con espesor de $t = 1 \text{ cm}$ fue anclada en sus bordes laterales como se muestra en la Figura 8 (a). La muestra está ubicada en el plano xy ; esto quiere decir que por cada punto sobre la superficie, $z = 0$.

La placa fue sometida a flexión mediante una carga aplicada desde la cara posterior en $(0,0,0)$ mediante un tornillo (Sc).

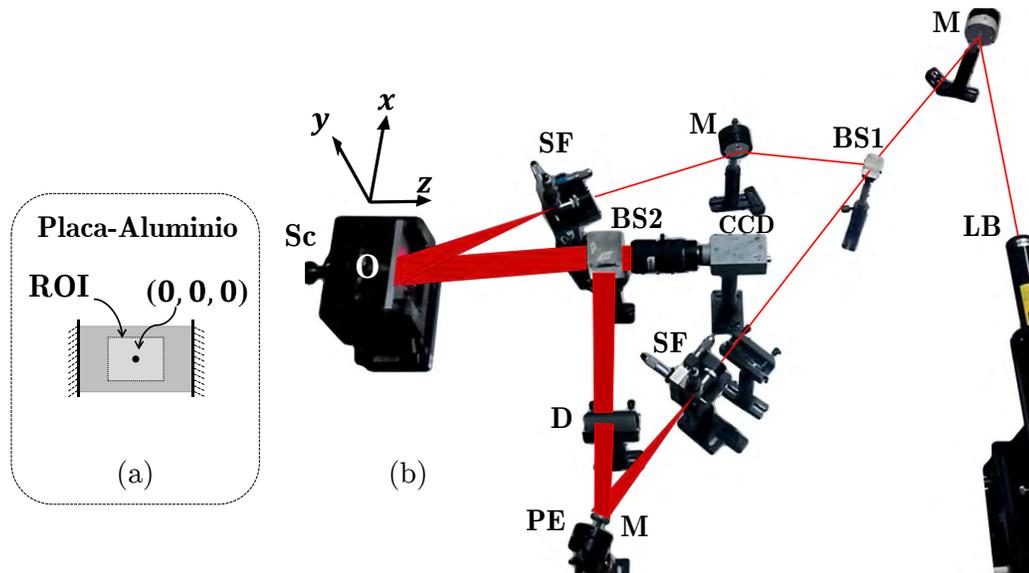


Figura 8. (a) Placa de aluminio anclada en los bordes laterales. $(0,0,0)$ origen del sistema de referencia que coincide con el eje óptico; ROI, regio de interés. (b) Arreglo experimental fuera-de-plano.

2.2.2. Obtención del vector de sensibilidad para iluminación divergente

Usando las Ecs. (1.17) – (1.22) y las características geométricas del arreglo descritas arriba (Figura 8 (b)), las componentes del vector de sensibilidad para iluminación divergente (e_{xd}, e_{yd}, e_{zd}) e incidencia oblicua fueron calculadas y son mostradas en la Figura 9(a)-(c). Las contribuciones de las componentes e_{xd} y e_{yd} (Figura 9 (a), Figura 9 (b)) son relativamente pequeñas en comparación con la contribución de la componente e_{zd} mostrada en la Figura 9 (c).

2.2.3. Obtención del vector de sensibilidad para iluminación oblicua y colimada usando el modelo geométrico

Asumiendo una lente colimadora en la posición de la fuente de iluminación, con un diámetro de 50 mm, y una distancia entre puntos de la lente Δs de 0.05 mm, se calculó la matriz de coordenadas $S(x_s, y_s, z_s)$ para iluminación colimada y la matriz respectiva $P(x, y, 0)$ usando las Ecs (2.2) y (2.3) del modelo geométrico. Para esta lente, el área iluminada sería de $3.2 \times 3.8 \text{ cm}^2$. Las componentes del vector de sensibilidad asociado a esta iluminación colimada fueron calculadas usando las Ecs. (1.17)-(1.22) y son mostradas en la Figura 9(d)-(f). Se puede observar que las contribuciones de las componentes e_{xc} y e_{yc} (Figura 9(d) and Figura 9(e)) en el vector de sensibilidad son pequeñas en comparación con la componente e_{zc} (Figura 9(f)).

Cuando no se considera la asociación punto a punto entre la lente colimadora y el objeto, la componente e_z del vector de sensibilidad para este tipo de iluminación puede ser asumida como constante e_{za} como se muestra en la Figura 10. El error en el campo de desplazamiento es calculado en el supuesto de que las componentes e_{zc} y e_{zd} son constantes.

2.2.4. Evaluación de error porcentual en la medida del campo de desplazamiento

El error en la evaluación del campo de desplazamiento $w(x, y)$ cuando se tiene iluminación divergente y que tiene que ser considerada la variación de las componentes del vector de sensibilidad con respecto la suposición de que éstas son constantes, es dado por la siguiente ecuación:

$$E = \left| \frac{w - w_a}{w_a} \right| * 100, \quad (2.4)$$

Capítulo 2. Error relativo en la medida FP

donde w es el desplazamiento calculado considerando la variación de la componente e_z y w_a es el desplazamiento calculado cuando la componente e_{za} es supuesta constante.

Ya que las componentes transversales del vector de sensibilidad e_x y e_y son relativamente pequeñas, ver Figura 9, el desplazamiento FP puede ser evaluado por:

$$w = \frac{\Delta\phi}{e_z} \quad (2.5)$$

Entonces, introduciendo la Ec. (2.5) en la Ec. (2.4), el error puede ser expresado en términos de la componente z del vector de sensibilidad como:

$$E = \left| \frac{e_{za} - e_z}{e_z} \right| * 100, \quad (2.6)$$

donde e_{za} es la componente z del vector de sensibilidad supuesta como constante, y e_z es la componente z del vector de sensibilidad no constante.

La Ec. (2.6) permite estimar el error en un desplazamiento FP a partir del error asociado a la componente z del vector de sensibilidad. Ya que la evaluación en el error de la medida puede ser calculada en términos del vector de sensibilidad, dos errores relativos se calcularon usando la Ec. (2.6): un error asociado a iluminación divergente (componente e_{zd}) y un error asociado a iluminación colimada (componente e_{zc}). Cada error es relativo a la suposición de e_{za} como constante. El mapa e_{zd} (Figura 9(c)) describe una variación más alta que la del mapa e_{zc} en la Figura 9(f).

El máximo error relativo (E) debido a la variación del vector de sensibilidad para el caso de frente de onda con curvatura y un vector de sensibilidad constante, es de 4.30 %, Figura 11(a). En el caso de iluminación colimada, analizado con el modelo, y el vector de sensibilidad constante, el máximo error relativo es 3.41 %, Figura 11 (b).

La Figura 9(a)-(c) muestra las componentes del vector de sensibilidad del interferómetro mostrado en la Figura 8 en cada punto del área iluminada; estas componentes fueron evaluados con las Ecs. (1.17)-(1.27). Se puede observar que la componente con mayor

Capítulo 2. Error relativo en la medida FP

sensibilidad de este interferómetro corresponde a la componente z , mientras que las otras dos componentes presentan valores relativamente pequeños.

La Figura 12(a) muestra el patrón de franjas obtenido al aplicar carga con el tornillo (Sc) para flexionar la muestra anclada.

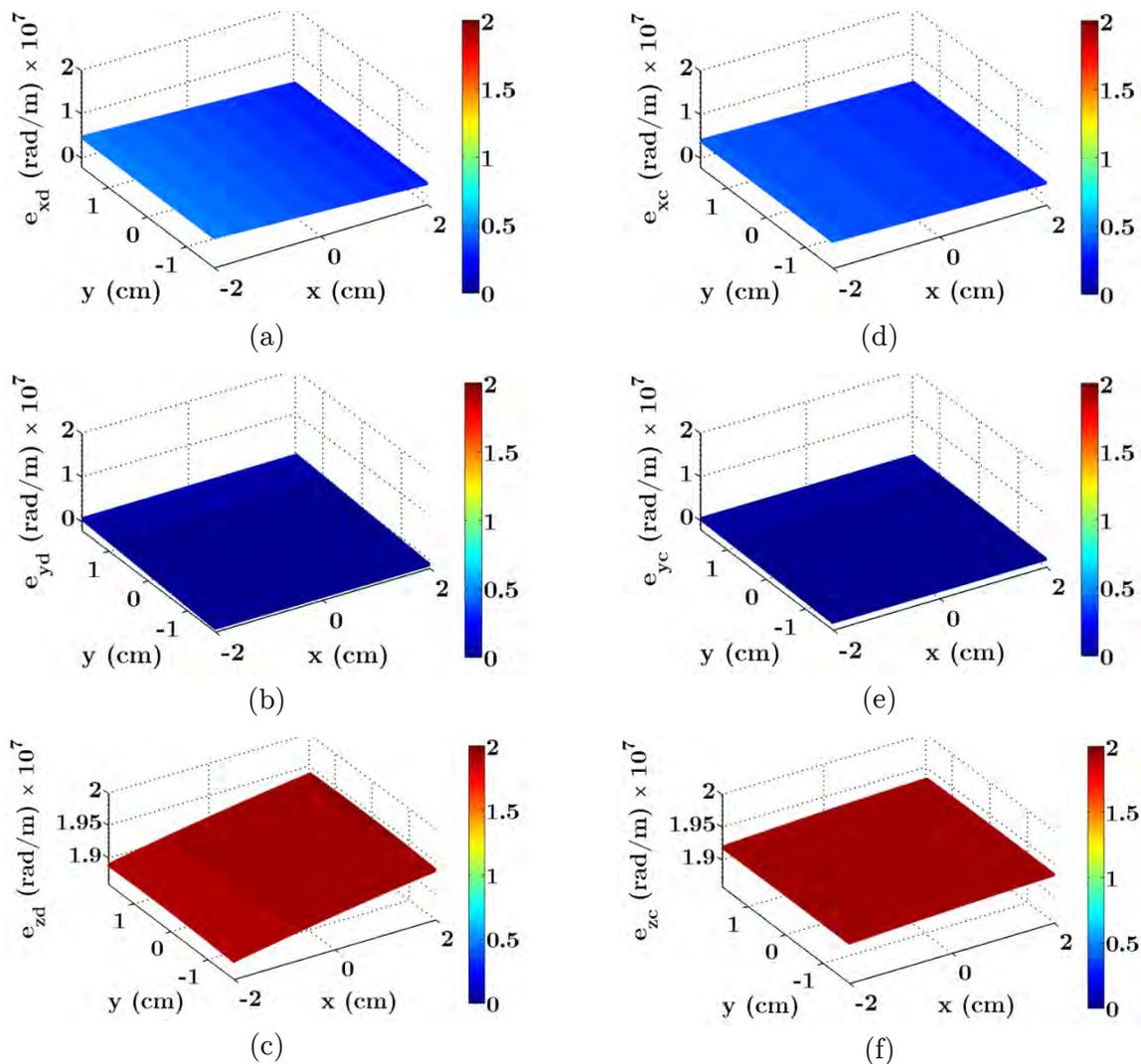


Figura 9 Componentes del vector de sensibilidad para iluminación divergente e incidencia oblicua: (a) e_{xd} , (b) e_{yd} , y (c) e_{zd} . Componentes del vector de sensibilidad para iluminación colimada: (d) e_{xc} , (e) e_{yc} , y (f) e_{zc} .

Capítulo 2. Error relativo en la medida FP

De acuerdo a las dimensiones del patrón mostrado en la Figura 12(a), el punto de carga se encuentra sobre el eje óptico en el punto $(x = 0, y = 0)$. La Figura 12(b) describe el mapa inducido w a lo largo de la dirección de carga aplicada y calculado con la Ec. (2.5). Entonces los errores relativos (E) en el desplazamiento w debido a iluminación divergente y colimada respectivamente, cuando el vector de sensibilidad es asumido constante, son mostrados en Figura 11.

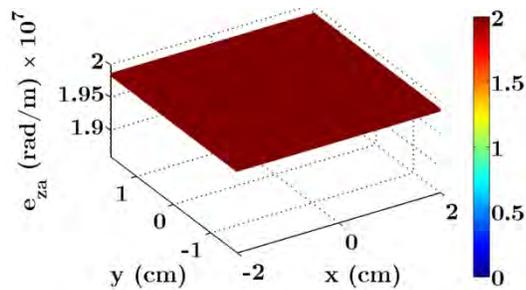


Figura 10. Componente aproximada e_{za} del vector de sensibilidad para el caso constante para iluminación colimada.

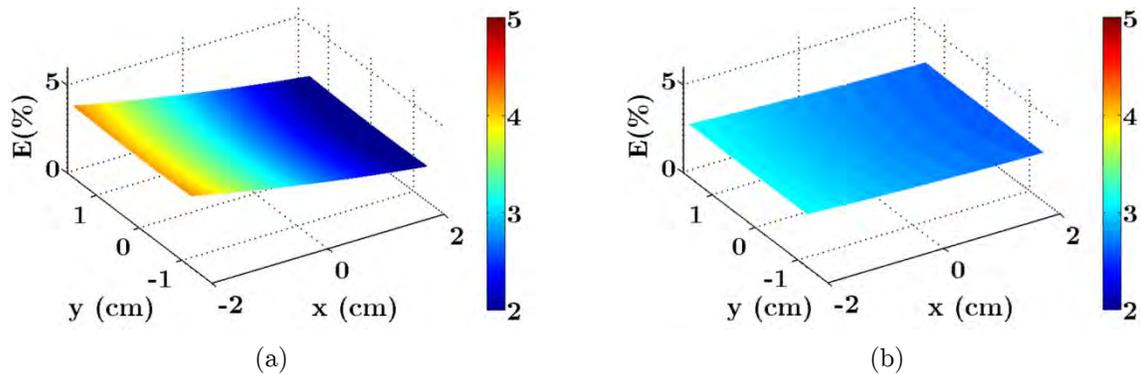


Figura 11. Mapas de error para la consideración de que la componente e_z es constante cuando es usada (a) iluminación divergente o (b) iluminación colimada.

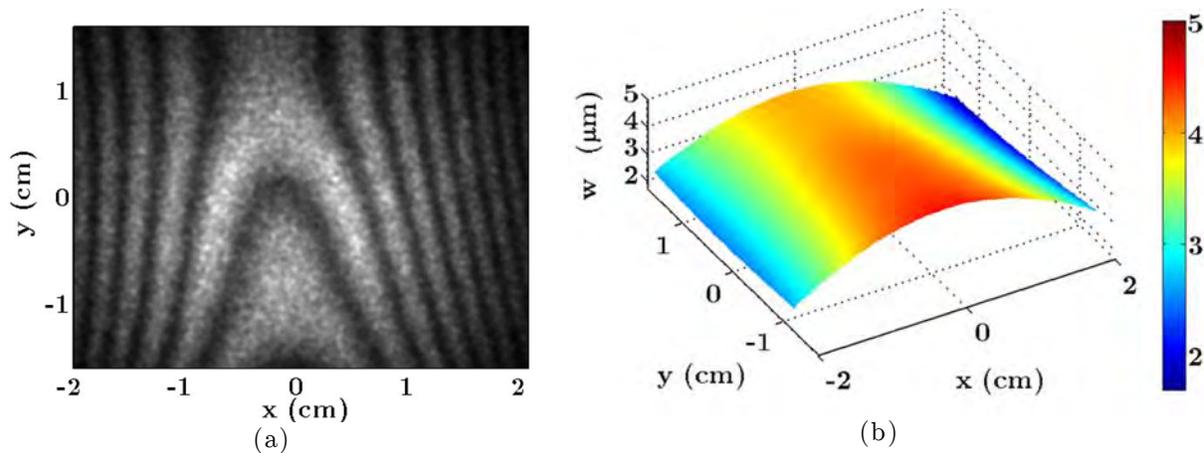


Figura 12. (a) Interferograma obtenido después de aplicar la carga. (b) Mapa de desplazamiento w .

2.2.5. Conclusión

Se analizó el uso de iluminación divergente y la suposición del uso de iluminación colimada en un interferómetro fuera-de-plano. Respecto a iluminación colimada, se propone un modelo geométrico para calcular las coordenadas de las fuentes ubicadas en el plano medio de la lente colimadora, coordenadas usadas en el cálculo del vector de sensibilidad. Se calculó el error en la medición del campo de desplazamiento fuera de plano suponiendo que no existe variación en la componente del vector de sensibilidad e_z , es decir, se considera un valor constante tanto para iluminación divergente y colimada. Para arreglos que usan iluminación colimada, la suposición del vector de sensibilidad constante introduce un error más pequeño en la medida del campo de desplazamiento que los sistemas que usan iluminación divergente pero con la misma suposición. El análisis de la variación del vector de sensibilidad debido a iluminación esférica, es importante en la etapa de planteamiento experimental de una medida interferométrica para minimizar el error en la componente de desplazamiento requerida.

Uso de un interferómetro con sensibilidad en plano para la medición del módulo de Young de una membrana de ácido poliláctico reforzada con nanocristales de celulosa (PLA-NC)

En este capítulo se presenta la caracterización mecánica en campo completo de una muestra no-homogénea de un biopolímero sometida a tracción. La caracterización mecánica se realizó con un interferómetro ESPI con sensibilidad en plano (EP). La muestra es sujeta a tensión axial a lo largo de la dirección “ y ”. Se capturaron secuencialmente patrones de moteado para 1360 desplazamientos continuos del sistema de tracción. Mapas de desplazamiento y sus correspondientes mapas de esfuerzo fueron calculados para cada estado de desplazamiento. Ya que el tamaño de los mapas cambia por la elongación de la misma muestra debido a que ésta es traccionada desde su parte superior, mientras es anclada en la parte inferior, se presenta un método de escalamiento para relacionar todos los mapas punto a punto. El método permite la evaluación correcta de los mapas de esfuerzo que describen la evolución mecánica de la probeta. Al lograr relacionar los mapas de esfuerzo, es posible extraer valores locales de esfuerzo en zonas de interés con el propósito de construir curvas de

esfuerzo-deformación. Tres curvas de esfuerzo-deformación asociadas con tres zonas de la muestra (superior, media e inferior) se construyeron. Las curvas y sus respectivos módulos de elasticidad calculados ($E_S = 2.59$ MPa, $E_M = 1.97$ MPa y $E_I = 1.67$ MPa) dan cuenta del comportamiento no lineal de la muestra de biopolímero. Los resultados mencionados muestran que la técnica EP en conjunto con el método de escalamiento, es una novedosa propuesta para caracterizar materiales no-homogéneos.

3.1. Muestra de biopolímero reforzado

La muestra fue proporcionada por la Universidad de Bío Bío, Chile. Los detalles de su fabricación, tales como la preparación de la solución usando ácido poliláctico (PLA) comercial (Natureworks [®] 2002D), proporción de composición de la solución de PLA reforzado con nanocristales de celulosa (NC), y el método de fabricación, son reportados por Gaitán y Gacitúa en [56,57].

En este trabajo, la muestra adquirida es tipo film basada en PLA reforzado con NC extraídos de Chusquea quila. La muestra fue fabricada mediante electrospinning con el instrumento INOVENSO NE-300, en configuración vertical ascendente [56].

La jeringa del instrumento fue cargada con una solución de 12 mL, donde el 12% correspondía a PLA, 3% a NC y 85% a solvente de cloroformo/acetona. El flujo de solución aplicado con la jeringa se estimó en 0.2 mL/h. La distancia entre el inyector y el colector fue de 20 mm, y el voltaje usado fue de 24 kV [56]. De acuerdo con las características de fabricación, la membrana de interés estaba compuesta por microfibras. La Figura 13 muestra imágenes obtenidas con microscopio electrónico de barrido (SEM) de la distribución de las microfibras de PLA reforzadas con NC de una región de interés de 13×10 mm², antes (Figura 13(a)) y después (Figura 13(b)) de aplicar una tracción ascendente hasta alcanzar fractura (Figura 13 *). En la parte superior de la Figura 13 se muestran dos patrones de moteado pertenecientes al estado inicial *A* y el estado final *F*. Estos dos estados

corresponden. La carga fue aplicada a una temperatura ambiente de 24°C . Las imágenes SEM en la Figura 13(b) muestran un alineamiento parcial de las microfibras cercano a la fractura (*), producido en la zona inferior de la muestra. La distribución aleatoria de las fibras dificulta estimar zonas débiles de la membrana.

La fabricación de este material tiene por objetivo proponer un nuevo material amigable con el medio ambiente para la industria del empaque [56,57].

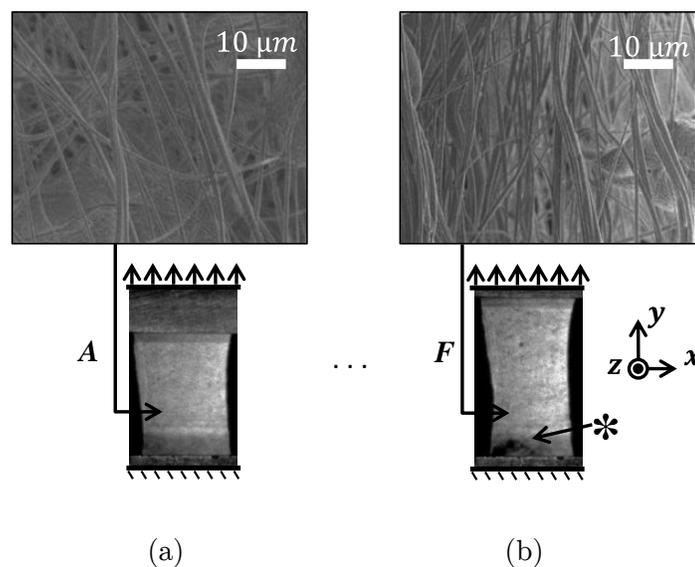


Figura 13. Muestra tipo film (a) antes y (b) después de aplicarse la carga (*: zona de fractura); (superior) imágenes SEM de las microfibras de la muestra. *A* y *F* son los estados inicial y final de los seis estados.

3.2. Prueba óptica

La Figura 14 muestra el sistema óptico EP implementado. La fuente de iluminación corresponde a un láser He-Ne (*L*) de una longitud de onda de 632.5 nm. El haz de luz es expandido usando un objetivo de microscopio (MO) y así tener una fuente de iluminación divergente cuya luz se dirige hacia un divisor de haz (*BS*). Los haces reflejado y transmitido son direccionados hacia el plano objeto por medio de los dos espejos *M1* y *M2*. El ángulo de iluminación del objeto corresponde a $\theta = 11^{\circ}$ medido respecto al eje óptico. El espejo *M2*

tiene acoplado un transductor piezoeléctrico Thorlabs AE0505D08 con el propósito de aplicar corrimiento de fase.

El sistema de tracción está ubicado paralelo al eje y ; de ahí que la muestra fue traccionada a lo largo del eje y y anclada en su parte inferior.

De acuerdo a la Ec. (1.27), debido a que los haces incidente viajan sobre el plano $y-z$, a un ángulo de incidencia θ , este tipo de geometría conlleva a una máxima sensibilidad en la componente e_y (EP) [58], mientras que las componentes e_x y e_z tienen un valor que se aproxima a cero. Por lo tanto, de acuerdo a la Ec. (1.29), el campo de desplazamiento en la dirección y puede ser calculado como

$$v = \frac{\Delta\varphi}{e_y} \quad (3.1)$$

El sistema de tracción (PS) implementado se compone de un módulo de desplazamiento con su respectivo sensor de desplazamiento (Thorlabs - MTS50-Z8) y una celda de carga (LS) Futek LSB20. Una cámara Pixelink PL-B741F (CMOS sensor, $1280H \times 1024V$) fue usada para capturar los patrones de moteado. Mientras la prueba óptica seguía la tracción del biopolímero, las medidas de los sensores de carga y desplazamiento del PS fueron tomados en cuenta para construir la curva de esfuerzo-deformación considerada como la curva de referencia (RC).

La prueba óptica EP consistió en obtener un paquete de tres patrones de moteado (corrimiento de fase de tres pasos) por cada desplazamiento de $3 \mu\text{m}$ de la mordaza superior del PS . Cada paquete es usado para calcular la diferencia de fase asociado al desplazamiento de la superficie de la muestra. El último estado evaluado se dio después de que la probeta llega a la fractura, la cual es observada después de un desplazamiento de la mordaza de $4080 \mu\text{m}$ que corresponden a 1360 estados evaluados.

Usando la Ec. (1.27) se calculó la componente e_y del vector de sensibilidad para una área iluminada de $18 \times 10 \text{ mm}^2$ en el plano objeto. La distancia radial de cada fuente hasta el plano objeto fue de 970 mm.

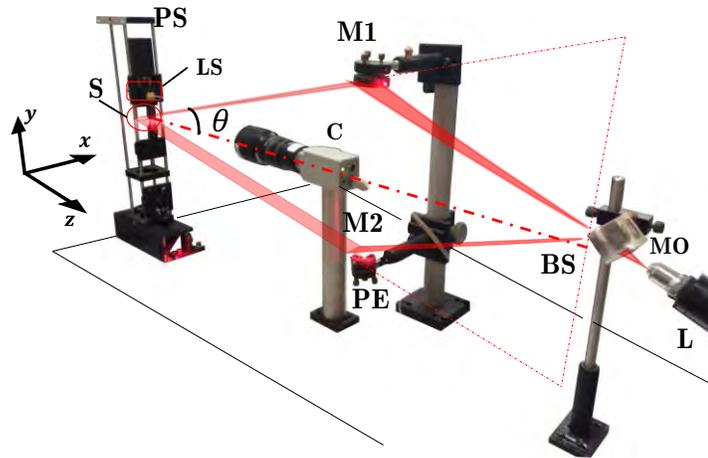


Figura 14. Arreglo experimental en-plano: L, láser; MO, objetivo de microscopio; BS: cubo divisor; M1, espejo; M2-PE, espejo con transductor piezo-electrico; C, cámara con sensor CMOS Pixelink-B741F; PS, sistema de tracción; LS, sensor de carga; S, muestra; θ , ángulo de iluminación.

La Figura 15 muestra una curva de carga-desplazamiento construida usando los sensores de carga y de desplazamiento del sistema de tracción, y muestra los mapas de distribución de fase correspondientes a los seis estados (A a F) de la curva. Los mapas de fase muestran cómo la membrana sufrió fractura en la zona izquierda inferior.

3.3. Seguimiento de la evolución mecánica

3.3.1. Distribución de información en los mapas de desplazamiento v

Un mapa de fase de cualquier estado n puede ser obtenido tomando un patrón de moteado de cualquier paquete de tres patrones del estado previo $n - 1$ como referencia. Ya que un mapa de fase es obtenido con respecto al último estado, y la Ec. (3.1) relaciona el desplazamiento v con la fase $\Delta\phi$, entonces, un mapa de desplazamiento representa una

medida en relación al estado anterior. Usando la Ec. (3.1), los 1360 mapas de desplazamiento v fueron calculados.

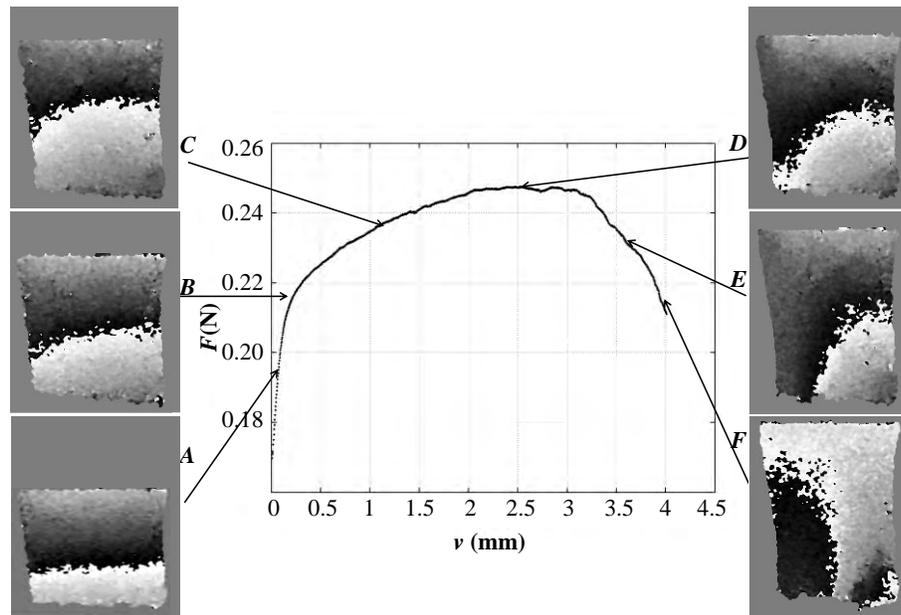


Figura 15. Mapas de fase de la muestra en seis diferentes estados $A-F$ correspondientes a etapas de la curva de carga vs desplazamiento. Los valores de carga y de desplazamiento v fueron obtenidos mediante los respectivos sensores del sistema de tracción.

Como se puede apreciar en la Figura 15, la elongación de la muestra durante el ensayo de tensión, provoca que la distribución de la información de desplazamiento difiera en la misma manera entre mapas. La Figura 16 muestra tal diferencia de dimensiones entre dos mapas obtenidos (Figura 16(a) y Figura 16(b)). En la Figura 16(a) la cual muestra un mapa v , su mapa de colores da cuenta del desplazamiento en toda la muestra obedeciendo al desplazamiento de $3 \mu\text{m}$ aplicado con el sistema de tracción. Asumimos que los ejes en el plano representan la malla donde está distribuida la información del mapa de desplazamiento. El tamaño de la malla corresponde al tamaño de imagen ($750 \text{ pixel} \times 600 \text{ pixel} - 1 \text{ pixel} = 20 \mu\text{m}^2$). En la Figura 16 se muestran mallas con baja resolución ($5 \text{ filas} \times 4 \text{ columnas}$). La resolución ha sido tomada en cuenta como un ejemplo para describir la diferencia entre mapas. La diferencia en cómo la información está distribuida implican que

los mapas de desplazamiento no pueden ser relacionados punto a punto entre ellos mismos. Por ejemplo, la Figura 16(a) muestra el mapa de desplazamiento del estado 50 con su información distribuida en una malla de 4(filas) \times 4 (columnas), mientras la Figura 16(b) muestra el mapa del estado 60 sobre una malla de 5 (filas) \times 4 (columnas). Entre ellas, no es posible relacionar respectivamente los puntos marcados porque el primero punto está ubicado en (4^a fila, 1^{er} columna) en la Figura 16(a), y el punto correspondiente en (5^a fila, 1^{er} columna) en la Figura 16(b).

El objetivo es relacionar cada mapa de desplazamiento con el propósito de darle seguimiento al comportamiento mecánico de la muestra completa. La Figura 16(c) muestra la información del mapa de desplazamiento del estado 60, mostrado en la Figura 16(b), escalado en una malla de 4(filas) \times 4 (columnas). El escalamiento permite relacionar los puntos en (4^a fila, 1^{er} columna) entre la Figura 16(a) y la Figura 16(b) directamente. Todos los mapas de desplazamiento v fueron escalados en el tamaño de la malla inicial $x_o \times y_o$, la cual representa las dimensiones iniciales de la muestra. Una vez realizado el escalamiento, a partir del análisis de los mapas v y los respectivos mapas de deformación, curvas de esfuerzo-deformación de zonas de interés se pueden construir. En la siguiente sección se describirá la construcción de tres curvas y su comparación con la curva de referencia construida con los sensores de carga y desplazamiento.

3.3.2. Escalamiento de mapas de desplazamiento y mapas de esfuerzo relacionados

La Figura 16 muestra el escalamiento aplicado en la dirección y para un mapa de desplazamiento v . El método de escalamiento consiste en interpolar el mapa v a lo largo de cada columna en la malla cuyos valores son mayores que cero. Con esto se logra obtener información del comportamiento de v sobre y . Entonces, esta información es distribuida sobre

una nueva malla de tamaño $x_o \times y_o$, donde x_o y y_o son las dimensiones iniciales horizontal y vertical de la muestra.

La siguiente expresión describe la aproximación De Boor's [59] que fue usada para interpolar cada columna de v ($v(col)$), es decir, para interpolar a lo largo de y ,

$$p \sum_i^n \left(\frac{y_i - \hat{f}(v(col)_i)}{\delta} \right)^2 + (1 - p) \int (\hat{f}^{(2)}(v(col)))^2 dx, \quad (3.2)$$

donde p es el factor de suavizado considerado como 1 de tal forma que \hat{f} converge siguiendo el comportamiento de la información de la columna $v(col) > 0$ sin modificar esta información; n es el tamaño del vector columna $v(col)$; y_i es el número de entradas de la columna $v(col) > 0$; δ es 1 y representa el grado de suavizado; $\hat{f}^{(2)}$ denota la segunda derivada de la función 'spline'.

Una vez se conoce el comportamiento de v mediante la interpolación, la dimensión y se escala a la dimensión inicial y_o usando un factor a . Este proceso interpolación-escalamiento permite que la información v se distribuya sobre una malla con dimensiones iniciales como sigue:

$$v(x_o, y_o) = v(x_o, ay), \quad (3.3)$$

donde el factor a es

$$a = \frac{\text{dimensión}(y_o) \forall v_o(col) > 0}{\text{dimensión}(y) \forall v(col) > 0}, \quad (3.4)$$

y v_o es el mapa de desplazamiento en el estado cero; $v_o(col) > 0$ se refiere a considerar solo los valores de una columna de v que contiene información del desplazamiento.

En la Figura 17 se muestran perfiles del estado 50 (línea en color gris), del estado no escalado 60 (línea gruesa en color negro) y del escalado del estado 60 (línea delgada en color negro). La información del estado no escalado 60, la cual está distribuida en 5 filas (perfil en

negrilla), termina escalada en 4 filas (perfil en negro). El escalamiento incluye distribuir los datos en 4 filas, como lo está el perfil de referencia tomado del estado 50, y sin modificar el comportamiento de los datos mismos. Entonces, el perfil escalado del estado 60 se puede relacionar directamente con el perfil del estado 50. Esto conlleva a que es posible relacionar punto a punto los mapas v .

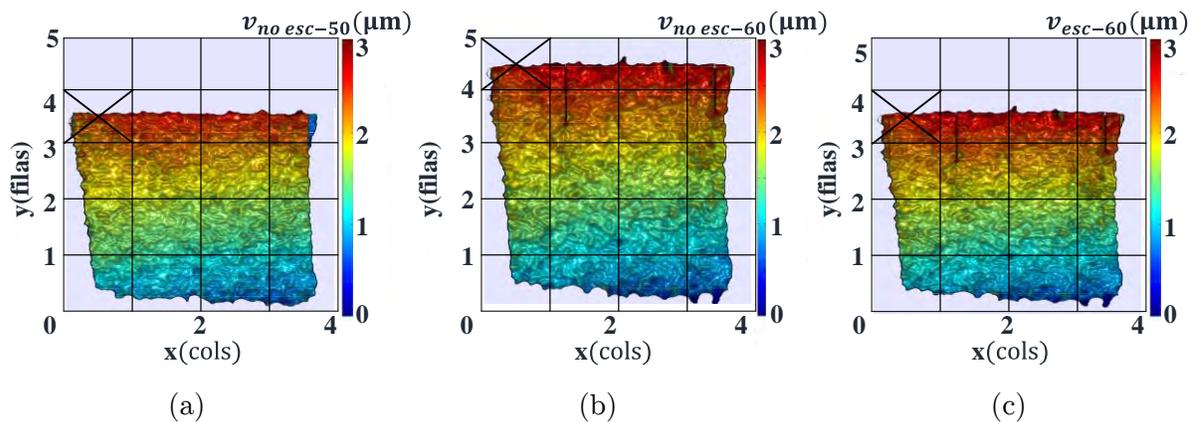


Figura 16. Mapas de desplazamiento no correlacionados con información distribuida en diferente tamaño de malla: (a) mapa de desplazamiento no escalado del estado 50, (b) mapa de desplazamiento no escalado del estado 60. (c) mapa escalado del estado 60 con información distribuida en tamaño de malla similar al del estado 50.

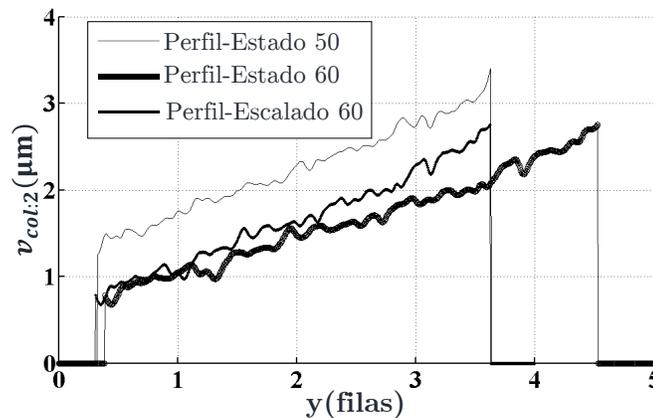


Figura 17. Perfiles del mapa-50 no escalado (gris), del mapa-60 no escalado (negrilla), y del mapa-escalado-60 (negro).

Los mapas de desplazamiento se escalaron de acuerdo con la malla del primer mapa que representa las dimensiones iniciales del biopolímero estudiado. Para estos mapas, se

calcularon los mapas respectivos de deformación. Mediante la sumatoria de los mapas escalados, se puede determinar la evolución del mapa de desplazamiento.

La Figura 18(A - F) muestra seis estados del mapa de desplazamiento y de su respectivo mapa de deformación. En estado de ruptura, la curvatura de la fase (Figura 15) describe una

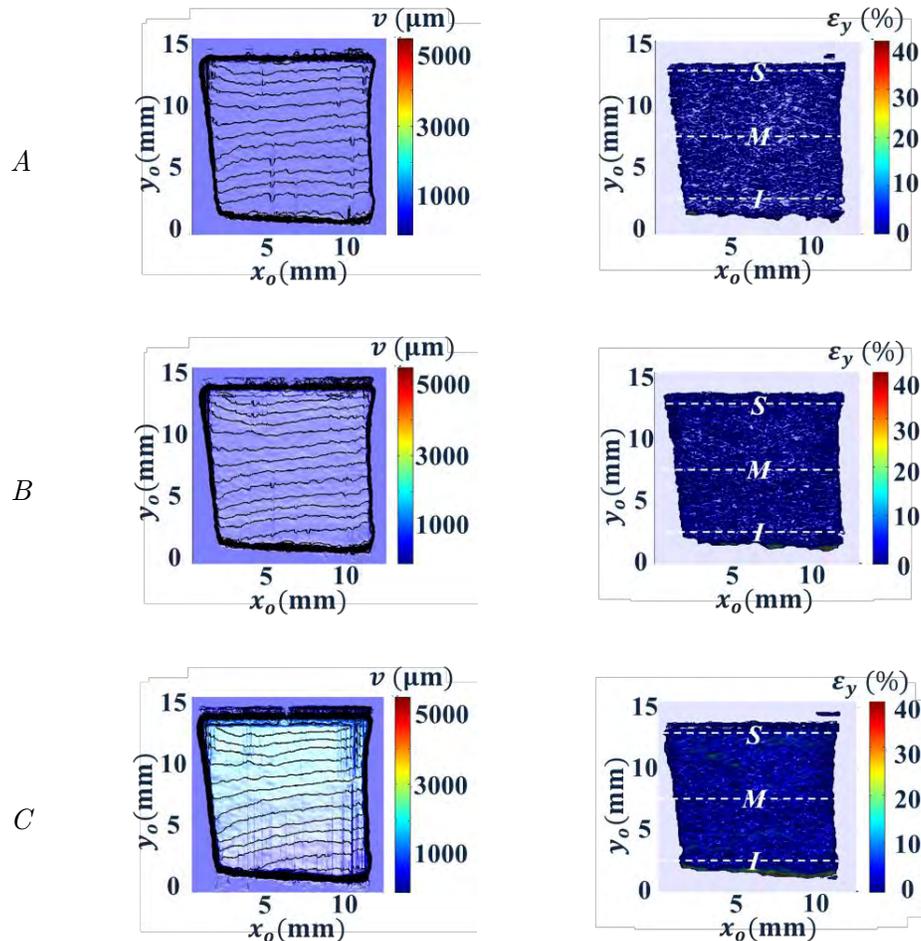


Figura 18. Mapas de desplazamiento (v) y de deformación (ϵ_y) maps para los seis estados: A - F. Zonas en los mapas de deformación consideradas para construir las respectivas curvas de esfuerzo-deformación: Superior ($S - y_o = 13.6 \text{ mm}$), Media ($M - y_o = 7.4 \text{ mm}$) e Inferior ($I - y_o = 2.8 \text{ mm}$). (Visualización 1: video sobre la evolución de la muestra mediante la evolución de todos los mapas relacionados y curvas de esfuerzo--deformación).

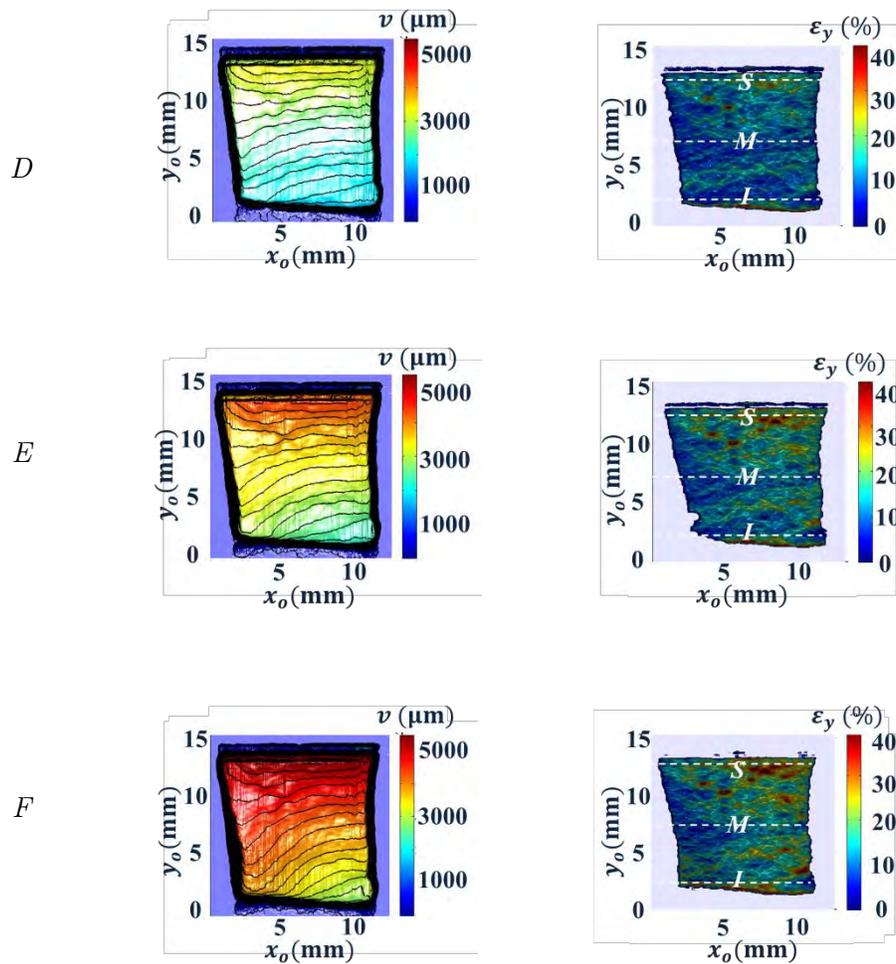


Figura 18. Continuación.

región de la muestra no sujeta (naranja en el mapa v – Figura 18F) debido a la fractura ocurrida en la zona izquierda inferior. Más aun, el mapa de color de este mapa de desplazamiento muestra una variación de color desde la zona derecha sujeta (verde) hasta la zona superior en rojo sujeta por la mordaza móvil; al mismo tiempo, el mapa de deformación describe zonas de esfuerzo. La Figura 19(I– IV) muestra cuatro curvas de esfuerzo-deformación cuyos valores de esfuerzo se calcularon usando los registros del sensor de carga y considerando el área transversal como constante ($10 \times 0.18 \text{ mm}^2$). Las curvas en la Figura 19 (II–IV – superior S, media M e inferior I) se construyeron con los mismos valores de esfuerzo adquiridos con el sistema de tracción y usados para construir la curva RC,

mientras que los valores de deformación se extrajeron de las zonas de interés en los mapas respectivos de deformación. Estas curvas (Figura 19II-IV) corresponden: al valor promedio de los vectores filas en la zona superior ($y_o = 13.6$ mm) de los mapas de esfuerzo (Figura 19II – curva roja), a los vectores promediados de la zona media ($y_o = 7.4$ mm) de los mapas de esfuerzo (Figura 19III – curva verde), y a los vectores promediados en la zona inferior ($y_o = 2.8$ mm) de los mapas de esfuerzo (Figura 19IV – curva azul).

La quinta curva en la Figura 19V corresponde a la superposición y alineación de las cuatro curvas descritas. En la Figura 19V(derecha) se muestra una zona ampliada de las curvas en lo que se podría denominar como la región elástica. Se puede observar una cercanía entre las zonas elásticas de las curvas; no obstante, esta ampliación deja ver diferencias en longitud e inclinación de estas regiones elásticas. Inclusive, la región elástica de la curva inferior (azul) presenta un desplazamiento sobre el eje ϵ_y y una variación de la pendiente en comparación con la curva RC, superior y media. Esta variación se puede asociar a que la muestra desde un principio presentaba debilidad estructural en esa zona inferior.

De acuerdo al estándar ASTM, se espera que una fractura ocurra ya sea en la zona superior o inferior para una muestra tipo film. Los mapas ν muestran la fractura en la zona inferior. La curva correspondiente a esta zona muestra que la alcanzó una deformación por encima del 100%, y que el valor del módulo de elasticidad es menor que el de las otras curvas. Dado que la zona superior es cercana a la mordaza móvil, el módulo de Young de la curva RC (2.46 MPa) y el de la curva S (2.57 MPa) tienen valores aproximados. Los valores representan la elasticidad de la muestra evaluada de PLA reforzada con NC de *Chusquea* con un espesor de 0.18 mm.

Algunas investigaciones han reportado módulos de elasticidad dentro de un rango de 1.11 GPa - 1.67 GPa [60] para PLA reforzado con celulosa de algodón y un espesor de la muestra de ~ 1.10 mm, así como valores entre 0.2 GPa - 3.4 GPa [61] para compuestos con espesor de ~ 0.30 mm.

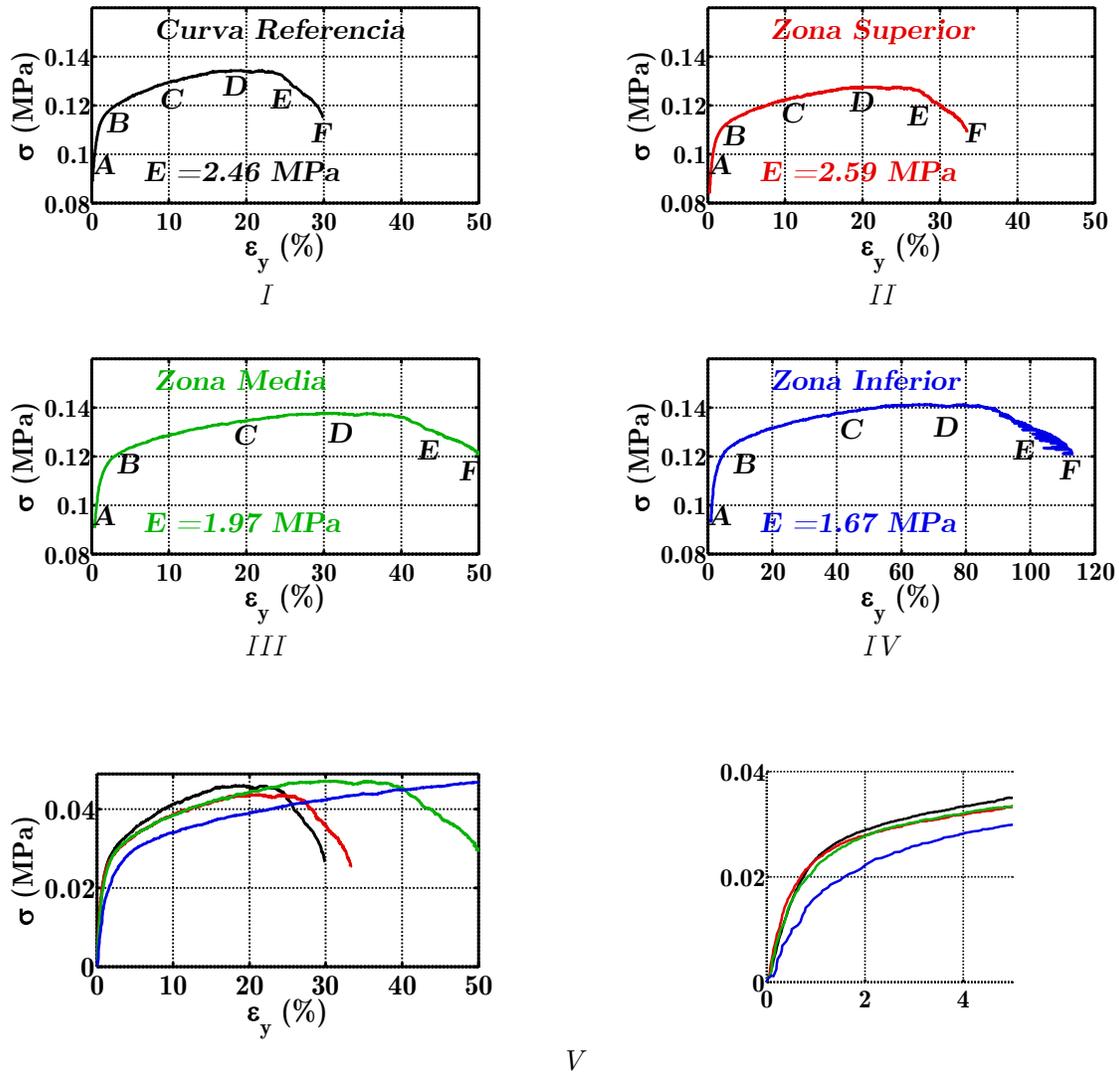


Figura 19. Curvas de esfuerzo-deformación para: (I) curva de referencia, (II) curva asociada a la zona superior ($S - y_o = 13.6 \text{ mm}$) de los mapas de deformación, (III) curva asociada a la zona media ($M - y_o = 7.4 \text{ mm}$) de los mapas de deformación, (IV) curva asociada a la zona inferior ($I - y_o = 2.8 \text{ mm}$) de los mapas de deformación, y (V) superposición de curvas y amplificación. (Visualización 1: de la evolución de los mapas de fase, desplazamiento, deformación y curvas de esfuerzo-deformación).

Por otro lado, los módulos asociados a la zona media e inferior son diferentes porque la respuesta mecánica cambia dependiendo de si la estructura es débil o resistente. Ya que la curva S obtenida mediante ESPI y la curva RC tienen comportamiento similar y una diferencia entre sus módulos de elasticidad de 0.11 MPa , la técnica en conjunto con el método

de escalamiento puede ser considerado para medir el comportamiento elástico de muestras tipo film. Además, es posible visualizar dónde se presentan zonas de esfuerzo.

3.4. Conclusión

La industria del empaque está demandando nuevos materiales basados en compuestos amigables con el medio ambiente. Para satisfacer esta necesidad, se está considerando fibras extraídas de celulosa como una opción para fabricación de nuevos materiales. Algunos materiales se están fabricando con técnicas que involucran deposición aleatoria de microfibras. Tal deposición implica un comportamiento mecánico aleatorio del material; por lo tanto, los materiales deberían ser evaluados con técnicas de campo completo que permiten medir diferentes comportamientos mecánicos de diferentes zonas del material. En este capítulo, se estudió el comportamiento mecánico mediante un interferómetro en-plano y correlacionando los puntos correctos de los mapas del campo de desplazamiento mediante su escalamiento; este trabajo representa el primer reporte que considera esta corrección. Ya que los mapas de deformación obedecen a los mapas de desplazamiento, se obtuvieron mapas de deformación consecutivos de los que se extrajeron valores para construir tres curvas de esfuerzo-deformación. A partir de estas curvas, se obtuvieron respectivamente tres diferentes módulos de elasticidad ($E_S = 2.59$ MPa, $E_M = 1.97$ MPa y $E_I = 1.67$ MPa). Los módulos de elasticidad, los mapas de desplazamiento y las curvas de esfuerzo-deformación obtenidas, describen cómo el comportamiento mecánico es diferente a lo largo de la muestra. Estos resultados muestran a la técnica de ESPI como una técnica óptica de campo completo que en conjunto con el método de escalamiento propuesto, resulta importante su aplicación en el estudio de la elasticidad de materiales no homogéneos.

Corrimiento de fase simultáneo en ESPI fuera de plano

En este capítulo se describe un método de corrimiento de fase simultáneo de dos pasos. El corrimiento es aplicado mediante modulación por polarización. La obtención de dos patrones con corrimiento de fase se logra mediante un arreglo replicador basado en una configuración de Michelson. Resultados de corrimiento de fase manual para dos pasos en un interferómetro FP y de corrimiento simultáneo con un FP son descritos en la sección 4.4 y 4.5 respectivamente.

4.1. Corrimiento de fase mediante polarización

Para obtener la fase asociada a la deformación, se aplica la técnica corrimiento de fase. Comúnmente, la técnica se lleva cabo experimentalmente mediante un transductor piezo eléctrico cuya función es modificar el camino óptico de uno de los dos haces.

En ESPI se han presentado técnicas de corrimiento de fase de cuatro pasos mediante polarización para la obtención de distribución de fase envuelta [34], arreglos ópticos compuestos por sistemas de doble lentes para obtener el *shear* asociado a la deformación de una muestra [35], y compuestos por cubos divisores polarizados y polarizadores motorizados para corrimientos de fase de cuatro pasos [62].

El corrimiento de fase mediante polarización para un interferómetro FP tiene dos características principales: la primera se refiere a que el interferómetro requiere que el haz referencia y el haz objeto presenten estados de polarización linealmente ortogonales entre ellos; y la segunda que el corrimiento de fase es controlado por el ángulo de polarización de los componentes. Adicionalmente, en ESPI con modulación de polarización de acuerdo con [63-67], la despolarización de los patrones depende del proceso de esparcimiento y la apertura angular del sistema óptico del observador. Para prevenir la despolarización, la apertura del sistema óptico del observador se puede seleccionar de un número-f de 16, suficiente para registrar patrones de moteado completamente polarizados, manteniendo la polarización inducida en cada haz. Por otra parte, para prevenir despolarización por esparcimiento debido a la superficie del objeto, y para tener un solo proceso de esparcimiento, se debería garantizar que la rugosidad de la superficie de la muestra de estudio y el ángulo de incidencia sean apropiados para mantener la polarización del haz objeto [64,68-70]. Bajo las consideraciones mencionadas, el mecanismo de modulación de polarización para generar patrones de moteado y corrimiento de fase obedecen al esquema FP mostrado en la Figura 20. La modulación comprende generar dos estados circulares (derecha e izquierda) a la salida del interferómetro, antes de $P(\Psi)$. Por simplicidad se usará la aproximación de Jones. En la entrada del arreglo se tiene un polarizador lineal P_{45° para generar polarización lineal a 45° ,

$$\vec{J}_I = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

Con el cubo divisor se obtienen el haz reflejado (A) y el haz transmitido (B). El haz reflejado después de atravesar el sistema compuesto por un polarizador lineal horizontal y un retardador $\lambda/4$ ($PH_A Q_{A(45^\circ)}$) y esparcirse por la superficie del objeto O, pasa a tener un estado de polarización circular a la derecha,

$$\vec{J}_{OB} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} e^{i\Delta\phi}, \quad (4.2)$$

siendo $\Delta\phi$ la información de fase asociada a la superficie del objeto de estudio. El haz transmitido después de atravesar el sistema $PH_B Q_{B(-45^\circ)}$, su estado de polarización es circular a la izquierda,

$$\vec{J}_{REF} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

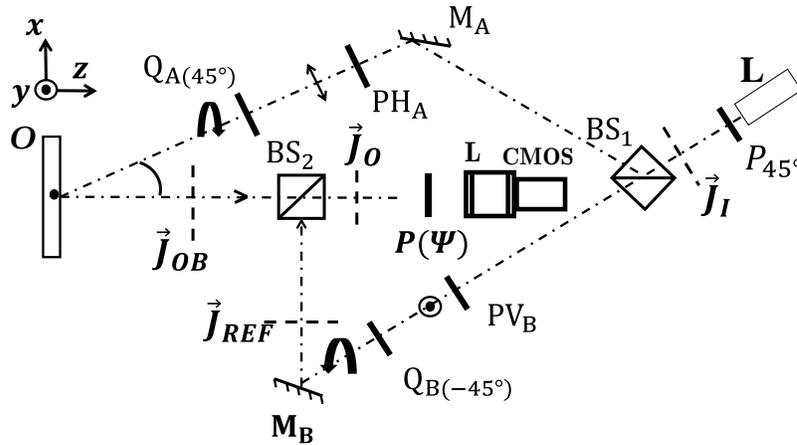


Figura 20. Esquema FP con componentes de polarización para corrimiento de fase. L: Láser con polarización vertical, P_{45° : Polarizador con eje de transmisión a 45° , BS_1 : Cubo divisor no polarizado, M_A : Espejo, PH_A : Polarizador con eje de transmisión horizontal, $Q_A(45^\circ)$: Retardador $\lambda/4$ a 45° , O: Objeto, BS_2 : Cubo divisor no polarizado, $P(\Psi)$: Polarizador para interferencia, PV_B : Polarizador con eje de transmisión vertical, $Q_B(-45^\circ)$: Retardador $\lambda/4$ a -45° , M_B : Espejo.

A la salida del interferómetro se tienen los dos haces combinados en un solo haz, $\vec{J}_O = \vec{J}_{OB} + \vec{J}_{REF}$. Al utilizar un polarizador lineal $P(\Psi)$ a un ángulo Ψ en la salida se obtiene:

$$\vec{J}_\Psi = P(\Psi)(\vec{J}_{OB} + \vec{J}_{REF}) = P(\Psi)\vec{J}_{OB} + P(\Psi)\vec{J}_{REF}, \quad (4.4)$$

donde el primer término para el haz objeto

$$\begin{aligned} P(\Psi)\vec{J}_{OB} &= \frac{e^{i\Delta\phi}}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos^2 \Psi & \cos \Psi \operatorname{sen} \Psi \\ \cos \Psi \operatorname{sen} \Psi & \operatorname{sen}^2 \Psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} \\ &= \frac{e^{i\Delta\phi}(\cos \Psi + i \operatorname{sen} \Psi)}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos \Psi \\ \operatorname{sen} \Psi \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.5)$$

y el segundo término para el haz referencia

$$\begin{aligned} P(\Psi)\vec{J}_{REF} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos^2 \Psi & \cos \Psi \operatorname{sen} \Psi \\ \cos \Psi \operatorname{sen} \Psi & \operatorname{sen}^2 \Psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \\ &= \frac{\cos \Psi - i \operatorname{sen} \Psi}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos \Psi \\ \operatorname{sen} \Psi \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Por lo tanto

$$\vec{J}_\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}} [(e^{i\Delta\phi} + 1) \cos \Psi + i \operatorname{sen} \Psi (e^{i\Delta\phi} - 1)] \begin{bmatrix} \cos \Psi \\ \operatorname{sen} \Psi \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

El polarizador hace posible que los dos haces interfieran. El patrón de intensidad con corrimiento de fase controlado por el ángulo doble del polarizador es:

$$I = \|\vec{J}_\Psi\|^2 = 1 + \cos(2\Psi + \Delta\phi), \quad (4.8)$$

donde $\Delta\phi$ es la información de fase a ser recuperada, Ψ representa la orientación del eje rápido del polarizador $P(\Psi)$, la intensidad de fondo (DC) es 1 y la modulación de las franjas es 1. Para validar este análisis, se debe garantizar que la superficie del objeto refleje la polarización circular del haz incidente, y que los cubos divisores no sean polarizados.

4.2. Réplica de patrón de interferencia

La Figura 21 muestra el acople entre el interferómetro (Figura 21(a)) mostrado en la Figura 20 y un sistema replicador (R.S.) basado en una configuración Michelson (Figura 21(b)). Al acoplarse R.S. a la salida del interferómetro, el haz saliente \vec{J}_0 del interferómetro ingresa al R.S. para ser dividido en un haz reflejado y en uno transmitido por el cubo BS₃ (ver Figura 21(b)). Con los espejos M_D y M_I , ambos haces son direccionados hacia el observador (CMOS). De esta forma se obtienen dos réplicas del haz \vec{J}_0 , uno viajando sobre la derecha (D) y el otro sobre la izquierda (I) como se muestra en la Figura 21(b). Cada una de estas réplicas atraviesa un polarizador lineal. Dos polarizadores lineales (P_{0°, P_{Ψ}), con diferente ángulo de polarización entre sí y ubicados sobre los respectivos ejes en los que viajan los patrones, causan la interferencia de los dos haces que viajan en cada réplica; es decir, interferencia de dos pasos simultáneos. Los espejos (M_D y M_I) están equidistantes con respecto al cubo divisor BS₃ y están fuera del eje óptico con el propósito de separar la imagen que refleja cada espejo con respecto a la imagen emergente del otro. Cabe resaltar que no hay interferencia en el Michelson, puesto que el haz entrante \vec{J}_0 es la combinación de dos haces con polarización circulares con direcciones opuestas entre ellas.

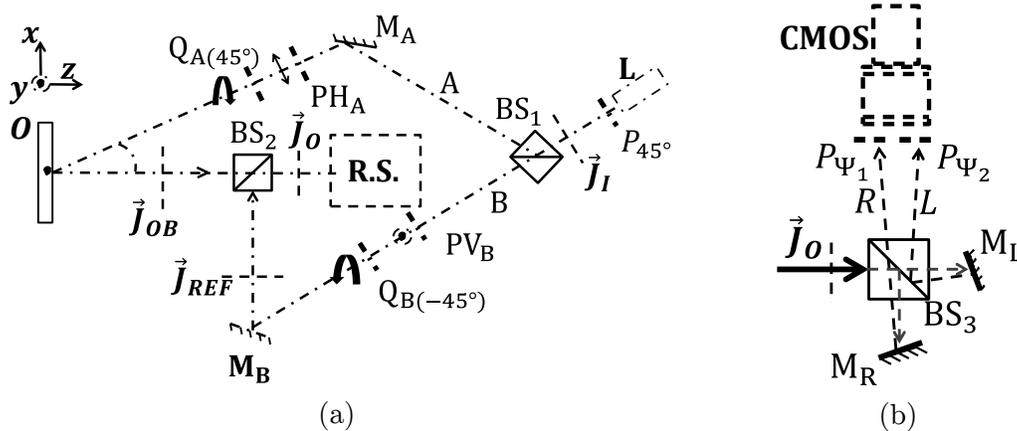


Figura 21. (a) Acople entre el interferómetro fuera de plano y el sistema replicador (R.S.) basado en configuración Michelson. (b) Esquema de configuración Michelson (R.S.) para doble replicación.

4.3. Obtención de fase con dos pasos

En este trabajo, un estimador de paso para la obtención de fase a partir de dos pasos fue considerado [71]. El estimador asume que la modulación de las franjas es constante y que la intensidad de fondo es nula. Por lo tanto, los interferogramas deben ser pre-procesados para obtener la fase [72]. Asumiendo el pre-procesamiento, la distribución de fase para dos pasos [71] es obtenida como:

$$\Delta\phi \cong \arctan\left(-\frac{\tilde{I}_1}{\tilde{I}_2}\right), \quad (4.9)$$

donde \tilde{I}_1 y \tilde{I}_2 son los patrones de interferencia normalizados como reportado en [71].

4.4. Corrimiento de fase mediante modulación por polarización en un interferómetro ESPI-FP

Modulación por polarización para corrimiento de fase de dos pasos fue llevado a cabo en un interferómetro FP. El sistema genera estados de polarización circular con direcciones opuestas de polarización en cada haz (referencia y objeto) del interferómetro. Estos dos haces interfieren a la salida del interferómetro gracias a un polarizador lineal que a la vez se opera manualmente para generar un corrimiento de fase. Los estados de polarización emergentes han sido analizados con el propósito de obtener el corrimiento de fase necesario para procesar la distribución de fase. El corrimiento de fase mediante polarización es demostrada con un algoritmo de dos pasos para medir el desplazamiento FP de una placa de aluminio.

4.4.1. Arreglo FP con componentes de polarización

En la Figura 22 se muestra el arreglo FP. El haz emergente de la fuente L con componentes de polarización vertical y horizontal debido a un polarizador lineal ubicado a 45° , es dividido en un haz reflejado (A – objeto) y otro transmitido (B - referencia) por un

divisor de haz (BS_1). El haz A con frente de onda esférico generado por el objetivo de microscopio (MO_A) ilumina la superficie de la muestra de interés. Este haz se polariza circularmente a la derecha a través de un polarizador con eje de transmisión ubicado horizontalmente y placa cuarto de onda orientada a 45° , $PH_A(0^\circ)$ - $Q_A(45^\circ)$. El haz referencia es expandido por un objetivo de microscopio (MO_B). Este haz es polarizado circularmente a la izquierda gracias al sistema $PV_B(90^\circ)$ - $Q_B(-45^\circ)$. El haz referencia y el haz objeto son combinados por un divisor (BS_2). Frente al observador, cámara CMOS de 2048×1536 pixeles (tamaño de pixel, $3.2 \mu\text{m} \times 3.2 \mu\text{m}$), se encuentra un polarizador $P(\Psi)$ con el que se logra la interferencia de los dos haces y se puede introducir el corrimiento de fase [30,31].

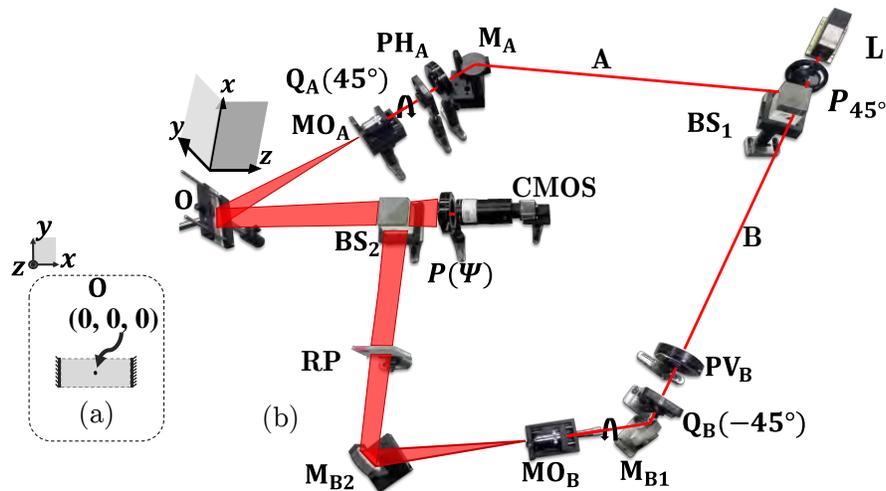


Figura 22. (a) Probeta rectangular de aluminio anclada en los lados. (b) Interferómetro Fuera-de-plano con componentes de polarización. L: Láser, P_{45° : Polarizador 45° , BS_1 : Cubo divisor no polarizado, M_A : Espejo, PH_A : Polarizador con eje de transmisión horizontal, $Q_A(45^\circ)$: Retardador $\lambda/4$ a 45° , MO_A : Objetivo de Microscopio, O: Objeto, BS_2 : cubo divisor no polarizado, $P(\Psi)$: Polarizador para interferencia, PV_B : Polarizador con eje de transmisión vertical, $Q_B(-45^\circ)$: Retardador $\lambda/4$ a -45° , M_{B1} : Espejo, MO_B : Objetivo de Microscopio, M_{B2} : Espejo, RP: Generador de moteado subjetivo.

El sistema de referencia está posicionado en el centro de la superficie de la muestra (O) como se muestra en la Figura 22(a). La muestra es una placa de aluminio cuya región de su superficie iluminada fue de $20 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ y localizada sobre el plano $x-y$ en $z = 0$.

La muestra fue anclada lateralmente y fue sometida a flexión mecánica mediante carga aplicada con un tornillo en el punto $(0,0,0)$ en la zona trasera. De acuerdo al sistema de referencia, la fuente de iluminación (MO_A) se ubicó en $(17.78 \text{ cm}, 0 \text{ cm}, 25.39 \text{ cm})$, tal que su ángulo de incidencia medido con respecto al eje óptico (z) fue de 35° . La distancia fuente-objeto ($\overline{MO_AO}$) es de 31 cm y la distancia observador-objeto es de 54 cm sobre el eje z .

4.4.2. Resultados de corrimiento de fase por polarización

Los patrones de moteado son grabados antes y después de la deformación. Mediante la sustracción de ambos patrones se obtiene un patrón de franjas modulado en fase por polarización. En secciones previas se mostró que un polarizador lineal genera corrimiento de fase en el patrón de interferencia. Las intensidades respectivas de cada patrón son moduladas por el grado de polarización según [67]. Así, ángulos de 0° y 5° se seleccionaron ya que tienen intensidades comparables, lo que es esencial para el uso del algoritmo de dos pasos. Considerando esto, es necesario ubicar un polarizador lineal a un ángulo de: $\Psi_1 = 0^\circ$ para obtener el primer interferograma y $\Psi_2 = 5^\circ$ para obtener el segundo patrón, generando el corrimiento respectivo de fase (ξ) de 0° y 10° [67,73,74]. Diez desplazamientos de $1 \mu\text{m}$ del tornillo se aplicaron para flexionar la muestra. La Figura 23 muestra diez paquetes de interferogramas, donde cada paquete se compone de dos interferogramas (I1, I2). I1 corresponde a la posición del eje de transmisión de $P(\Psi)$ en 0° , mientras que I2 corresponde al eje de transmisión de $P(\Psi)$ ubicado a 5° .

Es de esperar que la fase resultante presente desafinación (detuning, en inglés) debido a la no uniformidad de la fase entre los dos pasos. No obstante, esto se puede solucionar mediante la aplicación de un estimador de fase entre interferogramas [71-74]. Para obtener la fase a partir de I1 e I2, el estimador mencionado en la sección 4.3 fue considerado [71]. Cada

paquete está asociado a un desplazamiento de $1\ \mu\text{m}$ del tornillo en el punto $(0,0,0)$. Para obtener la fase respectiva $(\Delta\phi)$ usando la Ec. (4.9), se aplicó previamente un filtro Gaussiano. Las fases obtenidas y que se asocian a los desplazamiento del tornillo, son mostrada en la Figura 24.

Usando las coordenadas de la fuente de iluminación MO_A y el observador, se calculó la componente e_z del vector de sensibilidad para el arreglo FP. Para cada mapa de fase se obtuvo el mapa respectivo de desplazamiento w usando la Ec. (2.14). Una sumatoria de estos mapas w se realizó para determinar la evolución de la probeta. La Figura 25 muestra tal evolución del mapa de desplazamiento w . Los máximos desplazamientos alcanzados para cada uno de los estados de la evolución fueron: $0.81\ \mu\text{m}$, $1.42\ \mu\text{m}$, $2.20\ \mu\text{m}$, $2.91\ \mu\text{m}$, $3.57\ \mu\text{m}$, $4.83\ \mu\text{m}$, $5.22\ \mu\text{m}$, $6.01\ \mu\text{m}$, $6.70\ \mu\text{m}$ y $7.63\ \mu\text{m}$.

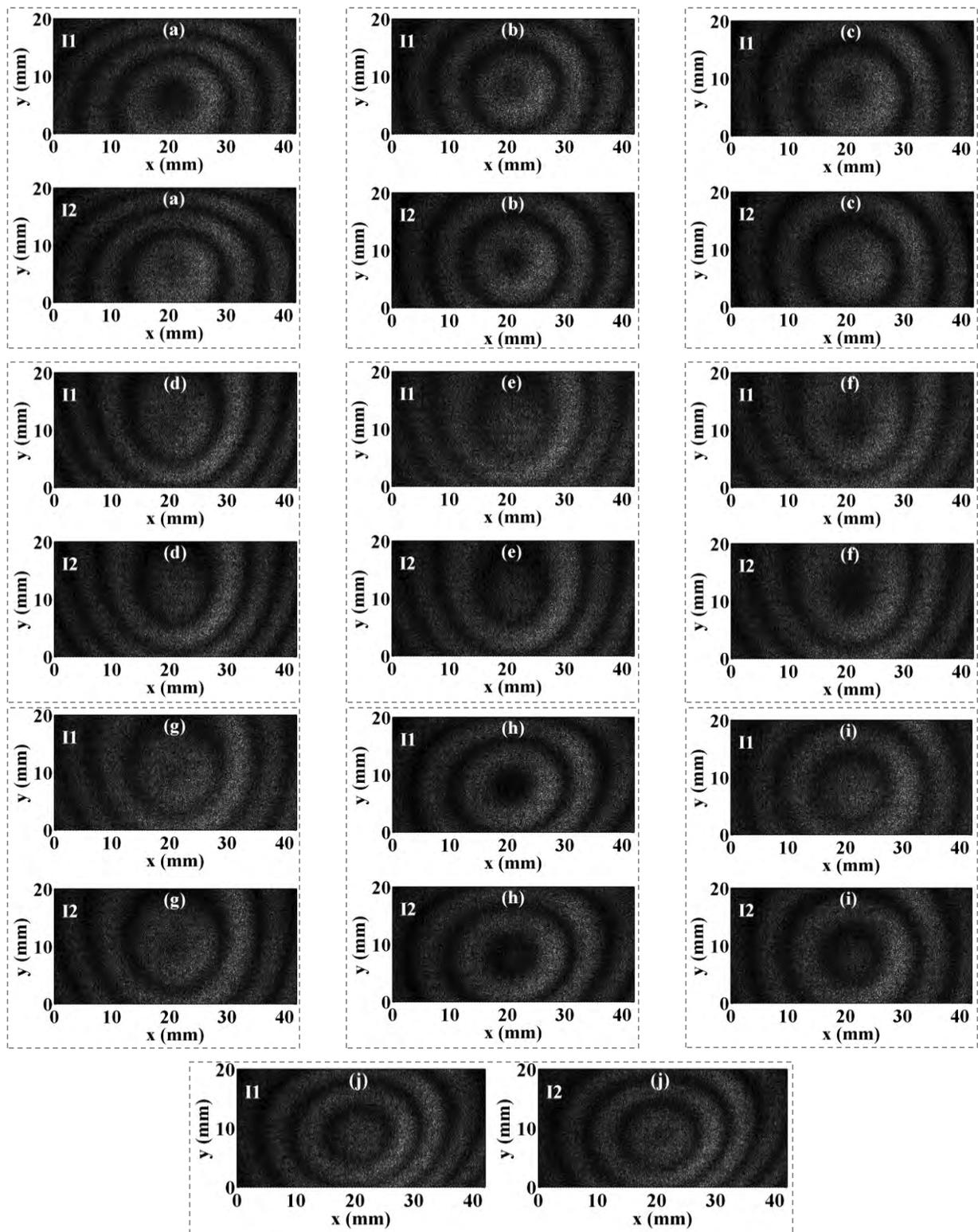


Figura 23. (a) – (j) Interferogramas (I_1 , I_2) para 10 desplazamientos, cada uno de $1 \mu\text{m}$.

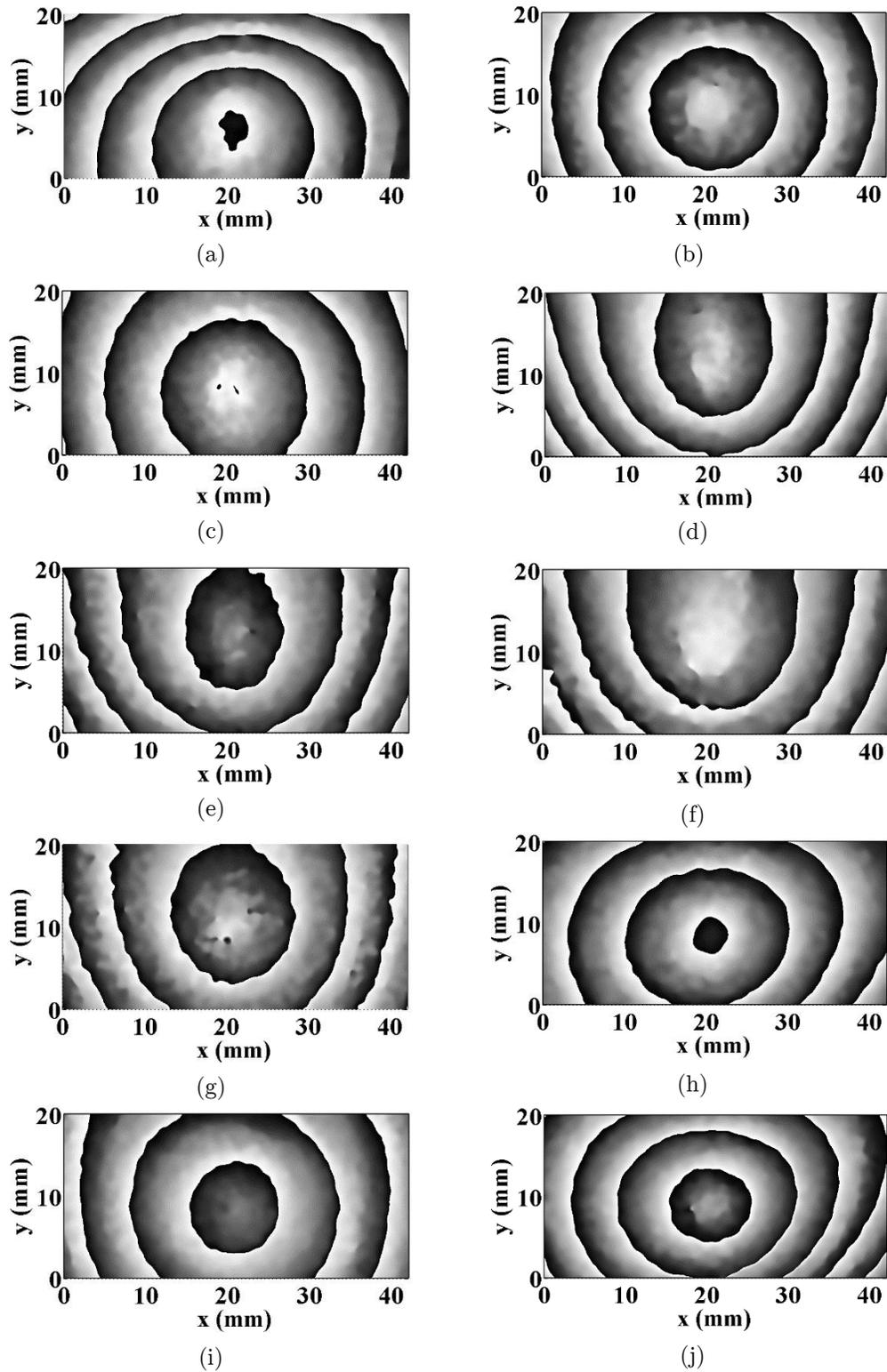


Figura 24. (a) – (j) Fases envueltas.

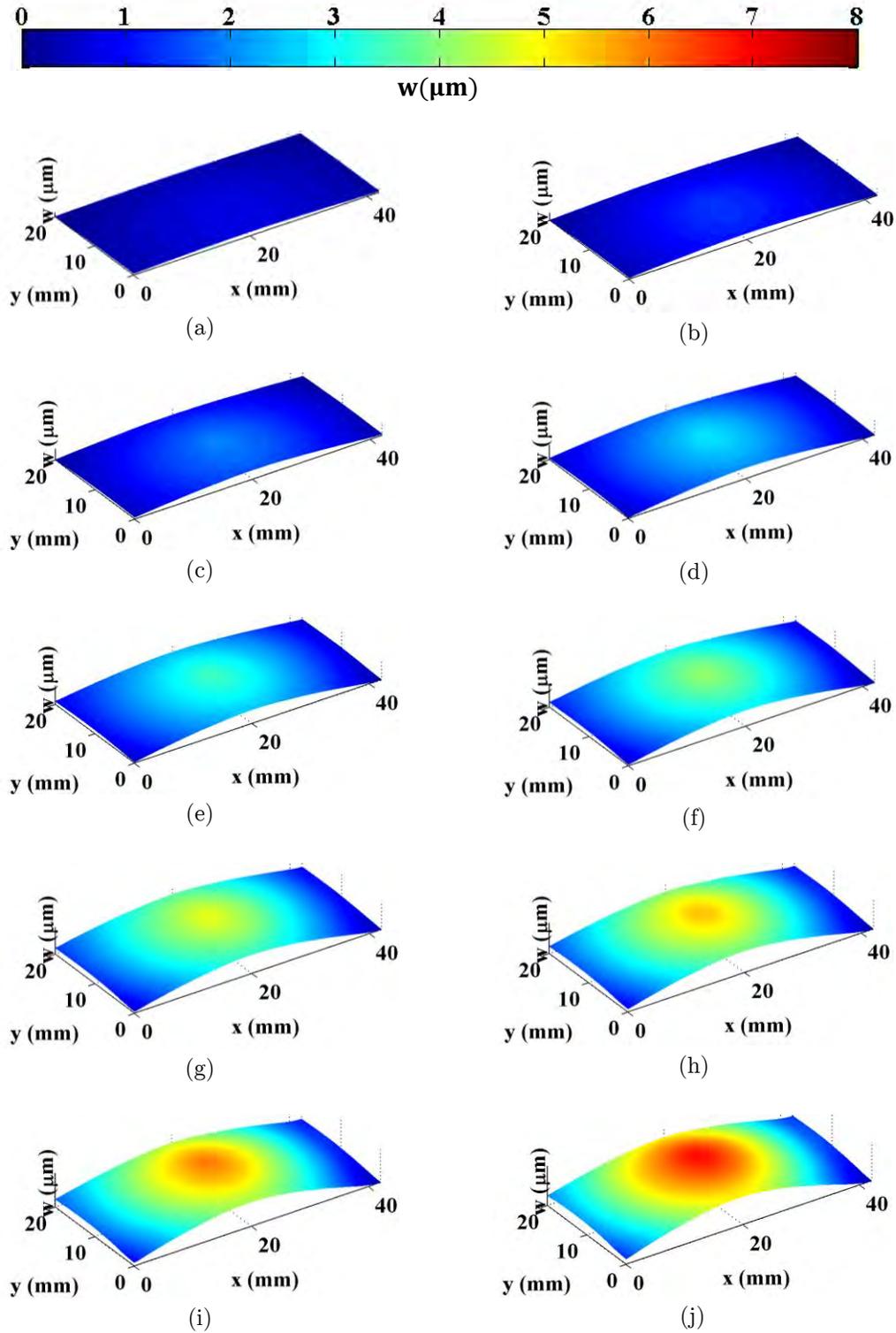


Figura 25. (a) – (j) Evolución del mapa de desplazamiento w .

4.5. Corrimiento de fase simultáneo en un interferómetro ESPI-FP

Un interferómetro ESPI fuera-de-plano con modulación de polarización acoplado a un arreglo de replicación de patrones, fue implementado para la medición del campo de desplazamiento w de una probeta sometida a flexión mecánica. La Figura 26 muestra el arreglo experimental del esquema del FP con polarización (ver Figura 21(a)), acoplado a un arreglo con configuración Michelson (C.M.) cuyo esquema se muestra en la Figura 21(b).

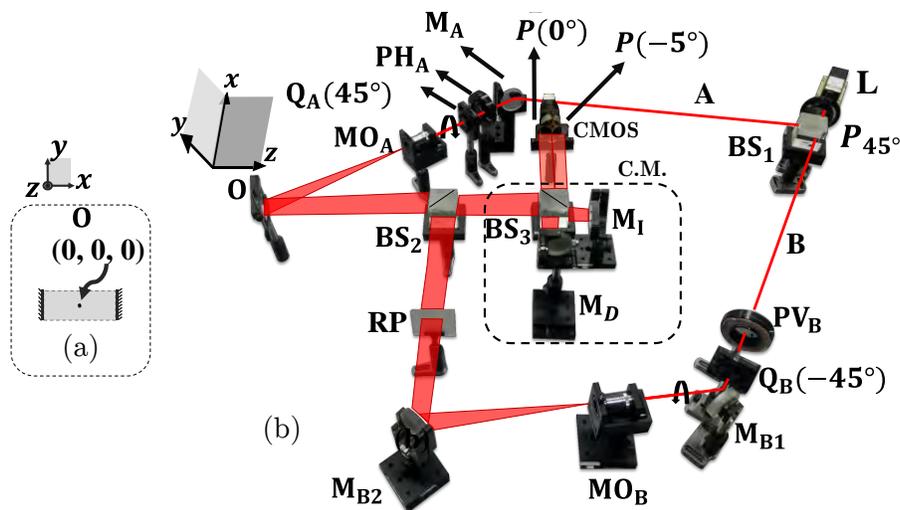


Figura 26. (a) Probeta rectangular de aluminio anclada en los lados. (b) Interferómetro Fuera-de-plano con componentes de polarización para corrimiento de fase simultáneo. **L**: Láser con polarización vertical, **P_{45°}**: Polarizador 45°, **BS₁**: Cubo divisor no polarizado, **M_A**: Espejo, **PH_A**: Polarizador con eje de transmisión horizontal, **Q_A(45°)**: Retardador $\lambda/4$ a 45°, **MO_A**: Objetivo de Microscopio, **O**: Objeto, **BS₂**: Cubo divisor no polarizado, **PV_B**: Polarizador con eje de transmisión vertical, **Q_B(-45°)**: Retardador $\lambda/4$ a -45°, **M_{B1}**: Espejo, **MO_B**: Objetivo de microscopio, **M_{B2}**: Espejo, **RP**: Generador de moteado subjetivo. Configuración Michelson (C.M.) para replicación de patrón de interferencia: **BS₃** - Cubo divisor no polarizado, **MO_R**- Espejo para direccionar réplica a la derecha del CMOS, **MO_L**- Espejo para direccionar réplica a la izquierda del CMOS, **P(0°)** - Polarizador para generar patrón derecho con fase 0, **P(-5°)** - Polarizador para generar el patrón izquierdo con fase -5°.

De acuerdo al sistema de referencia, la fuente de iluminación (O_A) se ubicó a un ángulo de incidencia de 35° medido con respecto al eje óptico (z), la distancia fuente-objeto ($\overline{MO_AO}$) es de 31 cm, y debido a la inserción del sistema C.M., la distancia observador-objeto para cada réplica, considerando reflexión el sistema C.M., es de 180 cm.

El sistema C.M. recibe como entrada el haz, saliente de BS2, compuesto por el haz objeto y haz referencia con polarizaciones circulares opuestas. La primera réplica de este haz compuesto se obtiene gracias al espejo M_D direccionado hacia el polarizador $P(0^\circ)$, y la segunda se obtiene con el espejo M_I posicionado para que la réplica viaje directo al polarizador $P(-5^\circ)$ encargado de introducir el corrimiento de fase. Con cada polarizador se hace interferir el haz objeto y referencia que venían mezclados en cada réplica. Entonces, en el plano observador se obtiene un patrón de moteado sobre la derecha y otro sobre la izquierda cuando la probeta no ha cargada axialmente en la parte trasera (Figura 26(a)). Después de flexionarse la probeta mediante carga aplicada por tornillo, se adquieren los patrones respectivos para correlacionarse con los primeros y obtener dos interferogramas con desfase entre ellos.

4.5.1. Resultados del corrimiento de fase simultáneo

La flexión de la probeta fue evaluada continuamente. Para este evento dinámico de desplazamiento total de $1\ \mu\text{m}$ del tornillo de carga, se capturaron 290 ‘frames’ de patrones. La Figura 27 muestra cuatro capturas simultáneas de interferogramas. Cada captura muestra tres secciones, donde la primer sección (de izquierda a derecha) y la tercera corresponden a los interferogramas (I_1, I_2), la segunda sección corresponde a la zona donde se superponen partes de cada réplica saliente del sistema C.M.

Cada captura simultánea fue recortada de acuerdo a las líneas blancas que delimitan cada interferograma. Para garantizar coincidencia entre los centros de los interferogramas, una pupila a la entrada de C.M se ubicó para generar un punto. Las réplicas del punto se hicieron

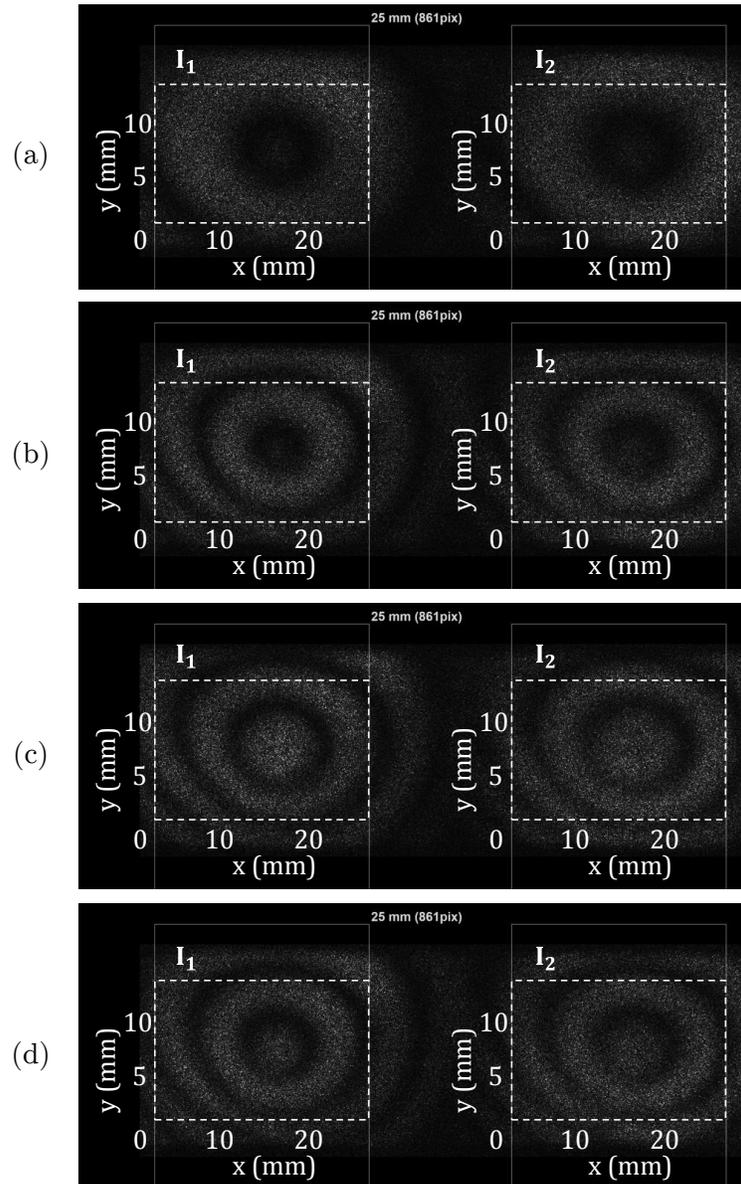


Figura 27. Interferogramas capturados simultáneamente. Cuatro estados de los 290 capturados durante el evento dinámico de deformación. (Visualización 2: video de la evolución de los interferogramas capturados simultáneamente).

coincidir en el centro del observador usando los espejos M_D y M_I . Posteriormente, estos espejos se rotaron sobre su eje vertical, con el propósito de separar los puntos. Un objeto de referencia (Figura 28) se usó para alinear digitalmente las réplicas. Esto fue: recorte de la imagen para obtener dos imágenes, selección de una ventana para cada réplica que contenga el mismo carácter, y posteriormente conteo de la cantidad de píxeles en filas y columnas

necesarios para desplazar una de las ventanas de modo que coincidan los dos caracteres, es decir los centros de imagen.



Figura 28. Réplicas alineadas de un objeto de prueba.

Una vez definida la alineación digital de las dos imágenes-réplicas, se obtuvieron los mapas de fase usando la Ec. (4.9) del estimador de fase para dos pasos. La Figura 29(I y II) muestra la evolución de la probeta mediante los mapas de fase y de desplazamiento de los cuatro estados obtenidos usando la Ec. (2.5).

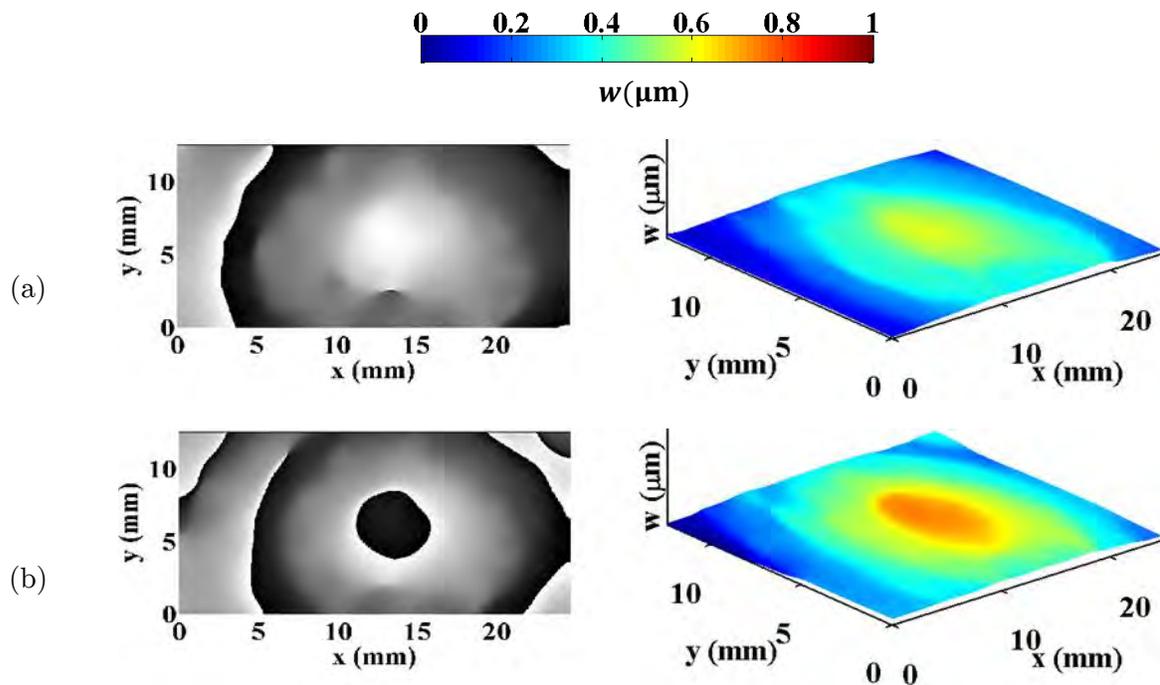


Figura 29-(I). Cuatro tomas de las 290 (a)-(b) Izquierda: mapas de fase envuelta, Derecha: evolución del mapa de desplazamiento.

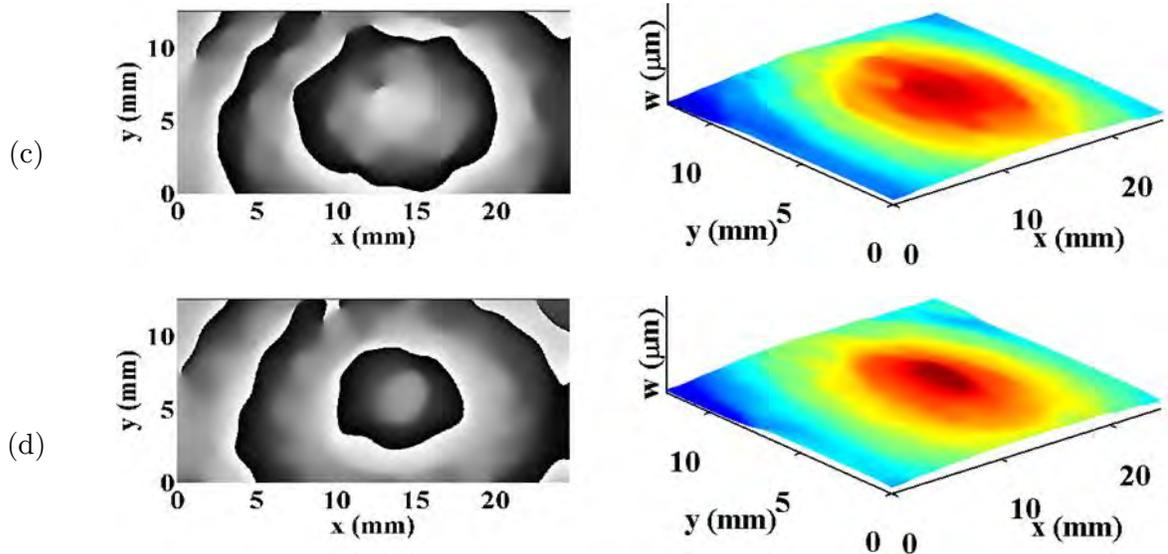


Figura 29-(II). Cuatro tomas de las 290 (c)-(d) Izquierda: mapas de fase envuelta, Derecha: evolución del mapa de desplazamiento. ([Visualización 3](#): video de la evolución de ambos mapas).

4.6. Conclusión

Se demostró el corrimiento de fase usando polarización en un interferómetro FP para la medición del desplazamiento de una placa de aluminio sometida a carga axial. Aunque la obtención de los interferogramas implica una segunda ubicación del eje de transmisión del polarizador $P(\Psi)$, el experimento no requiere tiempo para controlar un sistema electro-mecánico para el corrimiento de fase. Por lo tanto, se propuso un nuevo sistema de replicación basado en una configuración Michelson para el corrimiento de fase simultáneo de dos pasos. Este nuevo sistema fue usado para medir, de manera continua, el desplazamiento que experimentó la superficie de una placa de aluminio sometida a flexión mecánica.

Conclusiones generales y trabajo a futuro

En la presente tesis se implementan los interferómetros ESPI en-plano y fuera-de-plano cuya funcionalidad es la de evaluar eventos dinámicos y estáticos correspondiente a pruebas mecánicas de tracción o flexión. Si bien, ambos interferómetros son usados como técnicas de campo completo, se ha reportado su uso para el estudio de zonas de interés.

En el caso de objetos relativamente grandes, el uso de iluminación divergente resulta lo más apropiado. En este caso, el vector de sensibilidad muestra variaciones que dependen de la forma y tamaño del objeto, así como de la posición de la fuente de iluminación y posición de la observación (esto último en el caso de sistemas con sensibilidad fuera de plano).

Por cuestiones prácticas, es común en interferometría, que el vector de sensibilidad sea considerado constante, sin embargo, esto puede introducir grandes errores en la evaluación del campo de desplazamiento. Parte de este trabajo presenta un análisis del vector de sensibilidad para un interferómetro fuera-de-plano tanto para iluminación divergente como colimada. Se calcula el error para ambos casos respecto a la suposición de un vector de sensibilidad constante. Se encuentra que el uso de iluminación colimada y la suposición de un vector de sensibilidad constante para este tipo de iluminación, introducen en la evaluación del campo de desplazamiento, un error menor respecto al uso de iluminación divergente y la

misma suposición.

Otra aportación de la tesis es la evaluación mecánica de una probeta correspondiente a un biopolímero. El comportamiento mecánico fue seguido mediante el uso de un interferómetro ESPI con sensibilidad en plano. Dada la geometría y composición no homogénea de la muestra, no se podía inferir zonas probables de fallas mecánicas, por lo que se estudió toda la probeta. Esta evaluación conlleva a la propuesta de escalar mapas de desplazamiento para enlazar los estados de evaluación correspondientes. Se presentan los resultados experimentales correspondientes a las curvas de esfuerzo-deformación y sus respectivos módulos de elasticidad para diferentes zonas de la probeta, que muestran un comportamiento mecánico no homogéneo. Este es un ejemplo de aplicación de ESPI como una herramienta para complementar estudios mecánicos de materiales demandados por la industria del empaque. Estos nuevos materiales se están fabricando usando compuestos basados en fibras de celulosa y con técnicas de disposición aleatoria. Debido a esta deposición, el desempeño del material puede variar según la zona que se estudie, por esto es necesario que se implementen métodos para estudiar las muestras completamente.

Otra novedad de la presente investigación es la propuesta del interferómetro fuera-de-plano acoplado con un sistema basado en configuración Michelson para el corrimiento de fase simultáneo así como su implementación para seguir la evolución de una probeta sometida a flexión. No solo se obtuvieron mapas de fase envuelta usando un estimador de fase para dos pasos, sino que además se obtuvieron mapas secuenciales de desplazamiento.

Como trabajos a futuro, se explorará:

- Implementar corrimiento de fase usando modulación por polarización en un interferómetro en-plano.
- Hacer uso de un interferómetro con sensibilidad FP, para la evaluación de un evento de flexión adicionando al FP un sistema Michelson. Se propone acoplar un sistema electromecánico de flexión para correlacionar cargas con los mapas de desplazamiento.
- Usar un sistema cíclico que reemplace el Michelson para replicar más de dos patrones.

Bibliografía

- [1] L. Yang and A. Ettemeyer, "Strain measurement by three-dimensional electronic speckle pattern interferometry: potentials, limitations, and applications," *Optical Engineering*, vol. 42, no. 5, pp. 1257-1266, May 2003.
- [2] J. M. Huntley, *Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques*, Pk Rastogi, Ed. Chichester, England, 2001.
- [3] R. S. Sirohi, *Optical Methods of Measurement: Wholefield Techniques*. New York: Marcel Decker, 1999.
- [4] R. Jones and C. Wykes, *Holographic and Speckle Interferometry*, Cambridge University Press, Ed., 1989.
- [5] G. Groh, *Engineering uses of laser produced speckle patterns*, "Engineering Uses of Holography", E. R. Robertson and J. M. Harvey, Ed.: Cambridge Univ. Press, 1970.
- [6] R. Jones, "Design and application of a speckle pattern interferometer for measurement of total plane strain fields," *Optics & Laser Technology*, vol. 8, no. 5, pp. 215-219, 1976.
- [7] Raul R. Cordero and Fernando Labbé, "Measuring out-of-plane displacements by electronic speckle-pattern interferometry (ESPI) and whole-field subtractive moiré," *Measurement Science and Technology*, vol. 17, pp. 825-830, January 2006.
- [8] Kim Kyeongsuk and Jun Hyunchul, "Nondestructive Testing of Residual Stress on the Welded Part of Butt-welded A36 Plates Using Electronic Speckle Pattern Interferometry," *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 48, pp. 259-267, February 2016.
- [9] Viswanath Bavigadda, Mohesh Moothanchery, Manojit Pramanik, Emilia Mihaylova, and Vincent Toal, "Compact holographic optical element-based electronic speckle pattern interferometer for rotation and vibration measurements," *Proceedings of SPIE*, vol. 10127, p. 10, April 2017.
- [10] Amalia Martínez, Juan A. Rayas, Ramón Rodríguez-Vera, and Héctor J. Puga,

- "Three-dimensional deformation measurement from the combination of in-plane and out-of-plane electronic speckle pattern interferometers," *Applied Optics*, vol. 43, pp. 4652-4658, August 2004.
- [11] G. A. Gómez-Méndez, A. Martínez-García, A. K. Reyes, and J. A. Rayas, "Relative error in out-of-plane measurement due to the object illumination," *Applied Optics*, vol. 58, no. 18, pp. 4963-4968, 2019.
- [12] G. A. Gómez-Méndez, A. Martínez-García, J. A. Rayas, and A. Gaitán, "Application of speckle interferometry to the mechanical characterization of a biopolymer simple," *Applied Optics*, vol. 59, no. 13, pp. D148-D154, 2020.
- [13] B. Guelorget, M. Francois, C. Vial-Edwards, G. Montay, D. Laurent, and J. Lu, "Strain rate measurement by Electronic Speckle Pattern Interferometry: A new look at the strain localization onset," *Materials Science & Engineering A*, vol. 415, pp. 234-241, 2006.
- [14] Y. Lianxiang, X. Xin, Z. Liang, W. Sijin, and W. Yonghong, "Review of Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI) for Three Dimensional Displacement Measurement," *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 27, no. 1, p. 13, November 2014.
- [15] A. Yasuhiko, "Development of in-plane and out-of-plane deformations simultaneous measurement method for the analysis of buckling," *Optical Engineering*, vol. 54, no. 2, p. 8, February 2015.
- [16] RS Sirohi, *Speckle Metrology*. New York, United States: Marcel Dekker, 1993.
- [17] Catherine Wykes, "Use of Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI) in the Measurement of Static and Dynamic Surface Displacements," *Optical Engineering*, vol. 21, June 1982.
- [18] Katherine Creath, "Phase shifting speckle interferometry," *Applied Optics*, vol. 24, pp. 3053-3058, September 1985.
- [19] Mette Owner-Peterson, "Decorrelation and fringe visibility: on the limiting behavior of various electronic speckle-pattern correlation interferometers," *Journal of the Optical Society of America*, vol. 8, pp. 1082-1089, July 1991.

- [20] C. Vial-Edwards, I. Lira, A. Martinez, and M. Münzenmayer, "Electronic Speckle Pattern Interferometry Analysis of Tensile Tests of Semihard Copper Sheets," *Experimental Mechanics*, vol. 41, no. 1, pp. 58-62, March 2001.
- [21] Y. Hak Huh, D. Iel Kim, and C. Doo Kee, "Measurement of Continuous Micro-Tensile Strain Using Micro-ESPI Technique," *Key Engineering Materials*, vol. 297, no. 300, pp. 53-58, November 2005.
- [22] V. Madjarova, S. Toyooka, R. Widiastuti, and H. Kadono, "Dynamic ESPI with subtraction-addition method for obtaining the phase," *Optics Communications*, vol. 212, pp. 35-43, October 2002.
- [23] F. Labbé, "Strain-rate measurements by electronic speckle-pattern interferometry (ESPI)," *Optics and Lasers Engineering*, vol. 45, pp. 827-833, February 2007.
- [24] X. Dai, Q. Pu, L. Wang, H. Yun, and Y. Wang, "Measurement on fracture process and prediction of the load capacity of steel fiber reinforced concrete by electronic speckle pattern interferometry," *Composites Part B: Engineering*, vol. 42, pp. 1181-1188, March 2011.
- [25] P. Pomarède, F. Meraghni, L. Peltier, S. Delalande, and N. F. Declercq, "Damage Evaluation in Woven Glass Reinforced Polyamide 6.6/6 Composites Using Ultrasound Phase-Shift Analysis and X-ray Tomography," *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 37, no. 12, p. 21, February 2018.
- [26] K. Gyeong-Man, L. Ralf, M. Georg Hannes, and C. Young-Wook, "The Mechanical Deformation Process of Electrospun Polymer Nanocomposites Fibers," *Macromolecular Rapid Communications*, vol. 26, pp. 728 - 733, January 2005.
- [27] J. L. Kardos and J. Raison, "The Potential Mechanical Response of Macromolecular Systems-A Composite Analog," *Polymer Engineering and Science*, vol. 15, no. 3, pp. 183 - 190, March 1975.
- [28] B. Fallqvist and M. Kroon, "Constitutive modelling of composite biopolymer networks," vol. 395, pp. 51-61, February 2016.
- [29] H. Mahjoubi, F. Zairi, and Z. Tourki, "A micro-macro constitutive model for strain-induced molecular ordering in biopolymers: Application to polylactide over a wide range of temperatures," *International Journal of Plasticity*, vol. 123, pp. 38-55,

July 2019.

- [30] N. I. Toto-Arellano, D. I. Serrano-García, A. Martínez García, G. Rodríguez Zurita, and A. Montes-Pérez, "4D profile of phase objects through the use of a simultaneous phase shifting quasi-common path interferometer," *Journal of Optics*, vol. 13, no. 11, pp. 1-8, 2011.
- [31] David Ignacio Serrano-García, Amalia Martínez-García, Noel-Ivan Toto-Arellano, and Yukitoshi Otani, "Dynamic temperature field measurements using a polarization phase-shifting technique," *Optical Engineering*, vol. 533, no. 11, pp. 1-6, November 2014.
- [32] M. Novak, J. Millerd, N. Brock, M. North-Morris, and J. Wyant, "Analysis of a micropolarizer array-based simultaneous phase-shifting interferometer," *Applied Optics*, vol. 44, no. 32, pp. 6861-6868, 2005.
- [33] N. I. Toto-Arellano, A. Martínez García, G. Rodríguez-Zurita, J. A. Rayas-Álvarez, and A. Montes-Perez, "Slope measurement of a phase object using a polarizing phase-shifting high-frequency Ronchi grating interferometer," *Applied Optics*, vol. 49, no. 33, pp. 6402-6408, 2010.
- [34] G. Jin and S. Tang, "Electronic speckle interferometer with a polarization phase-shift technique," *Optical Engineering*, vol. 31, no. 4, pp. 857-860, 1992.
- [35] G. Jin, N.K. Bao, and P.S. Chung, "Application of nondestructive testing methods to electronic industry using computer-aided optical metrology," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 25, no. 2-3, pp. 81-91, 1996.
- [36] N. I. Toto-Arellano, D. I. Serrano-García, and A. Martínez-García, "Parallel two-steps phase shifting interferometry using a double cyclic shear interferometer," *Optics Express*, vol. 21, no. 26, pp. 31983-31989, 2013.
- [37] G. Rodríguez-Zurita, N. I. Toto-Arellano, F. Meneses, and J. C. Vázquez-Castillo, "One-shot phase-shifting interferometer: five, seven, and nine interferograms," *Optics Letters*, vol. 33, pp. 2788-2790, 2008.
- [38] R. M. Neal and J. Wyant, "Polarization phase-shifting point-diffraction interferometer," *Applied Optics*, vol. 45, pp. 3463-3476, 2006.

- [39] J. E. Millerd, N. J. Brock, J. B. Hayes, M. B. North-Morris, M. Novak, and J. C. Wyant, "Pixelated phase-mask dynamic interferometer," *Proc. SPIE, Interferometry XII: Techniques and Analysis*, 2004.
- [40] M. Servin and J. Estrada, "Error-free demodulation of pixelated carrier frequency interferograms," *Optics Express*, vol. 18, pp. 18492-18497, 2010.
- [41] J. M. Padilla, M. Servin, and J. Estrada, "Synchronous phase-demodulation and harmonic rejection of 9-step pixelated dynamic interferograms," *Optics Express*, vol. 20, p. 11734, 2012.
- [42] G. A. Gómez-Méndez, G. Rodríguez-Zurita, A. Martínez-García, D. I. Serrano-García, Y. Otani, L. García-Lechuga, and N. I. Toto-Arellano, "Phase-stepping through polarizing modulation in electronic speckle pattern interferometry," *Applied Optics*, vol. 59, no. 20, pp. 6005-6011, 2020.
- [43] N. I. Toto-Arellano, G. A. Gómez-Méndez, A. Martínez-García, Y. Otani, D. I. Serrano-García, G. Rodríguez-Zurita, Juan Antonio Rayas, and L. García-Lechuga, "Dynamic parallel phase-shifting electronic speckle pattern interferometer," *Applied Optics*, vol. xx, no. xx, pp. 1-7, por publicarse, 2020.
- [44] Ch. De Veuster, P. Slangen, Y. Renotte, L. Berwart, and Y. Lion, "Influence of the geometry of illumination and viewing beams on displacement measurement errors in interferometric metrology," *Optics Communications*, vol. 143, pp. 95-101, November 1997.
- [45] Guillermo H. Kaufmann, *Advances in speckle metrology and related techniques.*: John Wiley & Sons, 2011.
- [46] J. N. Butters and J. A. Leendertz, "Holographic and video techniques applied to engineering measurements," *Measurement and Control*, vol. 4, no. 12, pp. 349-354, December 1971.
- [47] Thomas Kreis, *Holographic Interferometry, Principles and Methods*. Germany: Akademie Verlag, 1996.
- [48] J. W. Goodman, "Statistical Properties of Laser Speckle Patterns," in *Laser Speckle and Related Phenomena*, Dainty J. C., Ed.: Springer-Verlag, 1975, pp. 9-74.

- [49] P. K. Rastogi, *Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques*.: John Wiley & Sons Ltd., 2001.
- [50] A. Dávila, G. H. Kaufmann, and C. Pérez-López, "Transient deformation analysis by a carrier method of pulsed electronic speckle-shearing pattern interferometry," *Applied Optics*, vol. 37, no. 19, pp. 4116-4122, 1991.
- [51] P. K. Rastogi, *Holographic Interferometry Principles and Methods*, 1st ed.: P. K. Rastogi, 2014.
- [52] H. J. Puga, R. Rodríguez, and A. Martínez , "General model to predict and correct errors in phase map interpretation and measurement for out-of-plane ESPI interferometers," *Optics and Laser Technology*, vol. 34, pp. 81--92, October 2002.
- [53] D. Albrecht, "Estimation of the 2D measurement error introduced by in-plane and out-of-plane electronic speckle pattern interferometry instruments," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 31, pp. 63-81, September 1998.
- [54] David I. Farrant and Jon N. Petzing, "Sensitivity errors in interferometric deformation metrology," *Applied Optics*, vol. 42, pp. 5634-5641, October 2003.
- [55] W. S. Wan Abdullah and J. N. Petzing, "Development of speckle shearing interferometer error analysis as an aperture function of wavefront divergence," *Journal of Modern Optics*, vol. 52, pp. 1495-1510, July 2005.
- [56] A. Gaitán and W. Gacitúa, "Morphological and Mechanical Characterization of Electrospun Polylactic Acid and Microcrystalline Cellulose," *BioResources*, vol. 13, no. 2, p. 15, 2018.
- [57] A. Gaitán Bermúdez, *Compuesto tipo film en base a ácido poliláctico (PLA), reforzado con nanofibras de celulosa (NFC) de Chusquea quila para su uso en la industria del packing de alimentos [Doctoral thesis]*. Concepción, Chile: Universidad de BíoBío, 2018.
- [58] A. Martínez-García, R. Cordero, J. A. Rayas, H. J. Puga, and R. Rodríguez-Vera, "Uncertainty analysis of displacements measured by in-plane electronic speckle-pattern interferometry with spherical wave fronts," *Applied Optics*, vol. 44, no. 7, pp. 1141-1149, March 2005.

- [59] C. De Boor, *A practical guide to splines*, 3rd ed. New York, United States: Springer, 1978.
- [60] S. Pirani, M. N. Abushammala Hatem, and R. Hashaikeh, "Preparation and Characterization of Electrospun PLA/Nanocrystalline Cellulose-Based Composites," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 130, no. 5, pp. 3345-3354, June 2013.
- [61] S. Tanpichai and J. Wootthikanokkhan, "Reinforcing abilities of microfibers and nanofibrillated cellulose in poly(lactic acid) composites," *Science and Engineering of Composite Materials*, vol. 25, no. 2, pp. 395-401, August 2016.
- [62] G. Jin and N. Bao, "Applications of a novel phase-shift method using a computer-controlled polarization mechanism," *Optical Engineering*, vol. 33, no. 8, p. 2733—2737, 1994.
- [63] Brosseau, *Fundamentals of Polarized Light*, Wiley, Ed.: Wiley, 1998.
- [64] C. Amra, M. Zerrad, L. Siozade, G. Georges, and C. Deumie, "Partial polarization of light induced by random defects at surfaces or bulks," *Optics Express*, vol. 16, no. 14, pp. 10342-10354, 2008.
- [65] J. Broky and A. Dogariu, "Complex degree of mutual polarization in randomly scattered fields," *Optics Express*, vol. 18, no. 19, pp. 20105-20113, 2010.
- [66] M. Zerrad, J. Sorrentini, G. Soriano, and Amra C., "Gradual loss of polarization in light scattered from rough surfaces: electromagnetic prediction," *Optics Express*, vol. 18, no. 15, pp. 15832-15843, 2010.
- [67] A. Dogariu, C. Kutsche, P. Likamwa, and G. Boreman, "Time-domain depolarization of waves retroreflected from dense colloidal media," *Optics Express*, vol. 22, no. 9, pp. 585-587, 1997.
- [68] J. Li, G. Yao, and L. V. Wang, "Degree of polarization in laser speckles from turbid media: implications in tissue optics," *Journal of Biomedical Optics*, vol. 7, no. 3, pp. 307-312, 2002.
- [69] L. Arnaud, G. Georges, C. Deumié, and C. Amra, "Discrimination of surface and bulk scattering of arbitrary level based on angle-resolved ellipsometry: Theoretical

- analysis," *Optics Communications*, vol. 281, no. 6, pp. 1739-1744, 2008.
- [70] O. Gilbert, C. Deumié, and C. Amra, "Angle-resolved ellipsometry of scattering patterns from arbitrary surfaces and bulks," *Optics Express*, vol. 13, no. 7, pp. 2403-2418, 2005.
- [71] J. Vargas, J. A. Quiroga, C. O. S. Sorzano, J. C. Estrada, and J. M. Carazo, "Two-step demodulation based on the Gram-Schmidt orthonormalization method," *Optics Letter*, vol. 37, no. 3, pp. 443-445, 2012.
- [72] Victor H. Flores and M. Rivera, "Robust two-steps phase estimation using the Simplified Lissajous Ellipse Fitting method with Gabor Filters Bank preprocessing," *Optics Communications*, vol. 461, pp. 1-10, 2020.
- [73] G. Rodríguez-Zurita, A. García-Arellano, N. I. Toto-Arellano, V. H. Flores-Muñoz, R. Pastrana-Sánchez, C. Robledo-Sánchez, O. Martínez-Bravo, N. Vásquez-Pasmíño, and C. Costa-Vera, "One-shot phase stepping with a pulsed laser and modulation of polarization: application to speckle interferometry," *Optics Express*, vol. 23, pp. 23414-23427, 2015.
- [74] M. Servin and J. C. Estrada, "Analysis and synthesis of phase shifting algorithms based on linear system theory," *Optics and Laser in Engineering*, vol. 50, no. 8, pp. 1009-1014, 2012.

Anexo 1

Publicaciones

1. G. A. Gómez-Méndez, A. Martínez-García, A. K. Reyes, and J. A. Rayas, "Relative error in out-of-plane measurement due to the object illumination," *Applied Optics*, vol. 58, no. 18, pp. 4963-4968, 2019.
2. G. A. Gómez-Méndez, A. Martínez-García, J. A. Rayas, and A. Gaitán, "Application of speckle interferometry to the mechanical characterization of a biopolymer simple," *Applied Optics*, vol. 59, no. 13, pp. D148-D154, 2020.
3. G. A. Gómez-Méndez, G. Rodríguez-Zurita, A. Martínez-García, D. I. Serrano-García, Y. Otani, L. García-Lechuga, and N. I. Toto-Arellano, "Phase-stepping through polarization modulation in electronic speckle pattern interferometry," *Applied Optics*, vol. 59, no. 20, pp. 6005-6011, 2020.
4. N. I. Toto-Arellano, G. A. Gómez-Méndez, A. Martínez-García, Y. Otani, D. I. Serrano-García, G. Rodríguez-Zurita, Juan Antonio Rayas, and L. García-Lechuga, "Dynamic parallel phase-shifting electronic speckle pattern interferometer," *Applied Optics*, pp. 1-7, Por publicarse, 2020.
5. C. Isaza, J. C. Mosquera, G. A. Gómez-Méndez, J. P. Zavala-De Paz, K. Anaya, J. A. Rincon, and O. Palillero, "Development of an acousto-optic system for hyperspectral image segmentation," *Metrology and Measurement Systems*, vol. 26, no. 3, pp 517-530, 2019.

Trabajos presentados en congresos

1. Karen Reyes, Amalia Martínez-García, J. A. Rayas, Tobias Scherbaum, Gustavo A. Gómez-Méndez, and Héctor Pérez, "Analysis of out-of-plane sensitivity by using electronic speckle interferometry, (Poster)" *Mexican Optics and Photonics Meeting*, Tonantzintal, Puebla, Sept 6-8, 2017.

2. G. A. Gómez-Méndez, A. Martínez-García, A. K. Reyes, and J. A. Rayas, "Relative error in out-of-plane measurement due to the object illumination type, (Póster)" *19th International Symposium on Optomechatronic Technology*, Cancún, México, Nov 5-7, 2018.
3. Gustavo A. Gómez-Méndez, Amalia Martínez-García, Juan Antonio Rayas, and Alexander Gaitán, "Application of ESPI to optical mechanical characterization of samples of biopolymer, (Oral Presentation)," *RIAO-OPTILAS-MOPM*, Cancún, México, Sept 23-27, 2019.