



CENTRO DE INVESTIGACIONES  
EN OPTICA, A.C.

# “USO DE SHEAROGRAFÍA PARA EL ANÁLISIS DE DEFORMACIONES DURANTE UN PROCESO DE TENSION TÉRMICA”



*“Versión final  
Incluye cambios indicados por los revisores”*

Tesis para obtener el grado de Maestra en Ciencias (Óptica)

*Presenta: Kenia María Rodríguez Camaño*

*Asesora de Tesis: Dra. Amalia Martínez García*

*León · Guanajuato · México  
Junio de 2024*

**Vo. Bo. de la asesora  
11 de junio del 2024**

## **Dedicatoria**

A mi amada familia:

Mi esposo Alvaro y nuestro hijo,  
Miguel Sebastián.

Mi mamá Fimia y hermanos:

Carlos F., Carlos J., Fimia E., José del  
Carmen (q.e.p.d.) y Yeimy A.

Mis ahijados:

Isaac, Alejandra, Thiago y Nathaly

Mi cuñada y amiga Julissa.

Familia Guerra Him.

## **Agradecimiento**

En la infinita bondad y gracia de Dios, encuentro mi agradecimiento más profundo por haberme permitido estudiar esta maestría en un país de grandes científicos y de encantadores lugares. A mi amada familia por ser la constante de paz y amor en mi vida, en quienes siempre he encontrado las fuerzas necesarias para no rendirme.

De manera muy especial, agradezco a la Dra. Amalia Martínez García por toda su paciencia, por no medirse en cuanto a compartir sus conocimientos y por todo su apoyo durante este periodo de estudios. Sin ella esto no sería posible.

Al Dr. Juan Antonio Rayas Álvarez por haberme brindado su incondicional apoyo y guía en el desarrollo del experimento. Estaré siempre agradecida.

A los ilustres doctores que han sido faros de conocimiento en mi formación durante este postgrado: Manuel Servín, Moisés Padilla, Alma Camacho, Apolinar Muñoz, Amalia Martínez, Carmelo Rosales, Luis Armando Díaz, Laura Rosales y Geminiano Martínez. De igual manera, a Dr. David Moreno, Dra. Amalia Martínez y Dr. Juan Antonio Rayas, por sus comentarios y sugerencias en este trabajo de tesis. Estarán grabados en mi memoria con respeto y cariño.

Al Centro de Investigaciones en Óptica (CIO) por permitir que extranjeros como yo podamos realizar estudios en sus instalaciones y por todo el apoyo que me han brindado en especial a Itzel Muñoz y Diana Bertadillo del DFA. También, al Taller Mecánico del CIO por brindarme las muestras para la realización del experimento de esta tesis.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por su apoyo de la beca otorgada durante el periodo 2021-2023 mediante la beca CVU 1159894 del programa 000191- MAESTRÍA EN CIENCIAS (ÓPTICA).

Agradezco a la Universidad de Panamá por darme la oportunidad de prepararme profesionalmente fuera de Panamá a través del proyecto de Relevo generacional del Departamento de Física, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología.

Agradezco a todos los amigos que me acompañaron y acogieron durante estos años, siempre los recordaré, en especial a mis colegas del Grupo de Pruebas Ópticas y Mecánicas.

## Índice

<b>Resumen</b> .....	<b>5</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>6</b>
<b>2. Interferencia</b> .....	<b>9</b>
2.1. Interferencia óptica .....	9
2.2. Interferómetro de Young y Michelson .....	12
<b>3. Técnicas de Speckle</b> .....	<b>17</b>
3.1. Patrón de moteado .....	17
3.2. Interferometría electrónica de patrones de moteado .....	20
3.3. Sistema ESPI con sensibilidad en plano .....	22
3.4. Sistema ESPI con sensibilidad fuera de plano .....	23
3.5. Vector de sensibilidad .....	24
3.6. Geometría de iluminación de un solo haz .....	24
3.7. ESPI fuera de plano .....	25
3.8. ESPI sensible en plano .....	26
3.9. Shearografía o Interferometría Electrónica de Patrones de Moteado de Desplazamiento Lateral .....	27
3.10. Demodulación de la fase .....	37
3.11. Algoritmo de desplazamiento de fase de cuatro pasos .....	37
3.12. Desenvolvimiento de la fase .....	39
<b>4. Metodología experimental y resultados</b> .....	<b>40</b>
4.1. Diseño del experimento .....	40
4.2. Presentación de los resultados obtenidos mediante shearografía. ....	43
4.3. Análisis e interpretación de las deformaciones observadas .....	50
<b>5. Conclusiones y trabajo a futuro</b> .....	<b>51</b>
<b>Referencias</b> .....	<b>54</b>
<b>Apéndice A. Códigos utilizados en Matlab</b> .....	<b>58</b>

## **Resumen**

El trabajo presentado se centra en implementar un sistema de Shearografía basado en un interferómetro de Michelson para evaluar la deformación en plano y fuera de plano de un objeto sometido a estrés térmico.

El arreglo óptico consiste en dos haces de iluminación que inciden a un mismo ángulo hacia la muestra. La luz reflejada de ambos haces entra a un interferómetro de Michelson, donde uno de los espejos equipado con un dispositivo piezoeléctrico permite el desplazamiento de fase de cuatro pasos. La muestra utilizada es una placa rectangular de aluminio sometida a estrés térmico usando una fuente de luz láser.

El propósito de este experimento consiste en trazar un mapa de deformaciones que permita identificar las regiones donde la placa metálica muestre cambios en su superficie o estructura, en respuesta a la carga térmica. Este experimento ofrece una visión del comportamiento de los materiales a las cargas térmicas, siendo fundamental para la evaluación de la integridad estructural y la detección de posibles defectos o debilidades en materiales y componentes.

# Capítulo 1

## Introducción

La Shearografía que también es conocida como Interferometría Electrónica de Patrones de Moteado de Desplazamiento Lateral (ESSPI por sus siglas en inglés: Electronic Speckle Shearing Pattern Interferometry) es una técnica óptica no destructiva basada en el fenómeno de moteado (speckle). El fenómeno de speckle se conoce desde el tiempo de Newton. Con la llegada del láser se reavivó el interés en el fenómeno y en sus aplicaciones. Las técnicas de medición basadas en el fenómeno de speckle caen en el amplio campo de la metrología de speckle. El inicio de la metrología de speckle puede ser atribuido a Leendertz en 1970 [1] seguido por otro artículo de Leendertz and Butters en 1971 [2]. Desde entonces, han surgido varios libros [3–6] y muchas publicaciones.

La metrología de speckle comprende varias técnicas tales como fotografía de speckle, interferometría de speckle y su contraparte electrónica o digital llamada interferometría electrónica de patrones de moteado (ESPI/DSPI por sus siglas en inglés: Electronic Speckle Pattern Interferometry/ Digital Speckle Pattern Interferometry). Esas técnicas miden el campo de desplazamiento del objeto cuando éste es sujeto a una fuerza externa. Por otro lado, existe interés en las mediciones de deformación ya que son la base para predecir cuánto tiempo durará un objeto funcionando sin fallas cuando se lo someta a ciertas fuerzas externas. La shearografía es una técnica de campo completo que permite medir la deformación de manera cualitativa y cuantitativa. Ofrece varias ventajas, como (i) configuración experimental simple, (ii) resiliencia a las perturbaciones ambientales y vibraciones, (iii) inmunidad a las traslaciones de cuerpos rígidos, (iv) requisito de coherencia temporal relajada y (v) sensibilidad que depende del desplazamiento (shear). Debido a estas características favorables, se ha aplicado para obtener información sobre la deformación.

El desplazamiento (Shear) se define como el posicionamiento relativo y orientación de dos haces/imágenes derivadas del mismo haz/objeto principal. Cuando la imagen de un objeto se forma vía dos caminos idénticos en el arreglo, las imágenes están perfectamente

superpuestas, no hay “shear” entre ellas aun cuando hay dos imágenes. Dado que las imágenes se obtienen a través de dos caminos independientes, las dos imágenes se pueden manipular de forma independiente. En el desplazamiento lineal, una imagen es lateralmente desplazada en cualquier dirección deseada por una cantidad apropiada. En interferometría de desplazamiento de moteado, una imagen actúa como una referencia de la otra, de aquí que no hay necesidad de introducir una onda referencia adicional. Cuando se usa interferometría de desplazamiento de moteado, se compara la respuesta de un objeto a agentes externos en cualquier punto al de un punto desplazado.

En desplazamiento rotacional, una imagen es rotada, usualmente alrededor del eje óptico, por un ángulo pequeño con respecto a la otra imagen. En el desplazamiento radial, una imagen es radialmente contraída o expandida con respecto a la otra imagen. El desplazamiento de inversión permite que un punto en  $(x, y)$  sea comparado con otro punto en  $(-x, -y)$ . Esto es equivalente a un desplazamiento rotacional de  $\pi$ . En el desplazamiento “Folding”, un punto es comparado con su imagen espejo: la imagen puede ser tomada alrededor del eje  $y$  o eje  $x$ , tabla 1.

<b>Tipos de desplazamiento (Shear)</b>	<b>Diferencia de fase que conduce a la formación de franjas.</b>
Desplazamiento lateral o lineal	$\delta(x + \Delta x, y + \Delta y) - \delta(x, y)$
Desplazamiento rotacional	$\delta(r, \theta + \Delta\theta) - \delta(r, \theta)$
Desplazamiento radial	$\delta(r \mp \Delta r, \theta) - \delta(r, \theta)$
Desplazamiento de inversión	$\delta(x, y) - \delta(-x, -y)$
Desplazamiento “Folding”	$\delta(x, y) - \delta(-x, y)$ : alrededor del eje $y$ $\delta(x, y) - \delta(x, -y)$ : alrededor del eje $x$

Tabla 1. Métodos de desplazamiento (Shear) usados en interferometría de speckle.

El uso de diversos materiales en la industria y en la investigación, demanda un análisis y estudio exhaustivo para conocer su integridad estructural, detectar los posibles defectos o tensiones residuales y también monitorear la evolución de deformaciones bajo cargas mecánicas o térmicas, de diferentes materiales y estructuras, de modo que nos permita determinar la durabilidad, el rendimiento y la seguridad de éstos.

En la actualidad, existen sistemas o equipos de análisis mecánicos y térmicos de distintos materiales que producen un resultado funcional al momento de determinar las características de cada material, sin embargo, éstos poseen ciertas limitaciones como altos costos y algunos pueden llegar a afectar al material. He allí la importancia de seguir trabajando en técnicas como la Shearografía, por los muchos beneficios que ésta posee.

Por muchos años, se ha empleado la técnica de Shearografía para estudiar materiales, ya que es una técnica de prueba no destructiva (NDT por sus siglas en inglés: Nondestructive Testing) que utiliza interferometría de moteado para medir los esfuerzos y deformaciones de la superficie. Básicamente, consiste en aplicar una carga (mecánica o térmica) controlada y repetible al material de prueba y luego determinar la deformación resultante utilizando luz láser e imágenes que contienen patrones de interferencia [1].

Este trabajo de tesis se enfoca en la utilización de la técnica de Shearografía para la evaluación de la deformación fuera de plano de una placa metálica bajo una carga térmica utilizando como método de desplazamiento un interferómetro de Michelson, con el propósito de encontrar o descartar algún defecto del material y evaluar la deformación del material, así como la técnica de desplazamiento de fase de cuatro pasos en la evaluación de la fase del interferograma.

El objetivo general de este trabajo consiste en implementar un sistema de Shearografía basado en un interferómetro de Michelson para la evaluación de la deformación fuera de plano de un objeto de prueba bajo estrés térmico.

El trabajo de tesis está estructurado de la siguiente manera: En el capítulo 1, se presenta algunos antecedentes, el objetivo del trabajo y la estructura de la tesis. El capítulo 2 corresponde a conceptos básicos de la interferometría, el capítulo 3 aborda específicamente el fenómeno del moteado, técnicas ESPI y Shearografía, incluyendo una breve descripción de desplazamiento de fase. En el capítulo 4 se presenta el diseño experimental, así como los resultados obtenidos y su respectivo análisis. En el capítulo 5 se presenta las conclusiones generales de la tesis, así como el trabajo a futuro. Se incluyen las referencias en la parte de bibliografía en las que está basado el presente trabajo. Finalmente, en el apéndice A se presentan los algoritmos desarrollados en código MATLAB para el análisis y visualización de los resultados.



# Capítulo 2

## Interferencia

La interferencia óptica corresponde a la interacción de dos o más ondas de luz que conducen a una irradiancia resultante que se desvía de la suma de la irradiancia de las componentes.

Existen muchos sistemas ópticos que producen interferencia, aquí se describirán unos pocos.

Los mecanismos interferométricos se dividen en dos grupos: por división del frente de onda y división de amplitud. En la primera instancia, porciones del frente de onda primario son usadas ya sea directamente como fuentes para emitir ondas secundarias o en conjunto con mecanismos ópticos para producir fuentes virtuales de ondas secundarias. Esas ondas secundarias son traídas juntas para luego interferir. En el caso de división de amplitud, la onda primaria es dividida en dos segmentos, los cuales viajan en diferentes caminos antes de ser recombinadas e interferir.

La interferometría es una técnica óptica muy utilizada que con el paso de los años ha ido revolucionado la forma en que podemos medir y analizar distintos fenómenos físicos. En este capítulo, se explican los principios básicos de la interferencia de la luz, así como los interferómetros mejor conocidos históricamente que corresponden al experimento de Young (división del frente de onda) y el interferómetro de Michelson (división de amplitud).

### 2.1. Interferencia óptica

Es importante mencionar que cuando iluminamos una superficie, esa cantidad de luz es conocida como *irradiancia* ( $I$ ), la cual se puede definir como la energía media por unidad de área y por unidad de tiempo [7–10]; también se puede relacionar la irradiancia con el campo eléctrico en una onda electromagnética de modo que  $I = \varepsilon_0 c \langle \vec{E}^2 \rangle_T$ , donde  $\varepsilon_0$  representa la permitividad del vacío,  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $\vec{E}$  es el campo eléctrico vectorial.

Si consideramos las irradiancias relativas dentro del mismo medio en un punto determinado, las constantes  $\varepsilon_0 c$  pueden ser omitidas y estableceremos que la irradiancia puede ser expresada por la siguiente ecuación:

$$I = \langle \vec{E}^2 \rangle_T \quad (2.1)$$

Donde  $\langle \vec{E}^2 \rangle_T$  representa el promedio temporal de la magnitud de intensidad de campo eléctrico al cuadrado[2–4] por lo que:

$$\vec{E}^2 = \vec{E} \cdot \vec{E} \quad (2.2)$$

$$\vec{E}^2 = (\vec{E}_1 + \vec{E}_2) \cdot (\vec{E}_1 + \vec{E}_2) \quad (2.3)$$

$$\vec{E}^2 = \vec{E}_1^2 + \vec{E}_2^2 + 2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \quad (2.4)$$

De modo que, si se promedia ambos lados, la irradiancia queda expresada de la siguiente forma:

$$I = I_1 + I_2 + I_{12} \quad (2.5)$$

Teniendo en cuenta que cada termino representa lo siguiente:

$$I_1 = \vec{E}_1^2 \quad (2.6)$$

$$I_2 = \vec{E}_2^2 \quad (2.7)$$

$$I_{12} = 2\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle_T \quad (2.8)$$

La expresión que se muestra en la ecuación (2.8) se le llama “*término de interferencia*”. Si la luz se comportara sin interferencia, tal como pasa con las partículas clásicas, no existiría ese término. Sin embargo, este término es importante porque nos indica la naturaleza ondulatoria de la luz, que puede indicar un aumento o disminución de la irradiancia a través de la interferencia [8].

Considerando el término de la ecuación (2.8). El producto de los campos eléctricos da como resultado:

$$\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 = \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos(ks_1 - \omega t + \phi_1) \cos(ks_2 - \omega t + \phi_2) \quad (2.9)$$

Donde  $\vec{E}_{01}$  y  $\vec{E}_{02}$  son las magnitudes de los campos eléctricos,  $k$  es el número de onda,  $s_1$  y  $s_2$  son las posiciones,  $\omega$  es la frecuencia angular,  $t$  es el tiempo y  $\phi_1$  y  $\phi_2$  son las fases iniciales.

Simplificamos introduciendo  $\alpha \equiv ks_1 + \phi_1$  y  $\beta \equiv ks_2 + \phi_2$  resultando en:

$$\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 = \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos(\alpha - \omega t) \cos(\beta - \omega t)$$

Aplicando la identidad trigonométrica de la fórmula del producto de cosenos  $\cos(a) \cos(b) = \frac{1}{2} [\cos(a - b) + \cos(a + b)]$  de este modo:

$$\begin{aligned} & \cos(\alpha - \omega t) \cos(\beta - \omega t) \\ &= \frac{1}{2} [\cos((\alpha - \omega t) - (\beta - \omega t)) + \cos((\alpha - \omega t) + (\beta - \omega t))] \end{aligned}$$

Simplificando los argumentos dentro de las funciones coseno, obtenemos:

$$\frac{1}{2} [\langle \cos(\alpha - \beta) \rangle + \langle \cos(\alpha + \beta - 2\omega t) \rangle]$$

Insertando la identidad trigonométrica simplificada de modo que:

$$\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 = \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \left[ \frac{1}{2} \langle \cos(\alpha - \beta) \rangle + \langle \cos(\alpha + \beta - 2\omega t) \rangle \right]$$

Dado que buscamos componentes estacionarios o promedios a largo plazo, el término  $\cos(\alpha + \beta - 2\omega t)$  puede considerarse como 0 en el promedio temporal sobre intervalos de tiempo largos y teniendo en cuenta que la diferencia de fase  $\delta$  se puede definir como  $\delta = \alpha - \beta$ . Esto significa que el primer término,  $\cos(\alpha - \beta)$  es simplemente  $\cos \delta$ . Por lo tanto:

$$\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 = \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos \delta$$

La diferencia de fase se define como:

$$\delta = k(s_2 - s_1) + (\phi_2 - \phi_1) \quad (2.10)$$

El valor promedio del cuadrado de una función coseno oscilante,  $\cos^2(x)$  sobre un periodo completo es  $\frac{1}{2}$ . Este resultado se deriva del hecho de que el cuadrado de una función coseno oscila entre 0 y 1, y su promedio sobre un ciclo completo de oscilación es  $\frac{1}{2}$  reflejando la distribución uniforme de su cuadratura. Dicho esto, los términos de irradiancia  $I_1$  y  $I_2$  asociados a cada campo eléctrico quedaran expresados como:

$$I_1 = \langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_1 \rangle = E_{01}^2 \langle \cos^2(\delta) \rangle = \frac{1}{2} E_{01}^2 \quad (2.11)$$

$$I_2 = \langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle = E_{01}^2 \langle \cos^2(\delta) \rangle = \frac{1}{2} E_{01}^2 \quad (2.12)$$

Donde  $E_{01}^2$  y  $E_{02}^2$  representan la amplitud máxima del campo eléctrico  $\vec{E}_1$  y  $\vec{E}_2$  respectivamente, por lo que la irradiancia resultante de la interferencia entre los dos campos  $I_{12}$  es:

$$I_{12} = 2\sqrt{I_1 I_2} \langle \cos \delta \rangle \quad (2.13)$$

Y finalmente la irradiancia total se obtiene sumando las contribuciones de irradiancia de cada campo y su término de interferencia, la cual queda expresada como,

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \langle \cos \delta \rangle \quad (2.14)$$

Ahora bien, la *interferencia óptica* ocurre cuando dos o más ondas de luz interactúan dando como resultado una irradiancia que difiere de la simple suma de las irradiancias de las ondas individuales [7–11]. Cabe enfatizar que la intensidad de la suma de las dos ondas no es la suma de sus intensidades, de modo que puede existir la interferencia constructiva o destructiva [3, 12], si  $\cos \delta = 1$  le llamamos *interferencia constructiva total* y en el caso que  $\cos \delta = -1$  le llamamos *interferencia destructiva total*. Visualmente, la interferencia constructiva se verá como puntos brillantes, mientras que la interferencia destructiva se verá como puntos opacos u oscuros [7–9, 13].

## 2.2. Interferómetro de Young y Michelson

Los interferómetros son dispositivos o arreglos ópticos que se basan en el fenómeno de interferencia óptica que nos permite observar patrones de interferencia que se pueden mostrar como franjas brillantes y oscuras, con el propósito de realizar diversos estudios según el fenómeno físico que se estudie. Existen varios tipos de interferómetros, cada uno con su principio de funcionamiento específico y diversas aplicaciones, sin embargo, a continuación, nos enfocaremos en el interferómetro de Young y Michelson.

### 2.2.1. Interferómetro de Young

El interferómetro de Young es un interferómetro de división de frente de onda y es considerado un interferómetro simple pero muy importante ya que permite demostrar la

naturaleza ondulatoria de la luz, el cual consiste en dividir un haz de luz ( $s$ ) en dos haces ( $s_2$  y  $s_1$ ) por medio de una rendija y luego ambos haces se recombinan. Estos se propagan en diferentes direcciones desde la rendija hasta la pantalla de observación. Cuando las ondas llegan a la pantalla, se superponen y se produce un patrón de interferencia, que se puede utilizar para medir la diferencia en las longitudes de trayectoria de los dos haces.

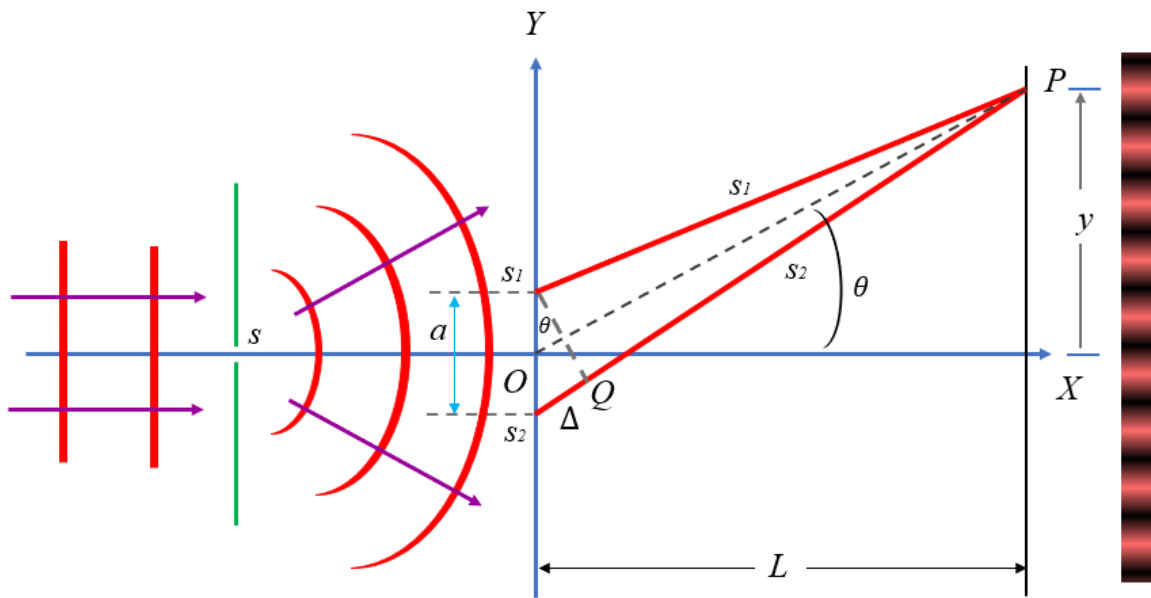


Figura 2.1. Esquema del experimento de Young [3].

Visualmente, el patrón de interferencia es una serie de bandas brillantes y oscuras, llamadas franjas. La distancia entre las franjas es directamente proporcional a la longitud de onda de la luz. Esto significa que, al medir la distancia entre las franjas, es posible determinar la longitud de onda de la luz, siempre y cuando se conozca la distancia de las rendijas a la pantalla y la separación entre las rendijas.

A partir de la figura 2.1 podemos expresar la irradiancia en el punto P que está a una distancia L del plano que contiene la doble rejilla  $S_1$  y  $S_2$ , pero antes hay que determinar la diferencia de fase entre las dos ondas que llegan al punto de observación P. Al trazar la recta  $S_1Q$  cortando a la línea SP en Q, lo que indica que  $s_2 - s_1$  es igual al segmento  $\Delta$ . Considerando que  $S_1Q$  forma un cateto del triángulo rectángulo  $S_1S_2Q$ , si  $\theta$  es el ángulo entre los segmentos de línea  $S_1S_2$  y  $S_1Q$  entonces  $\Delta = a \text{ sen } \theta$ . Se puede aproximar  $\theta$  con el ángulo entre el eje óptico  $OX$  y la recta trazada desde el punto medio  $O$  entre  $S_1S_2$  hasta el punto P en la

pantalla. Los lados correspondientes de los dos ángulos están relacionados de modo que  $OX \perp S_1S_2$  y  $OP \approx \perp S_1Q$  por lo que:

Para la interferencia constructiva diremos que,

$$s_2 - s_1 = \Delta = m\lambda \cong a \operatorname{sen}(\theta) \quad (2.15)$$

Y para la interferencia destructiva,

$$\Delta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \cong a \operatorname{sen}(\theta) \quad (2.16)$$

Generalmente, las amplitudes del campo eléctrico de los dos haces que se originan en la rejilla son casi las mismas por lo que la irradiancia en el punto P se encuentra de la siguiente manera:

$$I = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\pi\Delta}{\lambda}\right) = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\pi a \operatorname{sen}(\theta)}{\lambda}\right) \quad (2.17)$$

En cambio, para los puntos P cercanos al eje óptico, donde  $y \ll L$  podemos aproximarlos aún más de modo que

$$I = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\pi ay}{\lambda L}\right) \quad (2.18)$$

### 2.2.2. Interferómetro de Michelson

El interferómetro de Michelson es un interferómetro de división de amplitud que consiste en el uso de dos espejos ( $M_1$  y  $M_2$ ) que están separados por una distancia determinada y se ubican perpendicularmente entre sí como se muestra en la figura 2.2, en medio se coloca un divisor de haz (BS), de modo que al incidir el haz de una fuente de iluminación (S) este se divide en dos haces, uno es reflejado al espejo  $M_1$  y otro es transmitido hacia el espejo  $M_2$ . Luego, los dos haces se reflejan en cada espejo, regresando al divisor de haz de modo que el haz del espejo 1 se transmite y el haz del espejo 2 se refleja, ambos se dirigen al detector (puede ser una cámara CCD) y se observa el patrón de interferencia.

El patrón de interferencia depende de la diferencia en la longitud de camino óptico recorrida por los dos haces, la cual puede ajustarse modificando la posición relativa de uno de los espejos. Los cambios en esta diferencia de camino óptico alteran la fase relativa de los dos

haces al combinarse, lo que se manifiesta como cambios en el espaciado de las franjas claras y oscuras en el patrón de interferencia. Este patrón es frecuentemente utilizado para realizar mediciones precisas de distancias o longitudes, así como para estudiar las propiedades ópticas de materiales.

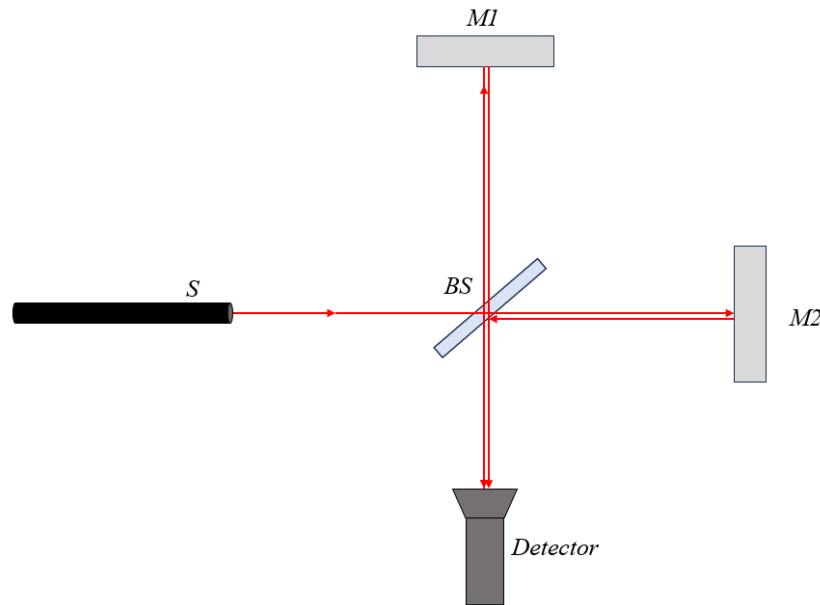


Figura 2.2. Esquema del interferómetro de Michelson.

El espejo  $M_2$  se puede inclinar a cierto ángulo  $\theta$  con respecto al eje óptico y el espejo  $M_1$  permanece fijo. Ambos espejos se ubican a igual distancia del divisor de haz. La diferencia de camino óptico de los dos haces que emergen del interferómetro se expresa como:

$$\Delta_s = 2d \cos\theta \quad (2.19)$$

Donde  $\theta$  es el ángulo de inclinación de los haces con respecto al eje óptico. Si un espejo se encuentra a una distancia  $d$  mayor que el otro respecto al divisor de haz, el haz que recorre la ruta más larga acumula esta distancia extra dos veces, una antes y otra después de la reflexión. Además, para que los dos haces interfieran constructivamente y lo hagan de manera repetida a medida que uno de los espejos se desplaza, es necesario que la separación entre ellos no exceda la llamada longitud de coherencia de la fuente. La longitud de coherencia representa la distancia a lo largo de un tren de ondas en la que la fase de la onda permanece correlacionada. La longitud de coherencia de la luz emitida por una fuente específica depende de la velocidad de la luz  $c$  y la dispersión de frecuencias presentes en la fuente [9].

El efecto de inclinar un espejo dentro del interferómetro de Michelson afecta la interferencia observada. Este detalle es crucial en la medición de la forma de superficies, topografía de la muestra.

La aplicación del interferómetro de Michelson en la medición de topografía se basa en la capacidad del interferómetro para detectar variaciones en la fase de la luz reflejada, las cuales están directamente relacionadas con las diferencias en la altura de la superficie que se está examinando. Para cuantificar estas variaciones, es esencial relacionar la diferencia de camino óptico con la fase de la luz y, posteriormente, con la altura de la topografía de la superficie.

La relación entre la diferencia de camino óptico  $\Delta L$  y la fase  $\phi$  puede expresarse mediante la ecuación:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L$$

Además, la relación entre la fase  $\phi$  y la altura  $z$  de la topografía puede modelarse como:

$$z = \frac{\lambda}{2\pi} \phi$$

Esta ecuación permite convertir las variaciones de fase medidas por el interferómetro en mediciones directas de altura, facilitando así una representación precisa de la topografía de la superficie.



# Capítulo 3

## Técnicas de Speckle

El fenómeno de speckle es en sí mismo esencialmente un fenómeno de interferencia. Sin embargo, cuando se adiciona un haz de referencia al patrón de speckle para codificar su fase, la técnica es entonces denominada como *interferometría de speckle*. La interferometría de speckle fue primero aplicada para medir el campo de desplazamiento en plano por Leendertz.

Este capítulo trata el concepto de speckle así como de su clasificación, la técnica de Interferometría electrónica de patrones de moteado (ESPI por sus siglas en inglés: Electronic Speckle Pattern Interferometry), Shearografía o Interferometría Electrónica de Patrones de Moteado de Desplazamiento Lateral (ESSPI por sus siglas en inglés: Electronic Speckle Shearing Pattern Interferometry), así como de la teoría asociada al vector de sensibilidad. Finalmente se explica el método de desplazamiento de fase de cuatro pasos.

### 3.1. Patrón de moteado

Cuando iluminamos con luz coherente una superficie rugosa, la luz se refleja en diferentes direcciones produciendo así un patrón de interferencia aleatorio, que produce un efecto visual granulado, al cual se le conoce como *patrón de moteado* [14, 15]. El patrón de moteado es parecido a un montón de puntos o motas brillantes y oscuras [14], que aparecen a medida que se reflejan las ondas de luz. Esto ocurre, dado que en una superficie rugosa existe una distribución aleatoria de irregularidades, es como si diversos puntos tuvieran diversas alturas, por lo tanto, la luz al incidir en esa superficie se refleja e interfiere formando así las motas. En la figura 3.1 se puede observar la formación de motas oscuras y brillantes. Las motas brillantes surgen cuando las ondas de luz que llegan al detector están en fase y las motas oscuras cuando las ondas de luz están fuera de fase. Su tamaño está relacionado con la rugosidad de la superficie, lo que significa que, si se mide el tamaño de estas motas, podemos determinar la rugosidad de la superficie del material [15].

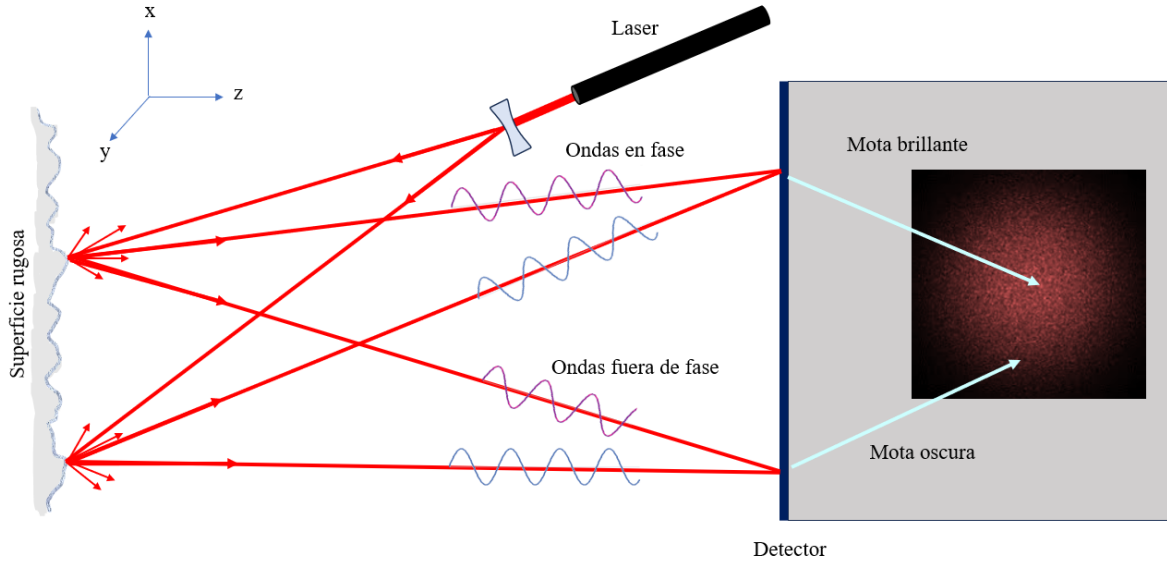


Figura 3.1. Formación del patrón de moteado [16].

El moteado puede originarse tanto de manera objetiva como subjetiva. Un patrón de moteado objetivo se forma en el espacio libre y se puede registrar si se coloca un detector en el plano de imagen. En este caso, el patrón de moteado formado depende de la geometría del esquema y la longitud de onda de la fuente de iluminación [15]. Se puede calcular el tamaño de la mota usando la siguiente ecuación:

$$\Delta x_s = \frac{\lambda Z}{L} \quad (3.1)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda,  $Z$  es la distancia entre la superficie y el plano imagen y  $L$  es el tamaño de la zona iluminada. Estos parámetros se pueden apreciar en la figura 3.2.

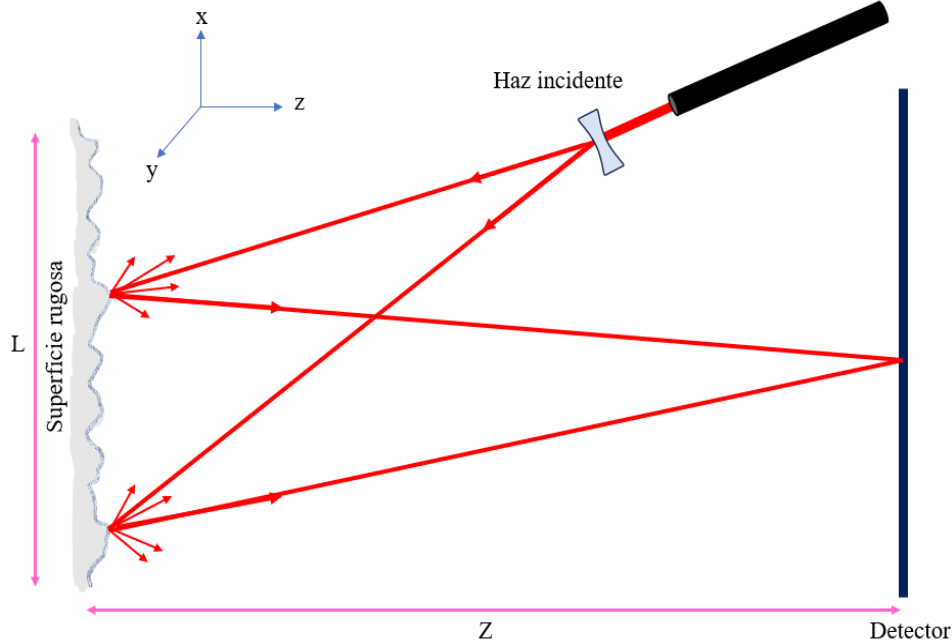


Figura 3.2. Formación del patrón de moteado objetivo.

En cambio, el patrón de moteado subjetivo ocurre cuando se observa el moteado a través de un sistema óptico, el cual se forma por la superposición de amplitudes complejas de la función de dispersión de puntos en el plano imagen o detector. Así, si fotografiamos una imagen moteada con una cámara, obtendremos una imagen subjetiva, ya que sus parámetros ya dependerán del objetivo de la cámara, se puede medir tomando el disco de Airy [15]. El diámetro del disco de Airy es crucial porque determina la resolución máxima del sistema óptico. En términos de un patrón de moteado, afecta cómo se visualizan las motas, para obtener el diámetro del disco de Airy  $d_s$  se establece que:

$$d_s = 1.22 \frac{\lambda Z_i}{D} \quad (3.2)$$

Donde  $Z_i$  es la distancia entre el plano imagen y la lente y  $D$  es el diámetro de la pupila. Estos parámetros se pueden apreciar en la figura 3.3. Según la ecuación 3.2, dos puntos deben estar separados por una cantidad mayor o igual que el diámetro del disco de Airy para que sus fases sean independientes, es decir que las propiedades de la luz en dos puntos diferentes no se afecten entre sí [5, 17]. Si la separación entre los puntos es menor que esta distancia crítica, sus intensidades y fases se influenciarán mutuamente debido a la superposición de las ondas de luz que los forman.

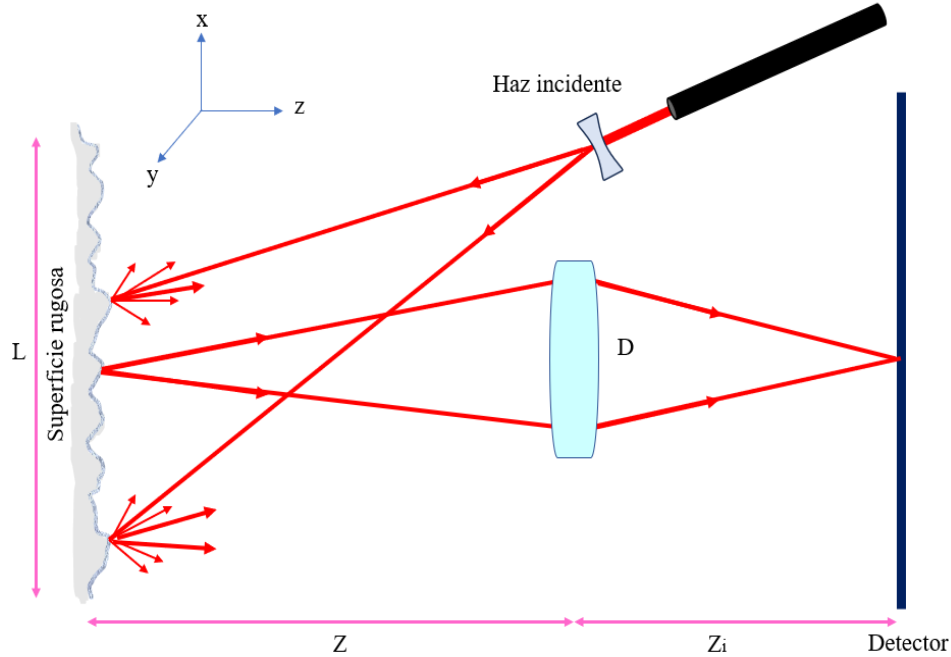


Figura 3.3. Formación del patrón de moteado subjetivo.

A partir del uso del patrón de moteado surgió la “interferometría de moteado” la cual es considerada como una de las técnicas de prueba no destructiva (NDT) e involucra principios ópticos para medir componentes de desplazamiento fuera de plano y en plano, deformaciones, pendientes, curvaturas o contorneo y hasta vibraciones en un objeto, teniendo en cuenta la geometría de iluminación. La interferometría de moteado permite monitorear superficies rugosas de objetos con alta sensibilidad [15].

### 3.2. Interferometría electrónica de patrones de moteado

En ESPI, el patrón de franjas correspondiente a un desplazamiento fue grabado originalmente en una película fotográfica. En lugar de utilizar el proceso fotográfico que es lento, se llevó a cabo el registro electrónico que dio como resultado un método de medición versátil llamado Interferometría electrónica de patrón de moteado (ESPI).

Se puede utilizar una cámara CCD para detectar la irradiancia. No se requiere una alta resolución porque la cámara sólo tiene que resolver motas individuales y éstas se hacen más

grandes ajustando la apertura de la lente de la cámara. Teniendo en cuenta que la ecuación que describe el tamaño del speckle es  $d = \frac{\lambda z}{D}$  donde  $d$  es el diámetro del speckle,  $\lambda$  es la longitud de onda,  $z$  es la distancia desde el plano de observación (la cámara CCD) hasta el plano donde se forman los speckles (la superficie del objeto) y  $D$  es el diámetro de la apertura de la lente de la cámara o el sistema óptico que ilumina el objeto. La calidad de las franjas está limitada por el número de motas dentro de un píxel determinado. Se puede obtener una calidad óptima de franjas cuando las motas están completamente resueltas y la intensidad del haz de referencia es aproximadamente igual a la intensidad promedio del patrón de moteado del haz del objeto.

El interés continuo en el método ESPI se debe a las siguientes razones:

- ✓ Naturaleza sin contacto de la medición con precisión submicrométrica.
- ✓ La posibilidad de llegar a zonas remotas.
- ✓ Almacenamiento de datos para su análisis en una etapa posterior.
- ✓ Análisis cuantitativo usando método de desplazamiento de fase o modulación de fase continua.
- ✓ Sensibilidad variable.

El sistema ESPI se puede utilizar para medir desplazamientos y deformación dentro y fuera del plano, contorno de superficies y análisis de vibración. La figura 3.4 contiene una parte óptica que genera los interferogramas moteados y una parte electrónica que genera franjas para su respectivo análisis.

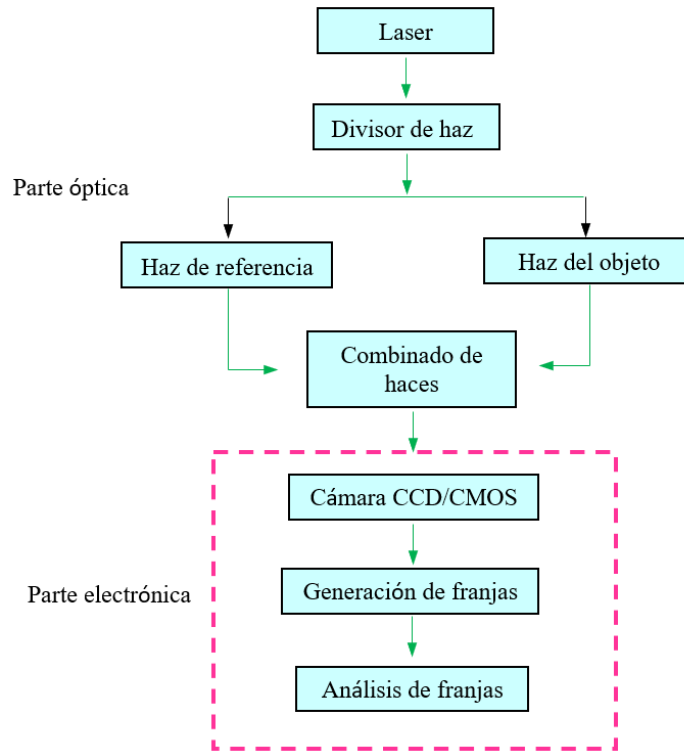


Figura 3.4. Estructura de un sistema ESPI incluyendo las partes óptica y electrónica.

### 3.3. Sistema ESPI con sensibilidad en plano

En general deseamos medir las componentes de desplazamiento en las tres dimensiones. El sistema de coordenadas es mostrado en la figura 3.5. Las componentes de desplazamiento a lo largo de la dirección del eje  $z$  son las componentes fuera de plano, y aquellas a lo largo de los ejes  $x$  y  $y$  son las componentes en plano.

En ingeniería la obtención de la información referente a esfuerzo y deformación es esencial. La figura 3.5 muestra un sistema ESPI con sensibilidad en plano. Mide las componentes de desplazamiento a lo largo del eje  $y$ . En este sistema dos haces iluminan el objeto a un mismo ángulo (iluminación dual) con respecto al eje óptico. No hay un haz de referencia específico en este sistema, pero uno de los dos haces puede actuar como un haz de referencia y el otro como un haz del objeto. El eje óptico de la cámara debe estar a lo largo de la normal de la superficie para hacer que el sistema óptico solamente mida las componentes de desplazamiento en plano. Los patrones de speckle generados por los dos haces de iluminación son traídos hacia el plano focal de la cámara CCD usando una lente. Esos dos haces

interfieren y producen un patrón de interferencia de speckle. Las imágenes de los dos patrones de interferencia de speckle diferentes se graban cuando el objeto está en reposo y para posiciones de desplazamiento del mismo, se sustraen uno del otro para obtener las franjas de correlación de speckle.

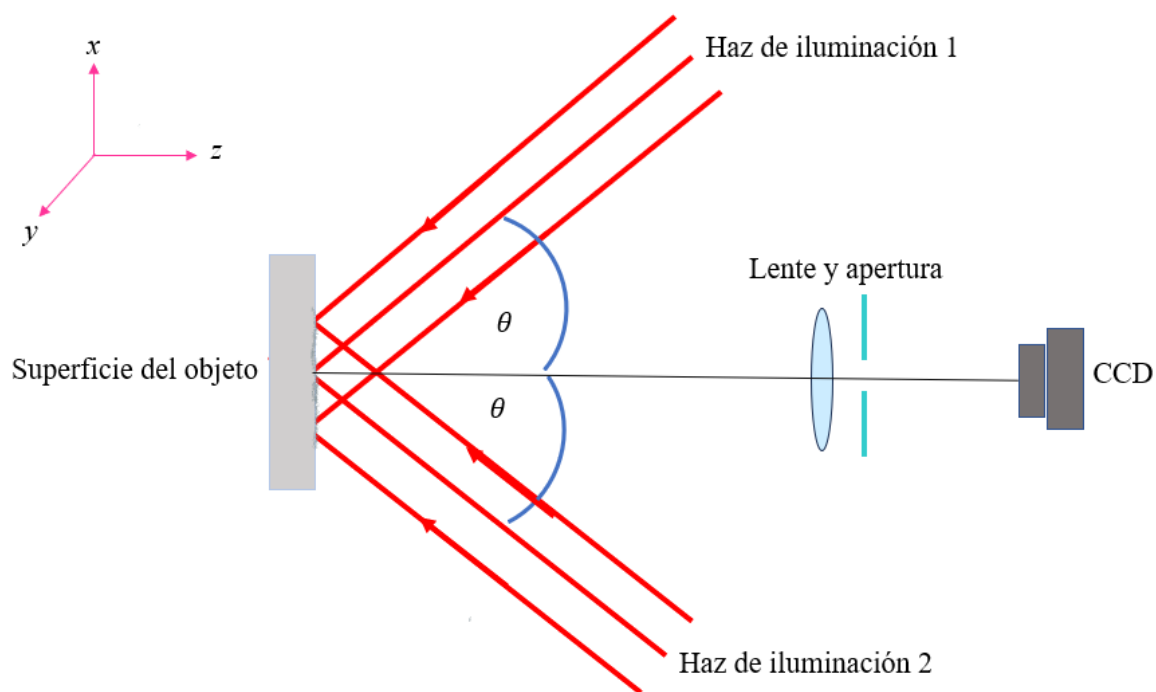


Figura 3.5. Configuración óptica de un sistema ESPI en plano.

### 3.4. Sistema ESPI con sensibilidad fuera de plano

En la figura 3.6 se muestra un sistema ESPI con sensibilidad fuera de plano. Por simplicidad el láser y algunas componentes estándar han sido omitidas. La luz láser proveniente de la fuente se divide en dos haces usando un divisor de haz

Uno de los haces ilumina el objeto de prueba y el otro sirve como haz de referencia. El ángulo de iluminación  $\theta$  debe ser pequeño para que el sistema tenga poca sensibilidad a las componentes de desplazamiento en plano y máxima sensibilidad a las componentes de desplazamiento fuera de plano. El haz de referencia es traído en línea con el haz del objeto usando un divisor de haz y ajustando su posición de tal forma que el haz de referencia debe parecer proveniente del centro de la apertura del sistema (para evitar franjas interferométricas clásicas). El eje óptico de la cámara CCD debe ser coaxial con la normal de la superficie del objeto de prueba en el sistema ESPI sensible a fuera de plano. Los haces de referencia y del

objeto son traídos hacia el plano focal de la cámara CCD para grabar el patrón de interferencia cuando el objeto está en reposo y en posiciones diferentes de desplazamientos.

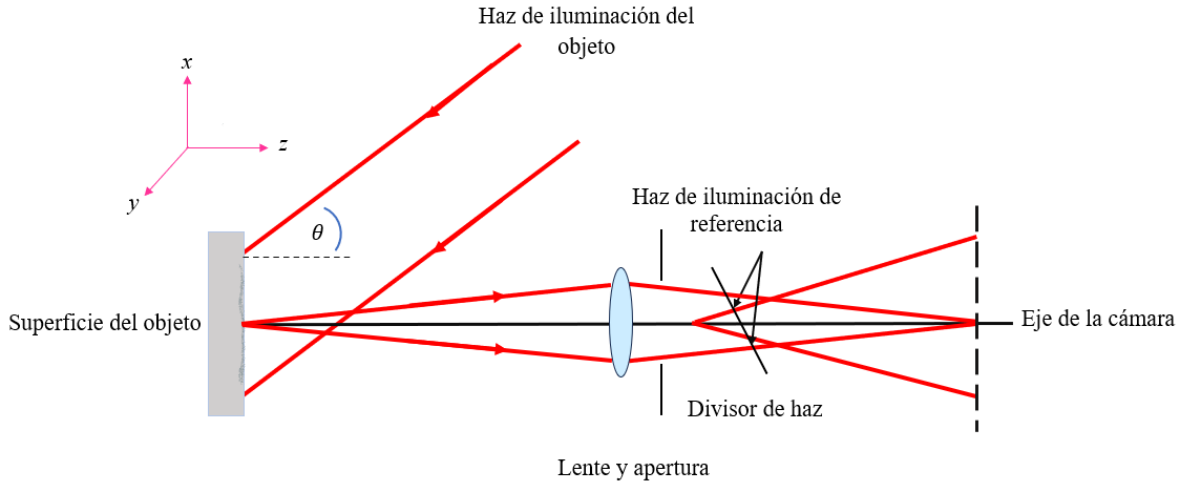


Figura 3.6. Configuración óptica de un sistema ESPI fuera de plano.

### 3.5. Vector de sensibilidad

Cualquiera de los interferómetros con dos haces es capaz de medir las componentes de desplazamiento. La magnitud de la componente es determinada por el vector de sensibilidad, el cual es función de las direcciones de iluminación y observación. El vector de sensibilidad es también usado para establecer una relación entre el cambio de fase y el desplazamiento.

### 3.6. Geometría de iluminación de un solo haz

La geometría correspondiente a un solo haz de iluminación se muestra en la figura 3.7. Sea  $\theta_1$  el ángulo de iluminación con respecto a la normal de la superficie del objeto y  $\theta_2$  el ángulo de observación con respecto a la misma normal del haz disperso. Bajo deformación el punto bajo observación se mueve una distancia  $\vec{d} = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k}$  de su posición inicial.

El cambio de fase debido al desplazamiento es:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\hat{k}_2 - \hat{k}_1) \cdot \vec{d} = \frac{2\pi}{\lambda} [w(\cos \theta_1 + \cos \theta_2) + v(\sin \theta_1 - \sin \theta_2)] \quad (3.3)$$

Donde  $\vec{e} = \hat{k}_2 - \hat{k}_1$  llamado vector de sensibilidad y  $\hat{k}_1, \hat{k}_2$  son los vectores de propagación de las direcciones de observación e iluminación respectivamente, y  $\lambda$  es la longitud de la luz



láser.  $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$  son los vectores unitarios a lo largo de los ejes  $x, y$  y  $z$ .  $u, v$  son las componentes de desplazamiento en plano y  $w$  es la componente de desplazamiento fuera de plano.

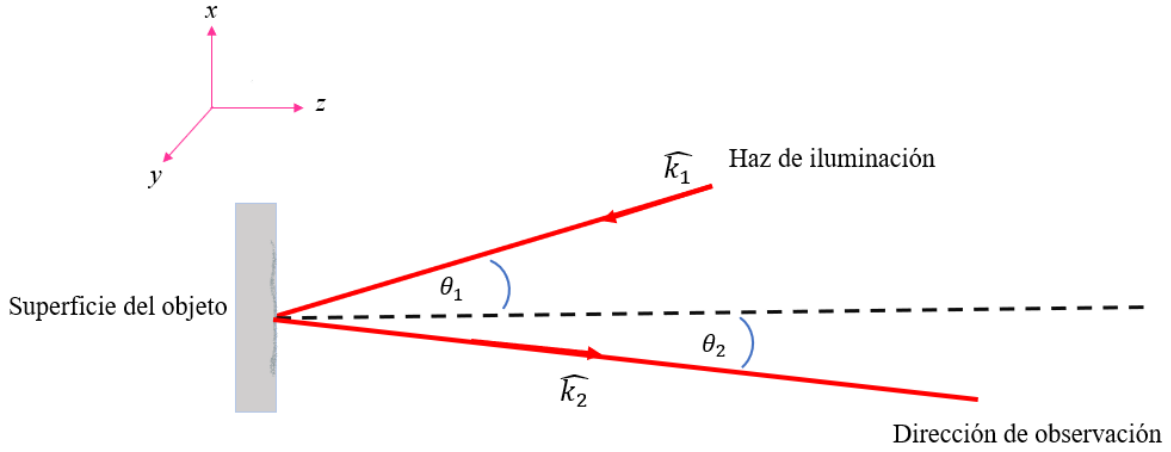


Figura 3.7. Un haz de iluminación y geometría de observación.

### 3.7. ESPI fuera de plano

Cuando  $\theta_1 = \theta$  y  $\theta_2 = 0$  es decir, la iluminación viene desde un ángulo  $\theta$  con respecto a la normal y la observación es directamente en el eje normal, el cambio de fase  $\phi$  es influenciado tanto por desplazamientos fuera de plano (componente  $w$ ) como por componentes tangenciales (componente  $v$ ) debido al ángulo de iluminación:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} [w(1 + \cos \theta) + v \sin \theta] \quad (3.4)$$

Es posible escoger que la dirección de iluminación este cercana a la normal de la superficie ( $\theta$  pequeño o cercano a 0), la componente tangencial  $v \sin \theta$  se vuelve insignificante, entonces el sistema es sensible solamente a las componentes fuera de plano. El cambio de fase es reescrito como:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos \theta)w \quad (3.5)$$

Cuando las direcciones de iluminación y observación están a lo largo de la normal de la superficie entonces el cambio de fase llega a ser:

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} w \quad (3.6)$$

### 3.8. ESPI sensible en plano

En el caso de un sistema ESPI sensible en plano el objeto de prueba es iluminado por dos haces de iluminación de manera simétrica con respecto al eje óptico. La figura 3.8 muestra un sistema ESPI general sensible en plano. El objeto es iluminado por dos haces a ángulos  $\theta_1$  y  $\theta'_1$  respectivamente. Los ángulos de iluminación y observación son medidos con respecto a la normal de la superficie. El ángulo de observación es  $\theta_2$ . Los haces dispersados son observados en la misma dirección a lo largo del vector de propagación  $\hat{k}_2$ . Cuando el objeto es desplazado entonces los cambios en fase en ambos haces dispersados es relacionada a la diferencia de camino óptico como:

$$\phi = (\hat{k}_1 - \hat{k}'_1) \cdot d = \frac{2\pi}{\lambda} [v(\sin \theta_1 + \sin \theta'_1) + w(\cos \theta_1 - \cos \theta'_1)] \quad (3.7)$$

Donde  $\vec{e} = \hat{k}_1 - \hat{k}'_1$  es el vector de sensibilidad y  $\hat{k}_1$  y  $\hat{k}'_1$  son los vectores de propagación a lo largo de los haces de iluminación respectivamente y  $\hat{k}_2$  es el vector de propagación a lo largo de la dirección de observación.

En el caso particular donde  $\theta_1 = \theta'_1 = \theta$  entonces la diferencia de fase llega a ser:

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} (v \sin \theta) \quad (3.8)$$

Esto muestra que el sistema es solamente sensible a componentes en plano.

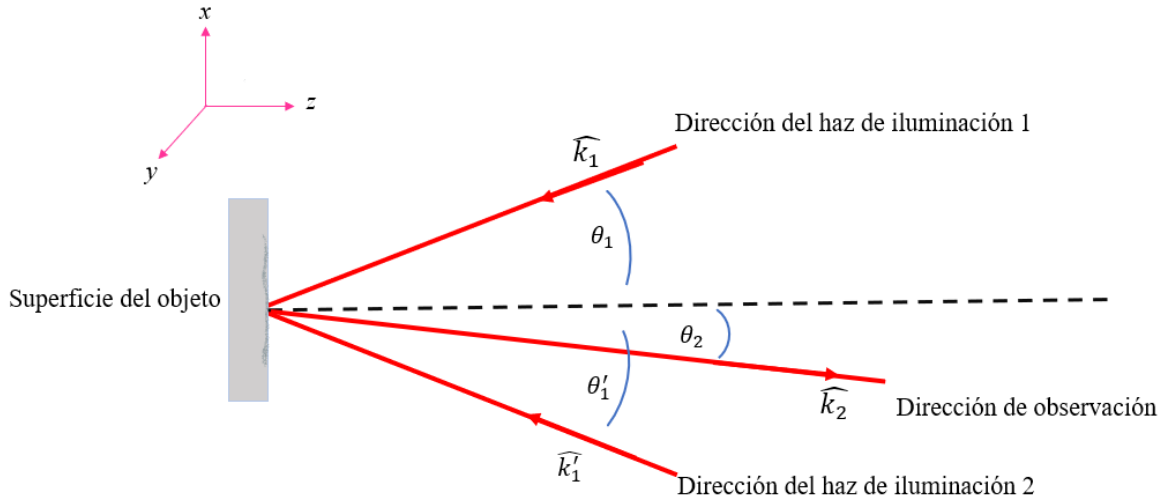


Figura 3.8. Geometría de dos haces de iluminación con sus vectores de propagación.

### 3.9. Shearografía o Interferometría Electrónica de Patrones de Moteado de Desplazamiento Lateral

Se ha discutido la técnica de ESPI que mide las componentes de desplazamiento únicamente. Sin embargo, en análisis de esfuerzos son más interesantes las deformaciones que los desplazamientos. Entonces en esta técnica para la evaluación del campo de deformación, el campo de desplazamiento se adecua numéricamente y luego se obtiene la derivada. Este procedimiento podría conducir a errores grandes. Por consiguiente, se han investigado métodos donde el patrón de franjas represente directamente la derivada del campo de desplazamiento. Esto se lleva a cabo con la interferometría de desplazamiento también conocida como shearografía. Ya que todas las técnicas de speckle para medir el desplazamiento usa speckles subjetivos (es decir, grabados en el plano imagen), el estudio se restringe al desplazamiento en el plano de la imagen.

Ya que la shearografía mide las derivadas del desplazamiento, es importante saber que podría medir la shearografía en el tensor de deformación. El tensor de deformación  $S$  está dado por [18]:

$$S = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} \\ \gamma_{yx} & \varepsilon_y & \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} & \gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Donde  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  son las componentes de deformación normales (normal strain components),  $\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yx}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}, \gamma_{zy}$  son las componentes de deformación angulares (shear strain components). Las cantidades realzadas en color son las que pueden ser medidas por shearografía. Debe ser notado que shearografía solamente mide deformaciones superficiales del objeto. Una caracterización completa del campo de deformación de la superficie puede ser llevada a cabo al medir seis componentes de la derivada del desplazamiento de las cuales dos son fuera de plano y cuatro son componentes de la derivada de desplazamiento en plano [18].

Las relaciones entre las deformaciones y los esfuerzos se realizan a través del Módulo de Young  $E$  y la Razón de Poisson  $\nu$

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} \qquad \varepsilon_y = \varepsilon_z = -\nu\varepsilon_x \qquad (3.10)$$

Al utilizar ESPI, la deformación se obtiene al ajustar los datos del desplazamiento a una superficie y posteriormente obteniendo una diferenciación, lo cual conduce a errores grandes, mencionado anteriormente. Entonces, se investigan métodos tal que el patrón de franjas represente la derivada del desplazamiento. Esto se lleva a cabo con “Speckle shear interferometry”.

La Shearografía es también conocida como Interferometría Electrónica de Patrones de Moteado de Desplazamiento Lateral (ESSPI por sus siglas en inglés: Electronic Speckle Shearing Pattern Interferometry) es una técnica óptica no destructiva basada en el fenómeno de moteado (speckle). Necesariamente se utilizan elementos de corte de cizalla o “shear” como es el caso del interferómetro de Michelson que es el elemento de shear más común debido a su estructura simple, el cual se coloca delante de la cámara que permite generar la superposición de dos imágenes ligeramente desfasadas en una determinada dirección, permitiendo generar un interferograma de moteado [19].

En la figura 3.9 se puede apreciar el interferómetro de Michelson que usamos en este trabajo, donde el objeto está iluminado mediante luz coherente. Cada punto de la muestra se representa en la cámara como dos imágenes separadas espacialmente, debido a la reflexión en ambos espejos del interferómetro. Estas imágenes están representadas por los puntos  $P_1$  y  $P_2$  en el plano de la cámara, y poseen una diferencia de fase  $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$  donde  $\phi_1 = \phi(x, y)$  y  $\phi_2 = \phi(x + \Delta x, y)$  donde  $\Delta x$  representa la cantidad de desplazamiento lateral (shear) entre las dos imágenes. Los rayos interfieren entre sí por superposición produciendo una imagen moteada.

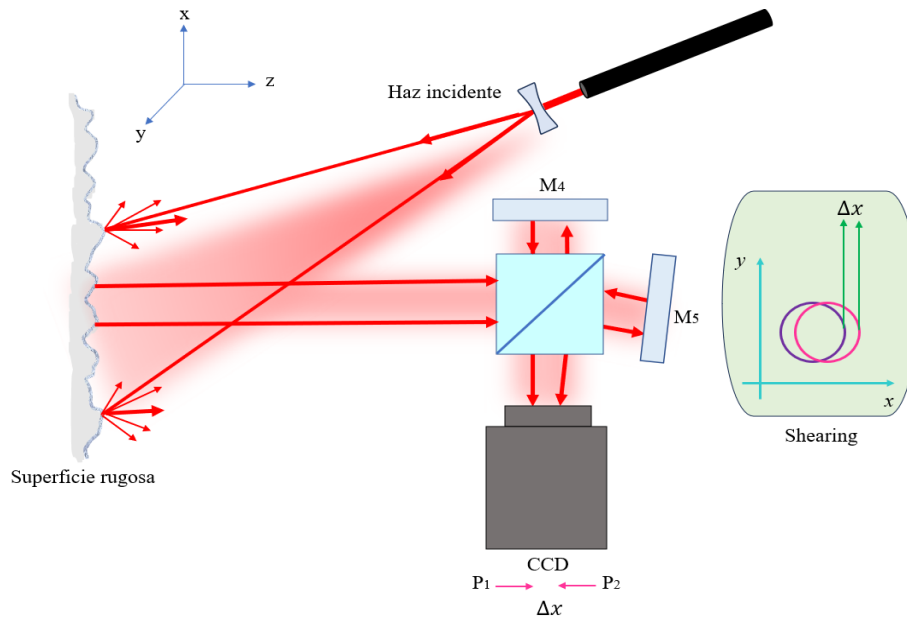


Figura 3.9. Shearografía basada en el Interferómetro de Michelson.

Los cambios en el patrón de moteado se analizan para medir las deformaciones en la superficie del objeto [19]. Al hablar de **deformación** nos referimos a cualquier cambio en la forma o posición de un objeto debido a cargas aplicadas. La deformación nos da información de cuánto se estira o comprime un objeto bajo la influencia de cargas. Se puede expresar como un porcentaje o una cantidad adimensional [20, 21].

La carga puede ser una fuerza puntual, distribuida o una combinación de ambas. Puede incluir cargas estáticas (permanentes) y cargas dinámicas (variables en el tiempo). La **carga mecánica** puede generar tensiones mecánicas en el material sobre el cual se aplica. En cambio, la **carga térmica** se debe al cambio de temperatura por el que se hace pasar un material. La carga genera tensiones en el material, ya sea tensión mecánica o tensión térmica. La **tensión mecánica** se refiere a la distribución de fuerzas internas en un material debido a una carga aplicada, mientras que el **esfuerzo** es una medida del resultado de esa tensión mecánica. La **tensión mecánica** puede causar que un material se deforme, lo cual genera un cambio en su forma o tamaño. Mientras que la **tensión térmica** puede deformar un material debido a la carga aplicada de cambio de temperatura, la cual es causada por la expansión o contracción del material a medida que se calienta o se enfría [20–22].

A la fuerza por unidad de área, o la intensidad de las fuerzas distribuidas a través de una sección dada, se le conoce como **esfuerzo** y se representa con la letra griega  $\sigma$  (sigma). El esfuerzo en un elemento con área transversal  $A$  sometido a una carga axial  $P$  se obtiene al dividir la magnitud  $P$  de la carga entre el área  $A$  [21]:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.11)$$

Esta ecuación nos da el esfuerzo normal en un elemento bajo carga axial [16]. Las unidades de los esfuerzos son las mismas que para la presión,  $Pa = N/m^2$ . Existen los **esfuerzos normales** y los **esfuerzos cortantes**, ambos esfuerzos con sus respectivas componentes. Para los esfuerzos normales sus componentes tienen que cumplir con un sufijo, así como indica y actúan en la dirección normal de la superficie; son positivos cuando actúan en tensión y negativos para una compresión. En cambio, para los esfuerzos cortantes, sus componentes tienen dos sufijos, el primero muestra la dirección de la normal a la superficie sobre la cual está actuando; el segundo nos muestra la dirección de la componente del esfuerzo y son tomados como positivos de acuerdo con los ejes [20, 21].

Se considerará un cubo con aristas infinitesimales de valor:  $dx, dy, dz$ . Este cubo tiene seis caras y en cada una de ellas se considerará que actúan tres esfuerzos internos: uno normal y dos de corte. La notación utilizada es:  $\sigma_x$  para el esfuerzo normal aplicado en la cara normal al eje  $x$ , de igual forma se definen  $\sigma_y, \sigma_z$ . Para los esfuerzos cortantes, la notación es  $\tau_{ab}$  que denota el esfuerzo de corte que actúa en la cara normal al eje 'a' y que apunta en la dirección del eje 'b'. De esta forma se tienen:  $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{zy}$ .

Consideremos entonces, un elemento cúbico muy pequeño de un objeto, en un punto Q con lados paralelos al sistema coordenado cartesiano, figura 3.10.

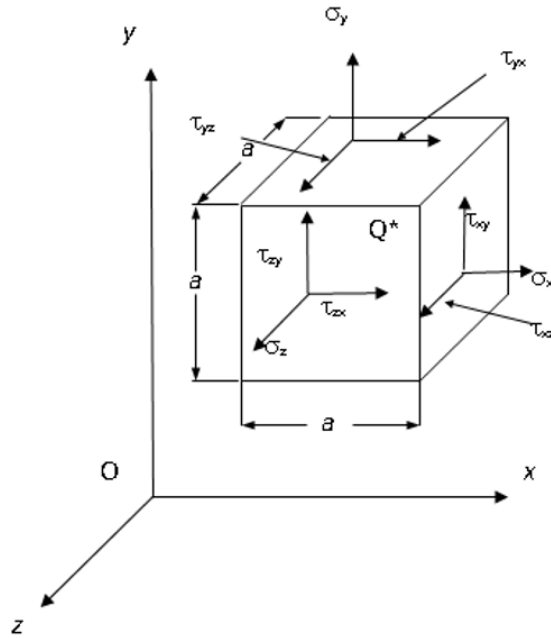


Figura 3.10. Cubo de Esfuerzos: esfuerzo normal y esfuerzo cortante.

#### Componentes normales del esfuerzo

- Tienen un sufijo único y actúan en la dirección normal de la superficie,
- Son positivos cuando actúan en tensión y negativos para una compresión.

#### Esfuerzos Cortantes

- Tienen dos sufijos, el primero muestra la dirección de la normal a la superficie sobre la cual está actuando. El segundo muestra la dirección de la componente del esfuerzo,
- Son tomados como positivos de acuerdo con los ejes.

Durante un proceso de carga térmica, el comportamiento dinámico de las tensiones en un material está influenciado por los cambios de temperatura. Cuando un material se somete a variaciones de temperatura, sufre expansión o contracción térmica, lo que genera tensiones internas. Estos esfuerzos térmicos surgen debido a la expansión o contracción diferencial de diferentes partes del material. Cuando un material se calienta, sus átomos o moléculas vibran con más fuerza, lo que aumenta la separación promedio entre ellos y hace que el material se expanda. Por el contrario, el enfriamiento de un material reduce la energía vibratoria, lo que resulta en la contracción. La expansión térmica depende del coeficiente de expansión térmica del material, que varía para diferentes materiales [23, 24].

La Shearografía mide el gradiente de la deformación, no la deformación en sí misma, como lo hace ESPI. Esta capacidad ha hecho que la shearografía sea cada vez más importante como herramienta de ensayos no destructivos (END) en la industria [17].

Las ecuaciones de Shearografía se pueden derivar de los principios de interferencia. En la interferencia, dos ondas de luz pueden combinarse para producir una nueva onda con diferente amplitud y fase. La diferencia de fase entre las dos ondas es la diferencia entre sus fases. A continuación, se muestran los pasos para obtener la ecuación utilizada en este trabajo.

En base a dos imágenes, como se ilustra en la figura 3.11, la primera de ellas es considerada como la imagen de referencia, mientras que la segunda es la imagen desplazada. La presencia de dos patrones de moteado se debe a la rugosidad del objeto bajo estudio.

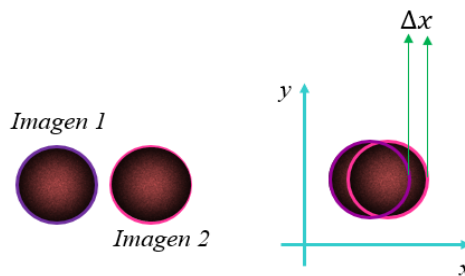


Figura 3.11. Dos imágenes del mismo objeto que han sido desplazadas lateralmente para formar un patrón de interferencia.

Cada imagen se puede representar como campos separados por  $\Delta x$ . Donde  $E_{01}$  y  $E_{02}$  representan amplitud y  $\phi$  la fase del patrón de speckle; ambos parámetros son diferentes en cada punto. Por lo tanto:

$$E_1(x, y) = E_{01}(x, y)e^{i\phi(x, y)} \quad (3.12)$$

$$E_2(x, y) = E_{02}(x, y)e^{i\phi(x+\Delta x, y)} \quad (3.13)$$

La superposición de las dos imágenes nos da como resultado un nuevo patrón de moteado que va a ser diferente al patrón de moteado original. Es decir, este patrón de moteado va a ser el resultado de la interferencia de los dos primeros patrones de moteado.



Como la cámara captura intensidades, entonces calculamos la intensidad del patrón de moteado. Debido a la interferencia tenemos la ecuación 3.14, la cual representa la intensidad, estudiada en el capítulo anterior.

$$I_A(x, y) = |E_1(x, y) + E_2(x, y)|^2$$

$$I_A(x, y) = I_1(x, y) + I_2(x, y) + 2\sqrt{I_1(x, y)I_2(x, y)} \cos\psi(x, y) \quad (3.14)$$

Donde  $\psi(x, y)$  es la distribución de fase aleatoria.

$$\psi(x, y) = \phi(x, y) - \phi(x + \Delta x, y) \quad (3.15)$$

Cuando se aplica un esfuerzo a la muestra u objeto, éste experimenta una deformación que provoca una variación en fase en la segunda imagen  $E_4(x, y)$ . En cambio, la primera imagen  $E_3(x, y)$  presenta una variación de fase debido al patrón de moteado original. En consecuencia,

$$E_3(x, y) = E_{01}(x, y)e^{i[\phi(x, y) + \Delta\phi(x, y)]} \quad (3.16)$$

$$E_4(x, y) = E_{02}(x, y)e^{i[\phi(x + \Delta x, y) + \Delta\phi(x + \Delta x, y)]} \quad (3.17)$$

Cuya superposición conduce al patrón de moteado:

$$I_D(x, y) = |E_3(x, y) + E_4(x, y)|^2$$

$$I_D(x, y) = I_1(x, y) + I_2(x, y) + 2\sqrt{I_1(x, y)I_2(x, y)} \cos[\psi(x, y) + \Delta\phi(x, y) - \Delta\phi(x + \Delta x, y)] \quad (3.18)$$

La diferencia da:

$$[I_A - I_D](x, y) = 2\sqrt{I_1(x, y)I_2(x, y)} \{ \cos\psi(x, y) - \cos[\psi(x, y) + \Delta\phi(x, y) - \Delta\phi(x + \Delta x, y)] \} \quad (3.19)$$

$$[I_A - I_D](x, y) = 4\sqrt{I_1(x, y)I_2(x, y)} \sin \left[ \psi(x, y) + \frac{[\Delta\phi(x, y) - \Delta\phi(x + \Delta x, y)]}{2} \right] \cdot \sin \left[ \frac{[\Delta\phi(x, y) - \Delta\phi(x + \Delta x, y)]}{2} \right] \quad (3.20)$$

En el primer término,  $\sin \left[ \psi(x, y) + \frac{[\Delta\phi(x, y) - \Delta\phi(x + \Delta x, y)]}{2} \right]$ , la variación de la fase  $\psi(x, y)$  corresponde a la fase vinculada a los patrones de speckle, que, en comparación con las franjas, posee una alta frecuencia. Por lo tanto, este primer término no es de nuestro interés primordial. Nuestro enfoque se dirige hacia el segundo término,  $\sin \left[ \frac{[\Delta\phi(x, y) - \Delta\phi(x + \Delta x, y)]}{2} \right]$ , que contiene información sobre el cambio de fase  $\delta$  relacionado con el campo de deformación provocado por la aplicación de estrés a la muestra.

Dado que la diferencia de fase  $\delta$  es igual a  $\frac{2\pi}{\lambda}$  por la diferencia de camino óptico y considerando que esta diferencia de camino óptico está asociada tanto con el cambio en el índice de refracción como con cambio del camino geométrico; cabe destacar que, al trabajar en el aire, no se introduce un cambio en el índice de refracción, por lo que lo consideramos como 1. En este contexto, solo se produce una variación en la diferencia de camino geométrico. Por lo tanto:

$$\delta = \frac{[\Delta\phi(x, y) - \Delta\phi(x + \Delta x, y)]}{2} \quad (3.21)$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \{ (\hat{k}_2 - \hat{k}_1) \cdot \vec{d}(x, y) - (\hat{k}_2 - \hat{k}_1) \cdot \vec{d}(x + \Delta x, y) \} \quad (3.22)$$

Donde el vector de sensibilidad se representa como  $e = (\hat{k}_2 - \hat{k}_1)$ .

Si reemplazamos en la ecuación 3.21 las componentes del vector de sensibilidad de modo que:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \{ (\hat{k}_2 - \hat{k}_1) \cdot \vec{d}(x, y) - (\hat{k}_2 - \hat{k}_1) \cdot \vec{d}(x + \Delta x, y) \}$$

Por factor común:

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{2\pi}{\lambda} \{ (\vec{d}(x, y) - \vec{d}(x + \Delta x, y)) \cdot (\hat{k}_2 - \hat{k}_1) \} \\ \delta &= \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ \left( \frac{\vec{d}(x, y) - \vec{d}(x + \Delta x, y)}{\Delta x} \right) \cdot (\hat{k}_2 - \hat{k}_1) \Delta x \right\} \\ \delta &\approx \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ \left( \frac{\partial \vec{d}(x, y)}{\partial x} \right) \cdot (\hat{k}_2 - \hat{k}_1) \Delta x \right\} \end{aligned} \quad (3.23)$$

Siendo  $\hat{k}_2$  el vector de observación y  $\hat{k}_1$  vector de iluminación, quienes componen el vector de sensibilidad. Por lo tanto, para la imagen de referencia y para la imagen cuando se aplica la carga al objeto, tendrán el mismo vector de sensibilidad. El vector de sensibilidad tiene componentes  $e_x \hat{i}, e_y \hat{j}, e_z \hat{k}$  y el vector desplazamiento  $u \hat{i}, v \hat{j}, w \hat{k}$  o también denotadas como  $d_x \hat{i}, d_y \hat{j}, d_z \hat{k}$ . Para obtener las componentes del campo de desplazamiento, es necesario contar con tres vectores de sensibilidad, correspondientes a tres direcciones distintas de iluminación.

El vector de sensibilidad varía según la disposición geométrica del arreglo y señala la dirección en la cual el sistema es más sensible.

Suponemos un sistema paralelo a la mesa colocado en un plano donde  $y = 0$ . Para esta configuración óptica el haz de iluminación, el objeto y la cámara tienen las coordenadas que se muestran en la figura 3.12 con respecto a un sistema referencia ubicado en el plano del objeto.

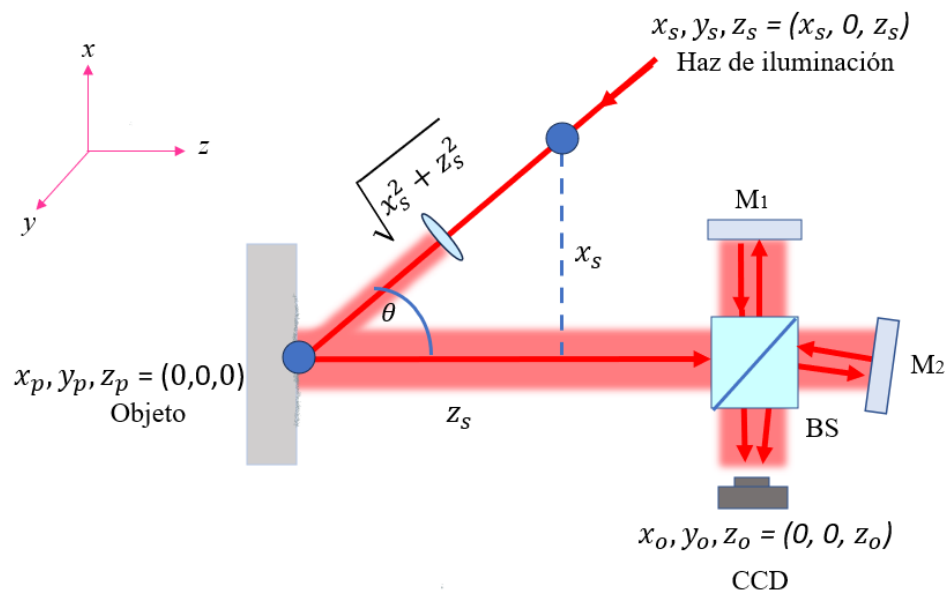


Figura 3.12. Vector de sensibilidad para un haz de iluminación

De las componentes del vector de sensibilidad correspondientes a un sistema de un haz de iluminación:

$$e_x = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ \frac{x_0 - x_p}{[(x_0 - x_p)^2 + (y_0 - y_p)^2 + (z_0 - z_p)^2]^{1/2}} - \frac{x_p - x_s}{[(x_p - x_s)^2 + (y_p - y_s)^2 + (z_p - z_s)^2]^{1/2}} \right]$$

$$e_y = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ \frac{y_0 - y_p}{[(x_0 - x_p)^2 + (y_0 - y_p)^2 + (z_0 - z_p)^2]^{1/2}} - \frac{y_p - y_s}{[(x_p - x_s)^2 + (y_p - y_s)^2 + (z_p - z_s)^2]^{1/2}} \right]$$

$$e_z = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ \frac{z_0 - z_p}{[(x_0 - x_p)^2 + (y_0 - y_p)^2 + (z_0 - z_p)^2]^{1/2}} - \frac{z_p - z_s}{[(x_p - x_s)^2 + (y_p - y_s)^2 + (z_p - z_s)^2]^{1/2}} \right]$$

Reemplazando los valores asociados según las coordenadas de la fuente de iluminación, de la cámara CCD y evaluando en el punto con coordenadas (0,0,0), se obtiene para este caso particular las siguientes componentes del vector de sensibilidad que corresponden a iluminación colimada:

$$e_x = \frac{x_s}{\sqrt{x_s^2 + z_s^2}} \quad (3.24)$$

$$e_y = 0 \quad (3.25)$$

$$e_z = 1 + \frac{z_s}{\sqrt{x_s^2 + z_s^2}} \quad (3.26)$$

De acuerdo a la figura 3.12 y por trigonometría las componentes del vector de sensibilidad para cada una de las tres direcciones se expresan de este modo:

$$e_x = \text{sen}\theta \quad (3.27)$$

$$e_y = 0 \quad (3.28)$$

$$e_z = 1 + \text{cos}\theta \quad (3.29)$$

De la ecuación 3.23, sustituyendo las derivadas de los vectores de desplazamiento y de sensibilidad:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ \frac{\partial d_x(x, y)}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial d_y(x, y)}{\partial x} \hat{j} + \frac{\partial d_z(x, y)}{\partial x} \hat{k} \right] \cdot [\text{sen}\theta \hat{i} + 0\hat{j} + (1 + \text{cos}\theta)\hat{k}]$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ \text{sen } \theta \frac{\partial d_x(x, y)}{\partial x} + (1 + \cos \theta) \frac{\partial d_z(x, y)}{\partial x} \right] \Delta x \quad (3.30)$$

Es posible entonces obtener las derivadas de los campos de desplazamiento en plano  $\frac{\partial d_x}{\partial x}$  y fuera de plano  $\frac{\partial d_z}{\partial x}$  al tener dos haces de iluminación.

La Shearografía tiene muchas aplicaciones, por ejemplo, se puede utilizar para inspeccionar componentes y estructuras metálicas ya sea para evaluar su integridad estructural, detectar defectos o tensiones residuales y monitorear la evolución de deformación bajo cargas o condiciones cambiantes. También se usa para la prueba de componentes y sistemas ópticos y el estudio de fenómenos de flujo y difusión de gases o líquidos [19].

### **3.10. Demodulación de la fase**

Cuando dos o más ondas de luz interfieren entre sí, se forman los patrones de franjas conocidos como interferogramas, que representan una señal modulada en fase y podemos analizar a partir de la intensidad, usando diferentes métodos, uno de ellos es la interferometría de corrimiento de fase o como usualmente se conoce como “Phase Stepping Interferometry” (PSI) [25].

La fase óptica es una medida de la posición de un punto dentro del ciclo de la onda de luz. Cuando la superficie de un objeto se deforma bajo carga térmica, la longitud del camino óptico de la luz reflejada que viaja hasta la cámara cambia, lo que altera la fase de la onda de luz. La cámara captura estos cambios como una señal periódica que da paso a una "fase envuelta", que es la representación de la fase dentro de los límites de  $-\pi$  a  $\pi$ . Debido a esta limitación, la fase envuelta puede presentar discontinuidades cuando la longitud del camino óptico cambia por más de la longitud de onda de la luz.

### **3.11. Algoritmo de desplazamiento de fase de cuatro pasos**

El algoritmo de desplazamiento de fase de cuatro pasos fue propuesto por primera vez por Robert K. Erf en 1968, el cual consiste en tomar cuatro mediciones de un patrón de franjas,

cada una con una fase desplazada diferente. Estas mediciones se utilizan para calcular la fase del patrón de franjas en cada punto de la superficie.

Partiendo de la ecuación 2.14 se pueden escribir 4 ecuaciones agregando un incremento de  $\frac{2\pi}{n}$  a la fase  $\delta$  [25]. En este caso  $n = 4$ , por lo tanto:

$$I_1 = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (3.31)$$

$$I_2 = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \left( \delta + \frac{\pi}{2} \right) \quad (3.32)$$

$$I_3 = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\delta + \pi) \quad (3.33)$$

$$I_4 = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \left( \delta + \frac{3\pi}{2} \right) \quad (3.34)$$

Teniendo en cuenta las relaciones trigonométricas:

$$\cos \left( \delta + \frac{\pi}{2} \right) = \cos \delta \cos \frac{\pi}{2} - \sin \delta \sin \frac{\pi}{2} = -\sin \delta$$

$$\cos(\delta + \pi) = \cos \delta \cos \pi - \sin \delta \sin \pi = -\cos \delta$$

$$\cos \left( \delta + \frac{3\pi}{2} \right) = \cos \delta \cos \frac{3\pi}{2} - \sin \delta \sin \frac{3\pi}{2} = \sin \delta$$

Se pueden describir las ecuaciones de tal modo que

$$I_1 = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (3.35)$$

$$I_2 = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} (-\sin \delta) \quad (3.36)$$

$$I_3 = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} (-\cos \delta) \quad (3.37)$$

$$I_4 = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} (\sin \delta) \quad (3.38)$$

De donde:

$$I_2 - I_4 = -4\sqrt{I_1 I_2} \sin \delta \quad (3.39)$$

$$-(I_2 - I_4) = -4\sqrt{I_1 I_2} \sin \delta \quad (3.40)$$

$$I_1 - I_3 = 4\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (3.41)$$

Finalmente, la diferencia de fase se puede representar como:

$$\tan \delta = \frac{-(I_2 - I_4)}{I_1 - I_3}$$

$$\delta = \tan^{-1} \left( \frac{-(I_2 - I_4)}{I_1 - I_3} \right) \quad (3.42)$$

Finalmente, la ecuación 3.42 nos permite trabajar con cuatro mediciones de intensidad para encontrar  $\delta$ , algoritmo de cuatro pasos.

### 3.12. Desenvolvimiento de la fase

El desenvolvimiento de fase es un proceso computacional que convierte la fase envuelta en una "fase desenvuelta", que representa un mapa continuo de los cambios de fase. Este proceso elimina las discontinuidades y proporciona un valor de fase que es proporcional al desplazamiento absoluto de cada punto en la superficie. La fase envuelta se calcula típicamente usando la arcotangente de la relación entre las componentes seno y coseno de la señal medida, resultando en un valor de fase entre  $-\pi$  y  $+\pi$ . Sin embargo, la fase real que se desea medir puede extenderse más allá de este rango, lo que lleva a la necesidad de "desenvolver" la fase, es decir, añadir o sustraer adecuadamente  $2\pi$  para corregir los saltos y obtener un perfil de fase continuo [25, 26].

# Capítulo 4

## Metodología experimental y resultados

Uno de los métodos más comúnmente usados en la interferometría de desplazamiento lineal (shearing) emplea el interferómetro de Michelson donde el objeto es visto vía dos caminos independientes. En la parte experimental se implementa la técnica de shearografía usando dos haces de iluminación en el objeto que hace posible la evaluación del campo de deformación fuera de plano plano  $\frac{\partial w}{\partial x}$  así como el campo de deformación en plano  $\frac{\partial u}{\partial x}$  dada una carga térmica aplicada en la parte posterior de una placa metálica rectangular de aluminio rugosa. También se presentan medidas de la temperatura dado las cargas térmicas aplicadas.

### 4.1. Diseño del experimento

Para este experimento se utilizó el arreglo óptico que se muestra en la figura 4.1, el cual consiste en lo siguiente: luz proveniente de un láser He-Ne de la marca JDSU cuya potencia es de 20 mW y longitud de onda de  $\lambda = 633 \text{ nm}$ , es dividida en dos haces por el cubo divisor (BS1). Una parte se dirige hacia el espejo M2 y la otra hacia el espejo M3 los cuales redirigen la luz hacia el objeto. La luz se refleja hacia el interferómetro de Michelson conformado por los espejos M4 y M5 así como por el divisor de haz BS2, donde el espejo M5 posee un piezoeléctrico MDT694B para aplicar el desplazamiento de fase de cuatro pasos explicado en el capítulo anterior.



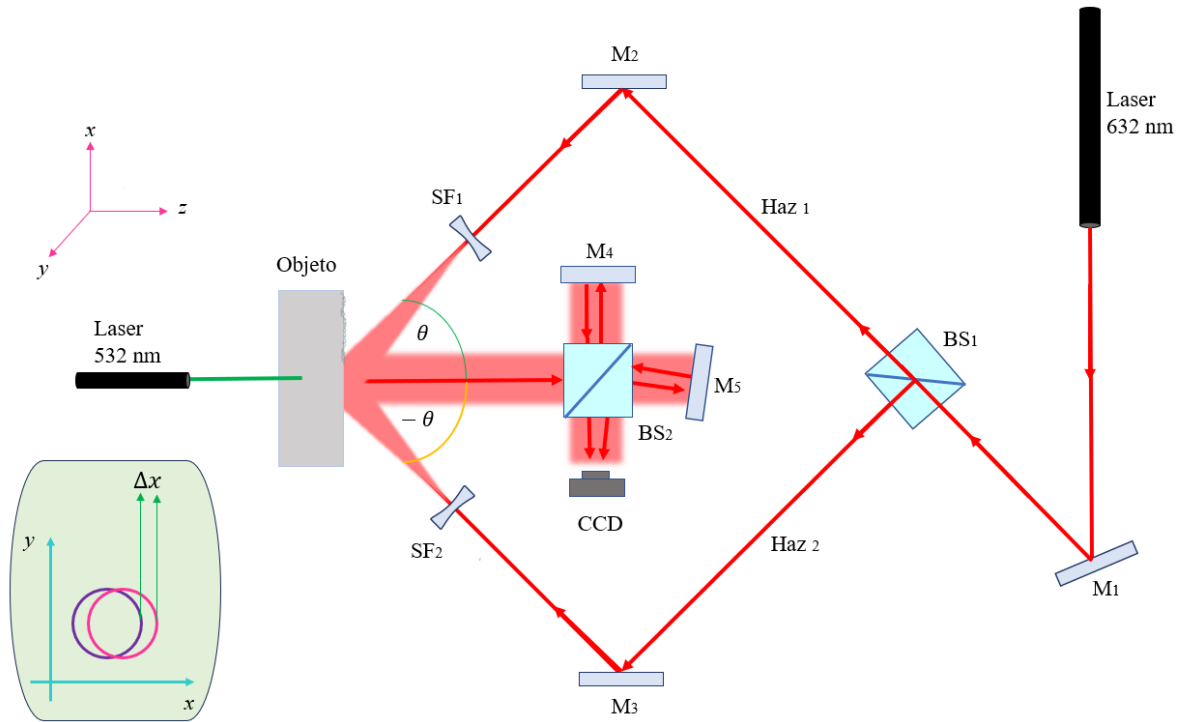


Figura 4.1. Esquema del sistema óptico correspondiente a la técnica de Shearografía aplicada para el estudio de la deformación de una placa metálica.

Al inclinar uno de los dos espejos del interferómetro de Michelson, por ejemplo, espejo M5 alrededor del eje  $y$  a un ángulo pequeño, se producirán dos frentes de onda desplazados lateralmente y se puede observar interferencia desplazada. La cantidad de desplazamiento puede ser controlada por el ángulo de inclinación. El mecanismo de desplazamiento puede ser usado para llevar a cabo la técnica de desplazamiento de fase. Un par de imágenes desplazadas correspondientes al objeto son obtenidas en el plano imagen de la cámara CCD. Como objeto o muestra se utilizó una placa metálica rectangular de aluminio rugosa de calibre 31, con medidas de ancho por altura de 152 mm x 80.8 mm. La muestra metálica se somete a estrés térmico mediante la radiación proveniente de una fuente de luz láser de la marca Spectra-Physics cuya potencia es de 500 mW y longitud de onda  $\lambda = 532 \text{ nm}$  incidiendo en la parte posterior de la muestra, en la dirección  $z$ .

El objeto de prueba se hace pasar de un estado inicial de referencia a uno final, por medio de la aplicación de carga mecánica o térmica, la cual provoca la deformación y la aparición de defectos o fallas.

La cámara CCD PixeLINK PL-B623 monocromática utiliza un sistema formador de imágenes para registrar el patrón de interferencia. Se hace una captura del estado referencia, se aplica la carga al objeto, y luego se hace un nuevo registro del estado final. La comparación de los dos estados se hace simplemente a través de la resta digital de las dos imágenes. El resultado de la resta es una imagen que contiene un conjunto de franjas, las cuales poseen la información sobre la deformación sufrida por el cuerpo. Las franjas obtenidas pueden mostrar cualitativamente información respecto a la deformación o a defectos. Sin embargo, es la fase portada por las franjas la que realmente es importante, puesto que es proporcional a las componentes de deformación, en el plano y fuera de él, y de esta forma, a los esfuerzos.

La serie de imágenes será capturada por una cámara CCD para su posterior procesamiento. La información obtenida corresponderá al campo de deformación  $\frac{\partial w}{\partial x}$ . En el caso de obtención de la deformación fuera de plano,  $\frac{\partial w}{\partial x}$ , lo cual es posible cuando la muestra es iluminada dualmente de manera simétrica, en este caso el ángulo de iluminación es de  $\theta = 12^\circ$ . Se iluminará mediante un haz laser, L, de forma secuencial mediante los haces 1 y 2.

El cambio de fase introducido por el campo de deformación correspondientes a los haces 1 y 2, respectivamente se obtienen mediante las siguientes ecuaciones:

Para el primer haz de iluminación:

$$\Delta\phi_x^1 = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ \sin\theta \frac{\partial u}{\partial x} + (1 + \cos\theta) \frac{\partial w}{\partial x} \right] \cdot \Delta x \quad (4.1)$$

Para un segundo haz de iluminación, tenemos que:

$$\Delta\phi_x^2 = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ -\sin\theta \frac{\partial u}{\partial x} + (1 + \cos\theta) \frac{\partial w}{\partial x} \right] \cdot \Delta x \quad (4.2)$$

El cambio de fase relativo entre los contornos de la fase representados por las ecuaciones 4.1 y 4.2 es dado por:

Si restamos las fases:

$$\Delta\phi_x^1 - \Delta\phi_x^2 = \frac{4\pi}{\lambda} \left[ \sin\theta \frac{\partial u}{\partial x} \right] \cdot \Delta x \quad (4.3)$$

Si sumamos las fases:

$$\Delta\phi_x^1 + \Delta\phi_x^2 = \frac{4\pi}{\lambda} \left[ (1 + \cos \theta) \frac{\partial w}{\partial x} \right] \cdot \Delta x \quad (4.4)$$

A partir de la ecuación 4.3 se puede obtener la deformación  $\frac{\partial u}{\partial x}$  y de la ecuación 4.4  $\frac{\partial w}{\partial x}$ , de modo que:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\lambda (\Delta\phi_x^1 - \Delta\phi_x^2)}{4\pi \Delta x \sin \theta} \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\lambda (\Delta\phi_x^1 + \Delta\phi_x^2)}{4\pi \Delta x (1 + \cos \theta)} \quad (4.6)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda del haz de iluminación,  $\Delta x$  es el shearing aplicado y  $\theta$  es el ángulo de iluminación.

En el caso de un solo haz de iluminación y haciendo uso de una de las ecuaciones 4.1 o 4.2, según la dirección de iluminación, se puede obtener la  $\frac{\partial w}{\partial x}$  al suponer una aproximación de que el ángulo es cero.

En este experimento, se hizo la comparación de obtener la fase a partir de un ángulo conocido (12°) y asumiendo que era cero. Se muestra el error porcentual de estos dos casos.

La shearografía es una técnica de interferometría que utiliza la coherencia de la luz láser para detectar desplazamientos en la superficie de un objeto.

Cuando un objeto se deforma, los caminos ópticos de la luz reflejada cambian, lo que resulta en un cambio en el patrón de interferencia capturado por la cámara. Al generar un mapa de deformación de la superficie que muestra los desplazamientos en cada punto, permite identificar las regiones donde la placa metálica se ha deformado en respuesta a la carga térmica.

## 4.2. Presentación de los resultados obtenidos mediante shearografía

En la figura 4.2 se muestra el arreglo experimental utilizado en este trabajo:

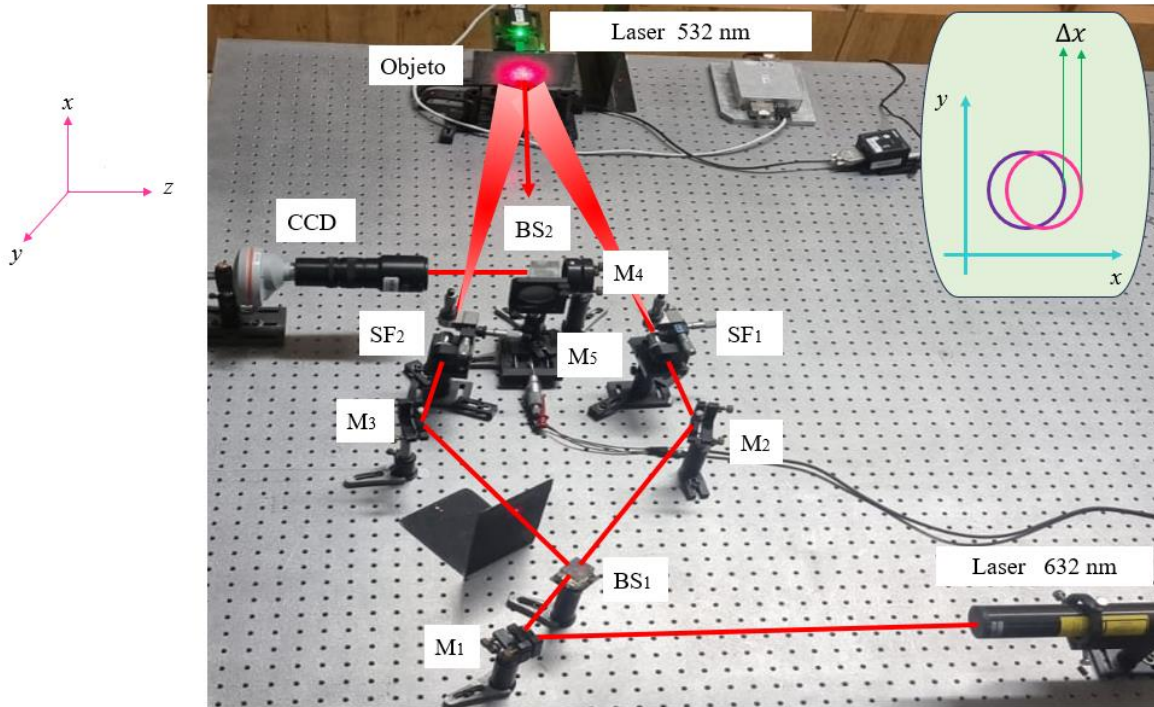


Figura 4.2. Foto del arreglo óptico experimental de Shearografía.

Para el desenvolvimiento de la fase, se utilizó el algoritmo de desplazamiento de fase de 4 pasos, ya que el método de desplazamiento de fase permite mejorar la sensibilidad, reducir errores y proporcionar mayor exactitud en el desenvolvimiento de fases, lo que en conjunto optimiza la calidad y confiabilidad de los resultados.

Empleamos dos haces de manera alternada, realizando cuatro mediciones con el haz 1 y otras cuatro con el haz 2. Como resultado, obtuvimos la fase envuelta para cada haz y procedimos a desenvolver estas fases. Posteriormente, aplicamos las ecuaciones 4.3 para la resta y 4.4 para la suma de las fases desenvueltas. El perfil resultante de la fase desenvuelta para el perfil  $y = 40 \text{ mm}$  se presenta para ambos casos (suma o resta) en la figura 4.3.

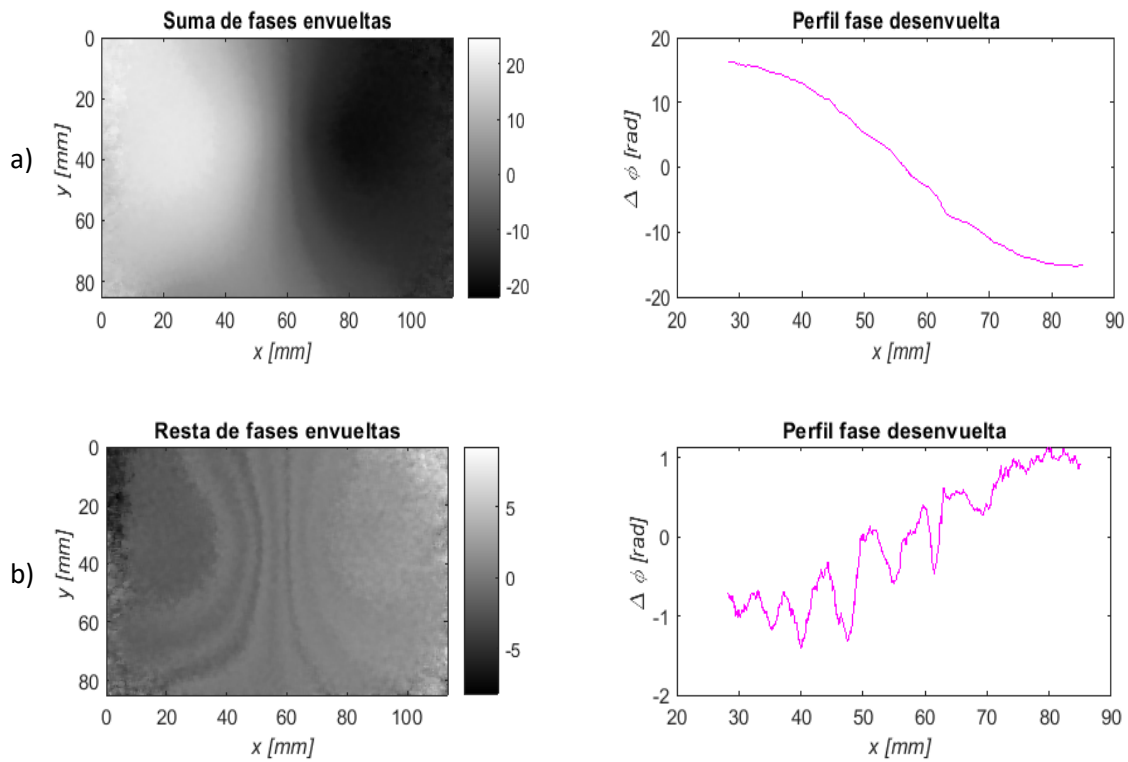


Figura 4.3. a) Suma de fases desenvueltas  $\Delta\phi_x^1 + \Delta\phi_x^2$  y perfil de la fase desenvuelta cuando  $y = 40 \text{ mm}$ , b) Resta de fases desenvueltas  $\Delta\phi_x^1 - \Delta\phi_x^2$  y perfil de la fase desenvuelta cuando  $y = 40 \text{ mm}$

A partir de los resultados obtenidos anteriormente, se utilizaron las ecuaciones 4.5 y 4.6 para representar la deformación en  $\frac{\partial u}{\partial x}$  y en  $\frac{\partial w}{\partial x}$  y para el caso de un solo haz de iluminación donde  $\theta = 0^\circ$ , los cuales se muestran en la figura 4.4.

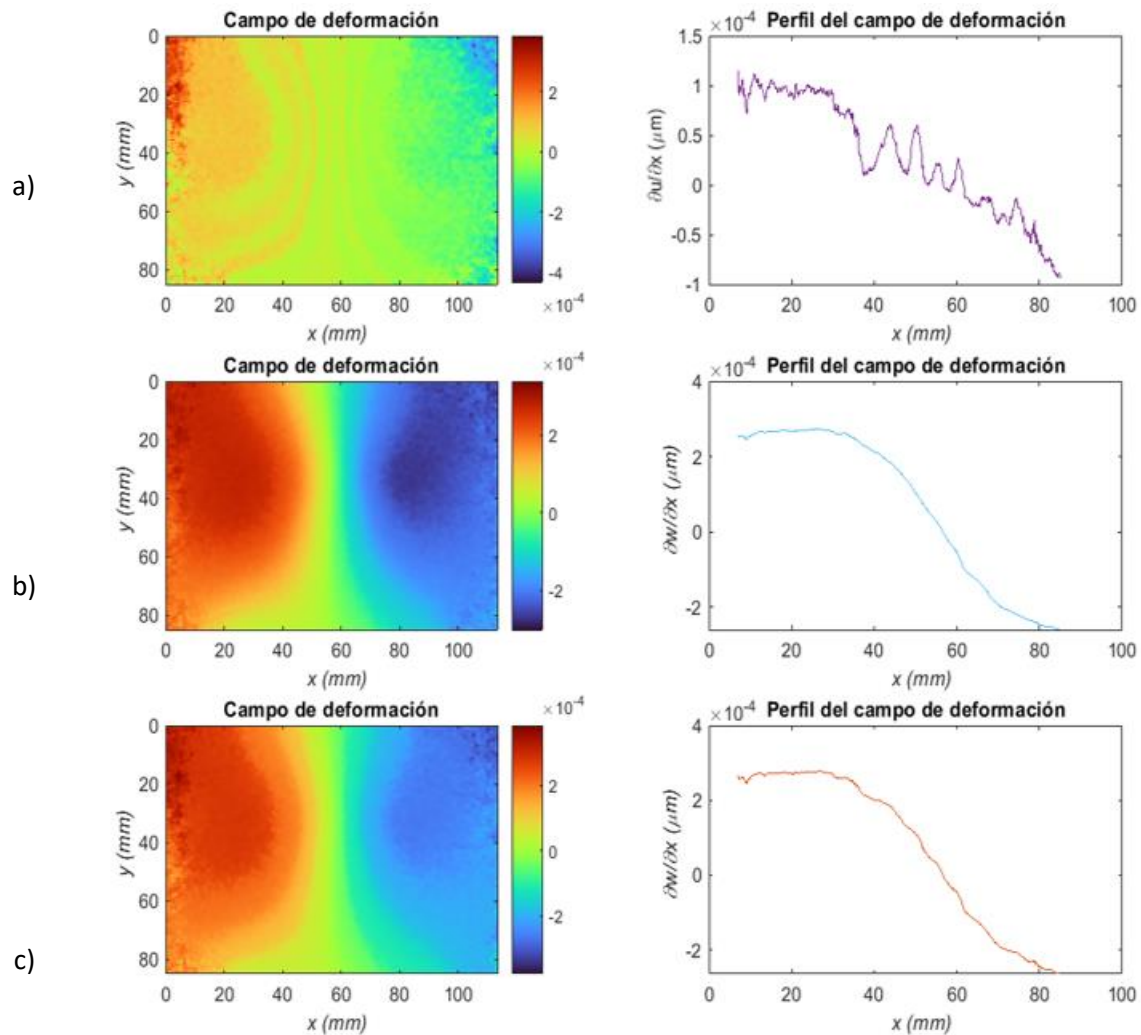


Figura 4.4. Campo de deformación y perfil del campo de deformación. a)  $\frac{\partial u}{\partial x}$  a partir de la resta de fases, b)  $\frac{\partial w}{\partial x}$  a partir de la suma de fases y c)  $\frac{\partial w}{\partial x}$  a partir de la ecuación 4.1 cuando  $\theta = 0^\circ$  para  $y = 40 \text{ mm}$ .

También se muestran estos campos de deformación en gráficos 3D para una mejor visualización en la figura 4.5 para posteriormente obtener valores a partir de estos gráficos.

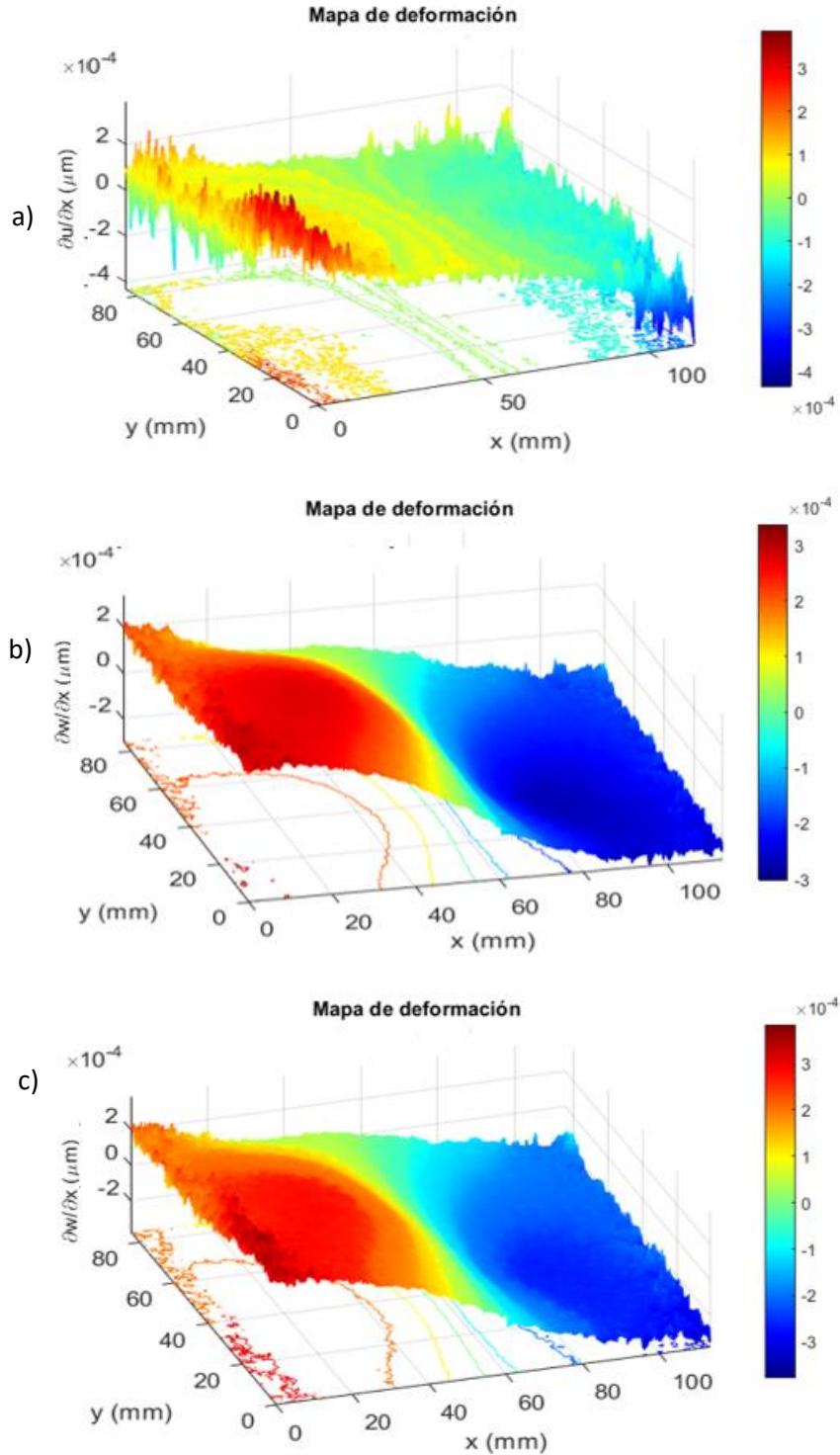


Figura 4.5. Mapa de deformación en 3D. a)  $\frac{\partial u}{\partial x}$  a partir de la resta de fases, b)  $\frac{\partial w}{\partial x}$  a partir de la suma de fases y c)  $\frac{\partial w}{\partial x}$  a partir de la ecuación 4.1 cuando  $\theta = 0^\circ$ .

El error porcentual entre el mapa de deformación a partir de la suma de fases y usando la ecuación 4.1 cuando  $\theta \approx 0^\circ$  es de 2.36 %.

Aunque el objetivo de la tesis no es medir la temperatura a través de las mediciones ópticas se utilizaron los campos de desplazamiento (al integrar el campo de deformación) que en combinación con el coeficiente de expansión térmica del material da información de los valores la temperatura aplicados.

Al integrar el mapa de deformación obtenido en la figura 4.5b, se calcula el mapa de desplazamientos que se muestra en la figura 4.6. Este mapa es una representación cuantitativa de cómo cada punto específico en la placa se ha desplazado físicamente debido a la carga térmica, proporcionando una imagen directa de la distribución de los desplazamientos en toda la placa.

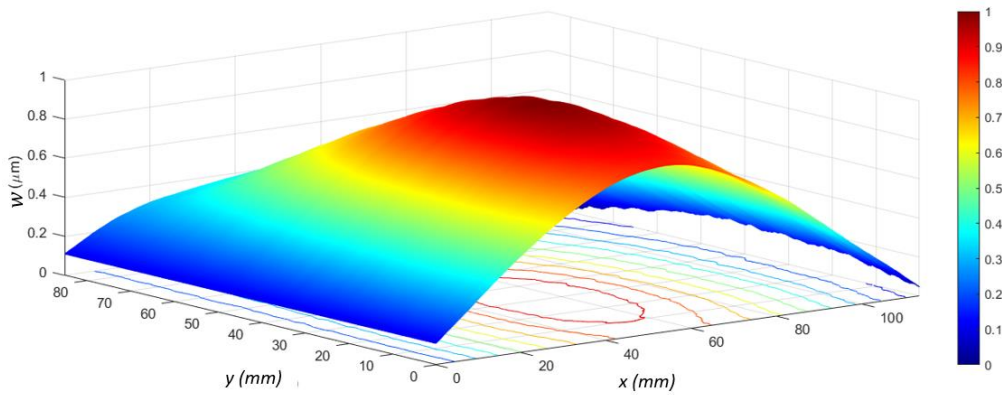


Figura 4.6. Mapa de desplazamiento a partir del mapa de deformación obtenido de la suma de las fases desenvueltas de los dos haces.

Una vez que tenemos información sobre los desplazamientos ocurridos en la muestra debido a la carga térmica aplicada, podemos emplear la ecuación de dilatación térmica del aluminio, representada por  $\alpha_{Al}$  [23]. Esto nos permitirá determinar los cambios de temperatura experimentados por la muestra. La ecuación correspondiente es la siguiente:

$$\delta\alpha_{Al} = \frac{\Delta L}{L_i \Delta T} \quad (4.8)$$

Donde  $\Delta L$  representa el cambio que ha experimentado la muestra,  $L_i$  el estado inicial de la muestra y  $\Delta T$  el cambio de temperatura que ha experimentado la muestra.



Dicho esto, tomamos como estado inicial el área de la placa sin aplicarle alguna carga y el cambio en la muestra al aplicarle una carga, como mapa de desplazamiento de la figura 4.6. A continuación, se muestra el mapa de cambio de temperatura.

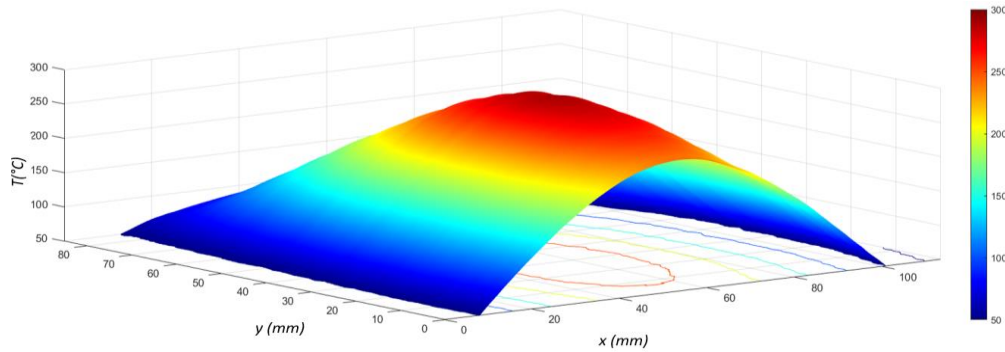


Figura 4.7. Mapa de temperatura a partir de la ecuación 4.8.

Con el fin de obtener una comprensión más precisa de la variación de la temperatura en la placa metálica, se llevaron a cabo cuatro mediciones con intervalo de 2 segundos. A partir del mapa de temperatura, se seleccionó un perfil del mapa en cada medición para su representación gráfica. Esto nos permitió observar de manera detallada cómo la temperatura evolucionó durante la aplicación de la carga térmica sobre la superficie de la placa.

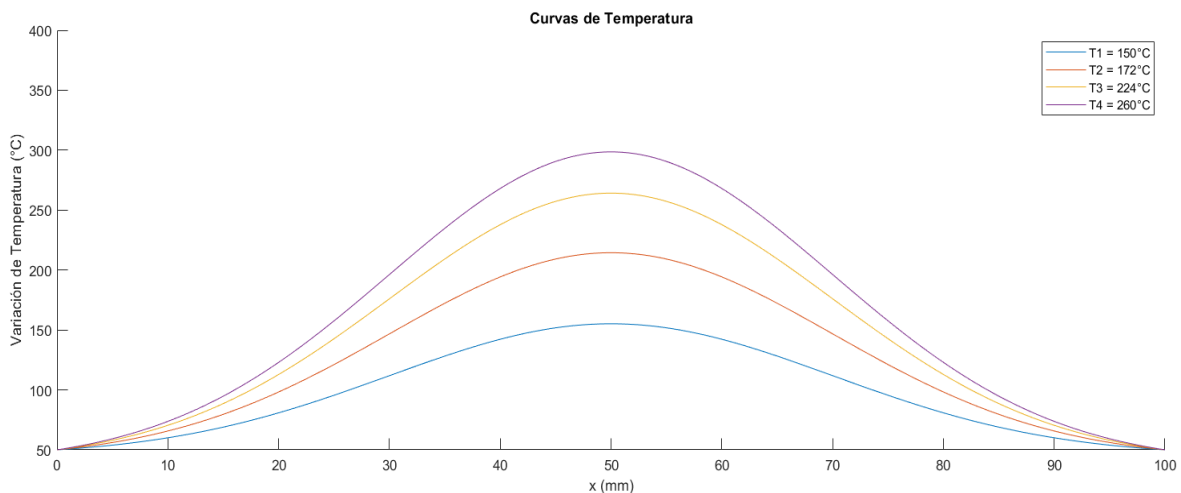


Figura 4.9. Perfiles de la variación de temperatura en  $y = 40 \text{ mm}$  en la placa metálica.

Los valores T1, T2, T3 y T4 corresponden a las temperaturas máximas registradas en la placa. Dichos valores han sido representados gráficamente en función del tiempo, como se ilustra en la Figura 4.10.

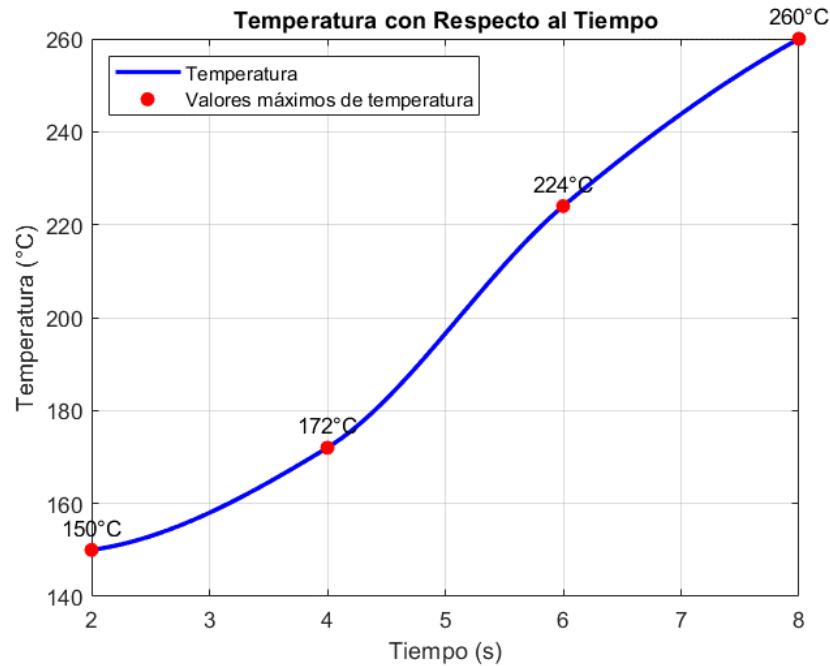


Figura 4.10. Variación de temperatura máxima en la placa metálica con respecto al tiempo.

#### 4.3. Análisis e interpretación de las deformaciones observadas

Cuando se aplica una carga térmica a una placa metálica, ésta se expande o contrae en respuesta a los cambios de temperatura. Estas respuestas pueden ser uniformes o no, dependiendo de las propiedades del material, la presencia de defectos, o las condiciones de ésta. La shearografía puede detectar estas deformaciones, proporcionando una imagen visual de cómo la carga térmica afecta al material. Esto es crucial para evaluar la integridad estructural, identificar áreas de estrés o verificar la calidad en los procesos de fabricación [27] en estos resultados podemos apreciar la deformación de la placa metálica al aplicarle una carga térmica. La Shearografía, al captar cambios en la topografía superficial, proporciona información valiosa sobre la expansión o dilatación del material bajo variaciones de temperatura. Aunque la deformación es evidente, la ausencia de daños visibles en la placa indica que la respuesta del material a la carga térmica no resultó en defectos superficiales apreciables.

# Capítulo 5

## Conclusiones y trabajo a futuro

En este trabajo de tesis se utilizó la técnica de shearografía de desplazamiento lateral para lo cual se empleó un interferómetro de Michelson. El objeto de prueba corresponde a una placa metálica de aluminio que fue sometida a diferentes cargas térmicas. Con la finalidad de obtener las derivadas del campo de desplazamiento en la dirección  $x$ , correspondientes al campo de desplazamiento en plano  $u(x, y)$  y fuera de plano  $w(x, y)$ , la muestra fue iluminada dualmente de manera simétrica. Se obtuvieron los campos de deformación correspondientes a diferentes cargas térmicas. En caso necesario también es posible evaluar la temperatura asociada al estrés térmico aplicado.

Es posible que, a lo largo del tiempo y con ciclos repetidos de carga térmica, se produzcan cambios adicionales en la topografía de la placa. Esto destaca la importancia de la evaluación continua para garantizar la integridad a lo largo del tiempo. La capacidad de la Shearografía para detectar deformaciones térmicas sin daños visibles abre la posibilidad de su aplicación práctica en el monitoreo continuo de estructuras sujetas a cambios de temperatura. Esto puede tener implicaciones importantes en la gestión de activos y la prevención de posibles fallas estructurales.

La shearografía permite la detección de defectos y la evaluación de las deformaciones sin dañar el material. La técnica es extremadamente sensible a pequeñas deformaciones, lo que permite detectar anomalías que no serían visibles a simple vista o con métodos de inspección más tradicionales. Los estudios de deformación ayudan a desarrollar modelos más precisos del comportamiento de los materiales bajo cargas térmicas, lo que es esencial para el diseño de ingeniería y para predecir la vida útil de los componentes.

La Shearografía tiene varias ventajas clave en comparación con otras técnicas de ensayo no destructivo, especialmente en la evaluación de materiales compuestos y estructuras:

Sensibilidad a defectos pequeños: Puede detectar y medir deformaciones y discontinuidades pequeñas en la superficie de un material, incluso en etapas tempranas de desarrollo, lo que permite la detección precoz de posibles problemas estructurales.

Rapidez y facilidad de uso: Es una técnica relativamente rápida y sencilla de aplicar, lo que la hace adecuada para inspecciones rápidas en entornos industriales.

Inspección de áreas grandes: Puede utilizarse para inspeccionar áreas grandes de una estructura en poco tiempo, lo que la hace eficaz para la detección de defectos en grandes componentes o estructuras.

No destructiva: Es una técnica no destructiva, lo que significa que no daña el material o la estructura durante la inspección.

Adaptabilidad a diferentes superficies: Puede adaptarse a una variedad de superficies y materiales, incluidos materiales compuestos, metálicos y plásticos.

Capacidad para detectar defectos internos: Puede utilizarse para detectar defectos internos en materiales, como delaminaciones en materiales compuestos, que no son visibles mediante inspección visual.

Es inmune a vibraciones por lo que se puede implementar en ambientes industriales.

También da directamente información de la derivada del campo de desplazamiento lo cual representa el campo de deformación, información importante en análisis de esfuerzos.

En resumen, la Shearografía es una técnica versátil y efectiva para la detección y evaluación de defectos en materiales y estructuras, con aplicaciones en una amplia gama de industrias, incluyendo la aeroespacial, la automotriz, la construcción y muchas otras.

Aunque la Shearografía tiene muchas ventajas, también tiene algunas limitaciones y desventajas:

Costo inicial y mantenimiento: Los equipos de Shearografía pueden ser costosos de adquirir y mantener, lo que puede ser una barrera para algunas empresas o aplicaciones.

Limitaciones en la detección de defectos internos: Aunque puede detectar defectos internos en algunos materiales, la Shearografía puede tener dificultades para detectar defectos más profundos o pequeños en materiales densos o espesos.

A pesar de estas desventajas, la Shearografía sigue siendo una técnica valiosa y ampliamente utilizada para la inspección no destructiva en una variedad de aplicaciones industriales. La elección de utilizar esta técnica dependerá de las necesidades específicas de cada aplicación y de la disponibilidad de recursos para su implementación.

### **Trabajo a futuro:**

El estudio actual se centra en una placa de aluminio. Podrían realizarse estudios similares en diferentes tipos de materiales, como plásticos, o aleaciones metálicas, para comprender cómo varía la respuesta a la carga térmica.

Realizar estudios a largo plazo para observar cómo las deformaciones térmicas afectan la vida útil y la integridad estructural de las placas metálicas a lo largo del tiempo. Investigar cómo automatizar la captura y análisis de datos para facilitar la realización de pruebas a gran escala y reducir los errores humanos.

Implementar la técnica en el estudio de objetos no planos.

## Referencias

- [1] J. A. Leendertz, “Interferometric displacement measurement on scattering surfaces utilizing speckle effect,” *J. Phys. E.*, **3**(3), 214, (1970), DOI: [10.1088/0022-3735/3/3/312](https://doi.org/10.1088/0022-3735/3/3/312).
- [2] J. N. Butters and J. A. Leendertz, “Speckle pattern and holographic techniques in engineering metrology,” *Opt. Laser Technol.*, **3**(1), 26–30, (1971), DOI: [10.1016/S0030-3992\(71\)80007-5](https://doi.org/10.1016/S0030-3992(71)80007-5).
- [3] R. K. Erf, *Speckle Metrology*. Academic Press, (1978).
- [4] R. S. Sirohi, *Speckle Metrology*. Marcel Dekker Inc., (1993).
- [5] R. Jones and C. Wykes, *Holographic and Speckle Interferometry*. Cambridge University Press, (1989). DOI: [10.1017/CBO9780511622465](https://doi.org/10.1017/CBO9780511622465).
- [6] A. Labeyrie, S. G. Lipson, and P. Nisenson, *An Introduction to Optical Stellar Interferometry*. Cambridge University Press, (2006). DOI: [10.1017/CBO9780511617638](https://doi.org/10.1017/CBO9780511617638).
- [7] N. Ida and N. Meyendorf, *Handbook of Advanced Nondestructive Evaluation*. Cham: Springer International Publishing, (2019). DOI: [10.1007/978-3-319-26553-7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-26553-7).
- [8] E. Hecht, *Óptica*. Pearson, (2017).
- [9] F. L. Pedrotti, L. M. Pedrotti, and L. S. Pedrotti, *Introduction to Optics*. Cambridge University Press, (2017). DOI: [10.1017/9781108552493](https://doi.org/10.1017/9781108552493).
- [10] D. Malacara, *Óptica básica*. FONDO DE CULTURA ECONÓMICA (FCE), (2015)
- [11] P. Langenbeck, *Interferometry for Precision Measurement*. SPIE, (2014). DOI: [10.1117/3.928443](https://doi.org/10.1117/3.928443).
- [12] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*. John Wiley & sons, (2019).
- [13] P. Hariharan, *Optical Interferometry*. Elsevier, (2003).
- [14] G. H. Kaufmann, *Advances in Speckle Metrology and Related Techniques*. John Wiley & sons, (2011). DOI: [10.1002/9783527633852](https://doi.org/10.1002/9783527633852).
- [15] P. K. Rastogi, *Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques*. John Wiley & sons, (2001).
- [16] J. W. Goodman, “Statistical Properties of Laser Speckle Patterns,” in *Laser Speckle*

- and Related Phenomena*, Springer, (1975), 9–75. DOI: [10.1007/978-3-662-43205-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-662-43205-1_2).
- [17] L. Yang and X. Xie, *Digital shearography: new developments and applications*. SPIE Press, (2016).
- [18] D. Francis, R. P. Tatam, and R. M. Groves, “Shearography technology and applications: A review,” *Meas. Sci. Technol.*, **21**, 102001, (2010), DOI: [10.1088/0957-0233/21/10/102001](https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/10/102001).
- [19] C. Zuo *et al.*, “Deep learning in optical metrology: a review,” *Light Sci. Appl.*, **11**(39), 1–54, (2022), DOI: [10.1038/s41377-022-00714-x](https://doi.org/10.1038/s41377-022-00714-x).
- [20] W. Steinchen and L. Yang, *Digital Shearography: Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry*. SPIE Press, (2003).
- [21] Z. Haimei, *The Basic Properties of Building Materials*. Woodhead Publishing, (2011).
- [22] F. P. Beer, E. R. Johnston, J. T. DeWolf, and D. F. Mazurek, *Mecanica de materiales*. McGraw-Hill Interamericana, (2021).
- [23] D. G. Rethwisch and W. D. Callister Jr., *Materials Science and Engineering: An Introduction*. John Wiley & sons, (2019).
- [24] B. A. Boley and J. H. Weiner, *Theory of Thermal Stresses - Hardcover*. Dover Publications, (2012).
- [25] M. Servin, J. A. Quiroga, and J. M. Padilla, *Fringe Pattern Analysis for Optical Metrology*. John Wiley & sons, (2014). DOI: [10.1002/9783527681075](https://doi.org/10.1002/9783527681075).
- [26] M. Servin and J. C. Estrada, “Analysis and synthesis of phase shifting algorithms based on linear systems theory,” *Opt. Lasers Eng.*, **50**, 1009–1014, (2012), DOI: [10.1016/j.optlaseng.2011.12.012](https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2011.12.012).
- [27] W. D. Callister Jr., *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Reverté, (1996).
- [28] R. B. Hetnarski and M. R. Eslami, *Thermal Stresses—Advanced Theory and Applications* in *Solid Mechanics and Its Applications*, **158**. Cham: Springer International Publishing, (2019). DOI: [10.1007/978-3-030-10436-8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-10436-8).
- [29] I. Kompanets and N. Zalyapin, “Methods and Devices of Speckle-Noise Suppression (Review),” *Opt. Photonics J.*, **10**, 219–250, (2020), DOI: [10.4236/opj.2020.1010023](https://doi.org/10.4236/opj.2020.1010023).
- [30] N. Saberi Nasrabad, D. Akbari, M. Karfi, and S. Ghobadi, “Defect detection by laser

- shear interferometry based on the thermal response of materials with vibratory loading,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, **237**(4), 630–642, (2023), DOI: [10.1177/09544054221110739](https://doi.org/10.1177/09544054221110739).
- [31] P. Meinschmidt, K. D. Hinsch, and R. S. Sirohi, *Selected Papers on Electronic Speckle Pattern Interferometry: Principles and Practice*. Spie Milestone Series, (1996).
- [32] R. S. Sirohi, J. Burke, H. Helmers, and K. D. Hinsch, “Spatial phase shifting for pure in-plane displacement and displacement-derivative measurements in electronic speckle pattern interferometry (ESPI),” *Appl. Opt.*, **36**(23), 5787–5791, (1997), DOI: [10.1364/ao.36.005787](https://doi.org/10.1364/ao.36.005787).
- [33] J. C. Estrada, M. Servin, and J. A. Quiroga, “A self-tuning phase-shifting algorithm for interferometry,” *Opt. Express*, **18**(3), 2632, (2010), DOI: [10.1364/oe.18.002632](https://doi.org/10.1364/oe.18.002632).
- [34] W. S. Wan Abdullah and J. N. Petzing, “Development of speckle shearing interferometer error analysis as an aperture function of wavefront divergence,” *J. Mod. Opt.*, **52**(11), 1495–1510, (2005), DOI: [10.1080/09500340500052887](https://doi.org/10.1080/09500340500052887).
- [35] L. Yang and A. Ettemeyer, “Strain measurement by three-dimensional electronic speckle pattern interferometry: potentials, limitations, and applications,” *Opt. Eng.*, **42**(5), 1257–1266, (2003), DOI: [10.1117/1.1566781](https://doi.org/10.1117/1.1566781).
- [36] G. A. Gómez-Méndez, A. Martínez-García, J. Antonio Rayas, and A. Gaitán, “Application of speckle interferometry to the mechanical characterization of a biopolymer sample,” *Appl. Opt.*, **59**(13), 148, (2020), DOI: [10.1364/AO.383357](https://doi.org/10.1364/AO.383357).
- [37] 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,” *Appl. Opt.*, **58**(18), 4963, (2019), DOI: [10.1364/AO.58.004963](https://doi.org/10.1364/AO.58.004963).
- [38] Y. Arai, “Development of in-plane and out-of-plane deformations simultaneous measurement method for the analysis of buckling,” *Opt. Eng.*, **54**(2), 024102, (2015), DOI: [10.1117/1.oe.54.2.024102](https://doi.org/10.1117/1.oe.54.2.024102).
- [39] C. Vial-Edwards, I. Lira, A. Martinez, and M. Münzenmayer, “Electronic speckle pattern interferometry analysis of tensile tests of semihard copper sheets,” *Exp. Mech.*, **41**(1), 58–62, (2001), DOI: [10.1007/BF02323105](https://doi.org/10.1007/BF02323105).
- [40] F. Labbé, “Strain-rate measurements by electronic speckle-pattern interferometry



- (ESPI),” *Opt. Lasers Eng.*, **45**, 827–833, (2007), DOI: [10.1016/j.optlaseng.2006.04.003](https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2006.04.003).
- [41] N.-I. Toto-Arellano, D. I. Serrano-García, A. M. García, G. R. Zurita, and A. Montes-Pérez, “4D profile of phase objects through the use of a simultaneous phase shifting quasi-common path interferometer,” *J. Opt.*, **13**(11), 115502, (2011), DOI: [10.1088/2040-8978/13/11/115502](https://doi.org/10.1088/2040-8978/13/11/115502).
- [42] N.-I. Toto-Arellano, D.-I. Serrano-García, and A. Martínez-García, “Parallel two-step phase shifting interferometry using a double cyclic shear interferometer,” *Opt. Express*, **21**(26), 31983, (2013), DOI: [10.1364/oe.21.031983](https://doi.org/10.1364/oe.21.031983).
- [43] A. Martínez, 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,” *Appl. Opt.*, **44**(7), 1141–1149, (2005), DOI: [10.1364/AO.44.001141](https://doi.org/10.1364/AO.44.001141).
- [44] J. Li, G. Yao, and L. V. Wang, “Degree of polarization in laser speckles from turbid media: Implications in tissue optics,” *J. Biomed. Opt.*, **7**(3), 307–312, (2002), DOI: [10.1117/1.1483313](https://doi.org/10.1117/1.1483313).
- [45] F. Chen, “Digital shearography: state of the art and some applications,” *J. Electron. Imaging*, **10**(1), 240–251, (2001), DOI: [10.1117/1.1329336](https://doi.org/10.1117/1.1329336).
- [46] Y. Y. Hung and H. P. Ho, “Shearography: An optical measurement technique and applications,” *Mater. Sci. Eng. R Reports*, **49**, 61–87, (2005), DOI: [10.1016/j.mser.2005.04.001](https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.04.001).
- [47] R. Sirohi, “Shearography and its applications – a chronological review,” *Light Adv. Manuf.*, **3**(1), 1–30, (2022), DOI: [10.37188/lam.2022.001](https://doi.org/10.37188/lam.2022.001).

## Apéndice A. Códigos utilizados en Matlab

```
clear; close all;
```

```
                                %% Lectura de imagenes
                                % Datos del haz derecho o brazo derecho
Ref0 = double(imread('der26-06-23-14-06-30_1.bmp'));
imag0 = double(imread('der26-06-23-14-06-50_0.bmp'));
imag1 = double(imread('der26-06-23-14-06-50_1.bmp'));
imag2 = double(imread('der26-06-23-14-06-50_2.bmp'));
imag3 = double(imread('der26-06-23-14-06-50_3.bmp'));
imag4 = double(imread('der26-06-23-14-06-50_4.bmp'));

                                % Datos del haz izquierdo o brazo izquierdo
Ref0i = double(imread('izq26-06-23-14-02-40_1.bmp'));
imag0i = double(imread('izq26-06-23-14-02-51_0.bmp'));
imag1i = double(imread('izq26-06-23-14-02-51_1.bmp'));
imag2i = double(imread('izq26-06-23-14-02-51_2.bmp'));
imag3i = double(imread('izq26-06-23-14-02-51_3.bmp'));
imag4i = double(imread('izq26-06-23-14-02-51_4.bmp'));

size(imag0) % Devolverá las dimensiones de la imagen (filas, columnas, canales)

                                % Datos del haz derecho o brazo derecho
Ref01 = double(imread('der26-06-23-14-06-30_1.bmp'));
imag01 = double(imread('der26-06-23-14-06-40_0.bmp'));
imag11 = double(imread('der26-06-23-14-06-40_1.bmp'));
imag21 = double(imread('der26-06-23-14-06-40_2.bmp'));
imag31 = double(imread('der26-06-23-14-06-40_3.bmp'));
imag41 = double(imread('der26-06-23-14-06-40_4.bmp'));

                                % Datos del haz izquierdo o brazo izquierdo
Ref0i1 = double(imread('izq26-06-23-14-02-40_1.bmp'));
imag0i1 = double(imread('izq26-06-23-14-03-01_0.bmp'));
imag1i1 = double(imread('izq26-06-23-14-03-01_1.bmp'));
imag2i1 = double(imread('izq26-06-23-14-03-01_2.bmp'));
imag3i1 = double(imread('izq26-06-23-14-03-01_3.bmp'));
imag4i1 = double(imread('izq26-06-23-14-03-01_4.bmp'));

                                % Datos del haz derecho o brazo derecho
Ref02 = double(imread('der26-06-23-14-06-30_1.bmp'));
imag02 = double(imread('der26-06-23-14-07-00_0.bmp'));
imag12 = double(imread('der26-06-23-14-07-00_1.bmp'));
imag22 = double(imread('der26-06-23-14-07-00_2.bmp'));
imag32 = double(imread('der26-06-23-14-07-00_3.bmp'));
imag42 = double(imread('der26-06-23-14-07-00_4.bmp'));

                                % Datos del haz izquierdo o brazo izquierdo
Ref0i2 = double(imread('izq26-06-23-14-02-40_1.bmp'));
imag0i2 = double(imread('izq26-06-23-14-03-11_0.bmp'));
imag1i2 = double(imread('izq26-06-23-14-03-11_1.bmp'));
imag2i2 = double(imread('izq26-06-23-14-03-11_2.bmp'));
imag3i2 = double(imread('izq26-06-23-14-03-11_3.bmp'));
imag4i2 = double(imread('izq26-06-23-14-03-11_4.bmp'));
```

```

    % Datos del haz derecho o brazo derecho
Ref03 = double(imread('der26-06-23-14-06-30_1.bmp'));
imag03 = double(imread('der26-06-23-14-07-11_0.bmp'));
imag13 = double(imread('der26-06-23-14-07-11_1.bmp'));
imag23 = double(imread('der26-06-23-14-07-11_2.bmp'));
imag33 = double(imread('der26-06-23-14-07-11_3.bmp'));
imag43 = double(imread('der26-06-23-14-07-11_4.bmp'));

    % Datos del haz izquierdo o brazo izquierdo
Ref0i3 = double(imread('izq26-06-23-14-02-40_1.bmp'));
imag0i3 = double(imread('izq26-06-23-14-03-21_0.bmp'));
imag1i3 = double(imread('izq26-06-23-14-03-21_1.bmp'));
imag2i3 = double(imread('izq26-06-23-14-03-21_2.bmp'));
imag3i3 = double(imread('izq26-06-23-14-03-21_3.bmp'));
imag4i3 = double(imread('izq26-06-23-14-03-21_4.bmp'));

    %% Resta de las imagenes
    % Resta de las imagenes del brazo derecho
    Res10 = abs(imag0 - Ref0);
    Res20 = abs(imag1 - Ref0);
    Res30 = abs(imag2 - Ref0);
    Res40 = abs(imag3 - Ref0);
    Res00 = abs(imag4 - Ref0);
    % Resta de las imagenes del brazo izquierdo
    Res1i0 = abs(imag0i - Ref0i);
    Res2i0 = abs(imag1i - Ref0i);
    Res3i0 = abs(imag2i - Ref0i);
    Res4i0 = abs(imag3i - Ref0i);
    Res0i0 = abs(imag4i - Ref0i);

    % Resta de las imagenes del brazo derecho
    Res101 = abs(imag01 - Ref01);
    Res201 = abs(imag11 - Ref01);
    Res301 = abs(imag21 - Ref01);
    Res401 = abs(imag31 - Ref01);
    Res001 = abs(imag41 - Ref01);
    % Resta de las imagenes del brazo izquierdo
    Res1i01 = abs(imag0i1 - Ref0i1);
    Res2i01 = abs(imag1i1 - Ref0i1);
    Res3i01 = abs(imag2i1 - Ref0i1);
    Res4i01 = abs(imag3i1 - Ref0i1);
    Res0i01 = abs(imag4i1 - Ref0i1);

    % Resta de las imagenes del brazo derecho
    Res102 = abs(imag02 - Ref02);
    Res202 = abs(imag12 - Ref02);
    Res302 = abs(imag22 - Ref02);
    Res402 = abs(imag32 - Ref02);
    Res002 = abs(imag42 - Ref02);
    % Resta de las imagenes del brazo izquierdo
    Res1i02 = abs(imag0i2 - Ref0i2);
    Res2i02 = abs(imag1i2 - Ref0i2);
    Res3i02 = abs(imag2i2 - Ref0i2);
    Res4i02 = abs(imag3i2 - Ref0i2);

```

```

Res0i02 = abs(imag4i2 - Ref0i2);

% Resta de las imagenes del brazo derecho
Res103 = abs(imag03 - Ref03);
Res203 = abs(imag13 - Ref03);
Res303 = abs(imag23 - Ref03);
Res403 = abs(imag33 - Ref03);
Res003 = abs(imag43 - Ref03);
% Resta de las imagenes del brazo izquierdo
Res1i03 = abs(imag0i3 - Ref0i3);
Res2i03 = abs(imag1i3 - Ref0i3);
Res3i03 = abs(imag2i3 - Ref0i3);
Res4i03 = abs(imag3i3 - Ref0i3);
Res0i03 = abs(imag4i3 - Ref0i3);

% intentando colocar un filtro a la resta de las imagenes(patrones de franja)
% h = fspecial('gaussian',15, 10);
h = fspecial('gaussian',25,25);
% Filtrando las imagenes del brazo derecho
Res1 = imfilter(mat2gray(Res10),h,'replicate');
Res2 = imfilter(mat2gray(Res20),h,'replicate');
Res3 = imfilter(mat2gray(Res30),h,'replicate');
Res4 = imfilter(mat2gray(Res40),h,'replicate');
Res0 = imfilter(mat2gray(Res00),h,'replicate');
% Filtrando las imagenes del brazo izquierdo
Res1i = imfilter(mat2gray(Res1i0),h,'replicate');
Res2i = imfilter(mat2gray(Res2i0),h,'replicate');
Res3i = imfilter(mat2gray(Res3i0),h,'replicate');
Res4i = imfilter(mat2gray(Res4i0),h,'replicate');
Res0i = imfilter(mat2gray(Res0i0),h,'replicate');

Res11 = imfilter(mat2gray(Res101),h,'replicate');
Res21 = imfilter(mat2gray(Res201),h,'replicate');
Res31 = imfilter(mat2gray(Res301),h,'replicate');
Res41 = imfilter(mat2gray(Res401),h,'replicate');
Res01 = imfilter(mat2gray(Res001),h,'replicate');
% Filtrando las imagenes del brazo izquierdo
Res1i1 = imfilter(mat2gray(Res1i01),h,'replicate');
Res2i1 = imfilter(mat2gray(Res2i01),h,'replicate');
Res3i1 = imfilter(mat2gray(Res3i01),h,'replicate');
Res4i1 = imfilter(mat2gray(Res4i01),h,'replicate');
Res0i1 = imfilter(mat2gray(Res0i01),h,'replicate');

Res12 = imfilter(mat2gray(Res102),h,'replicate');
Res22 = imfilter(mat2gray(Res202),h,'replicate');
Res32 = imfilter(mat2gray(Res302),h,'replicate');
Res42 = imfilter(mat2gray(Res402),h,'replicate');
Res02 = imfilter(mat2gray(Res002),h,'replicate');
% Filtrando las imagenes del brazo izquierdo
Res1i2 = imfilter(mat2gray(Res1i02),h,'replicate');
Res2i2 = imfilter(mat2gray(Res2i02),h,'replicate');
Res3i2 = imfilter(mat2gray(Res3i02),h,'replicate');
Res4i2 = imfilter(mat2gray(Res4i02),h,'replicate');
Res0i2 = imfilter(mat2gray(Res0i02),h,'replicate');

```

```

Res13 = imfilter(mat2gray(Res103),h,'replicate');
Res23 = imfilter(mat2gray(Res203),h,'replicate');
Res33 = imfilter(mat2gray(Res303),h,'replicate');
Res43 = imfilter(mat2gray(Res403),h,'replicate');
Res03 = imfilter(mat2gray(Res003),h,'replicate');
    % Filtrando las imagenes del brazo izquierdo
Res1i3 = imfilter(mat2gray(Res1i03),h,'replicate');
Res2i3 = imfilter(mat2gray(Res2i03),h,'replicate');
Res3i3 = imfilter(mat2gray(Res3i03),h,'replicate');
Res4i3 = imfilter(mat2gray(Res4i03),h,'replicate');
Res0i3 = imfilter(mat2gray(Res0i03),h,'replicate');

    %% Desplazamiento de fase / Fase envuelta

    % Calcular la fase envuelta del brazo derecho
        Ia = (Res2 - Res4);
        Ib = (Res1 - Res3);
        Phi = atan2(Ia, Ib); %fase envuelta
    % Calcular la fase envuelta del brazo izquierdo
        Iai = (Res2i - Res4i);
        Ibi = (Res1i - Res3i);
        Phii = atan2(Iai, Ibi); %fase envuelta

    % Calcular la fase envuelta del brazo derecho
        Ia1 = (Res21 - Res41);
        Ib1 = (Res11 - Res31);
        Phi1 = atan2(Ia1, Ib1); %fase envuelta
    % Calcular la fase envuelta del brazo izquierdo
        Iai1 = (Res2i1 - Res4i1);
        Ibi1 = (Res1i1 - Res3i1);
        Phii1 = atan2(Iai1, Ibi1); %fase envuelta

    % Calcular la fase envuelta del brazo derecho
        Ia2 = (Res22 - Res42);
        Ib2 = (Res12 - Res32);
        Phi2 = atan2(Ia2, Ib2); %fase envuelta
    % Calcular la fase envuelta del brazo izquierdo
        Iai2 = (Res2i2 - Res4i2);
        Ibi2 = (Res1i2 - Res3i2);
        Phii2 = atan2(Iai2, Ibi2); %fase envuelta

    % Calcular la fase envuelta del brazo derecho
        Ia3 = (Res23 - Res43);
        Ib3 = (Res13 - Res33);
        Phi3 = atan2(Ia3, Ib3); %fase envuelta
    % Calcular la fase envuelta del brazo izquierdo
        Iai3 = (Res2i3 - Res4i3);
        Ibi3 = (Res1i3 - Res3i3);
        Phii3 = atan2(Iai3, Ibi3); %fase envuelta

    %% Fase desenvuelta
    % Fase desenvuelta del brazo derecho
Fase_R=phase_unwrap(Phi); %función de desenvolvimiento
    % Fase_final = single(Fase_R);
        Fase_final = Fase_R;

```

```

        % Fase desenvuelta del brazo izquierdo
Fase_Ri=phase_unwrap(Phi1); %función de desdolvimiento
        % Fase_finali = single(Fase_Ri);
        Fase_finali = Fase_Ri;

        % Fase desenvuelta del brazo derecho
Fase_R1=phase_unwrap(Phi1); %función de desdolvimiento
        % Fase_final = single(Fase_R);
        Fase_final1 = Fase_R1;
        % Fase desenvuelta del brazo izquierdo
Fase_Ri1=phase_unwrap(Phi11); %función de desdolvimiento
        % Fase_finali = single(Fase_Ri);
        Fase_finali1 = Fase_Ri1;

        % Fase desenvuelta del brazo derecho
Fase_R2=phase_unwrap(Phi2); %función de desdolvimiento
        % Fase_final = single(Fase_R);
        Fase_final2 = Fase_R2;
        % Fase desenvuelta del brazo izquierdo
Fase_Ri2=phase_unwrap(Phi2); %función de desdolvimiento
        % Fase_finali = single(Fase_Ri);
        Fase_finali2 = Fase_Ri2;

        % Fase desenvuelta del brazo derecho
Fase_R3=phase_unwrap(Phi3); %función de desdolvimiento
        % Fase_final = single(Fase_R);
        Fase_final3 = Fase_R3;
        % Fase desenvuelta del brazo izquierdo
Fase_Ri3=phase_unwrap(Phi3); %función de desdolvimiento
        % Fase_finali = single(Fase_Ri);
        Fase_finali3 = Fase_Ri3;

        %% Conversión de pixel a mm
        pixel=85/1200;
        [fil,col]=size(Phi);
        x=pixel*linspace(0,col,col);
        y=pixel*linspace(0,fil,fil);

        %% Suma de fases desenvueltas
        Sumfase = (Fase_finali + Fase_final);
        % Fase desenvuelta del brazo derecho
        figure();
subplot(3,2,1);imagesc(Sumfase);title('Suma de Fase desenvuelta (Haz derecho y
        haz izquierdo)');
subplot(3,2,2); plot(x(:,400:1200),Sumfase(800:800,400:1200),'m');title('Perfil
        fase desenvuelta (Suma)');xlabel('\it x (mm)');ylabel('\it y (mm)');
subplot(3,2,3);imagesc(Phi);title('Fase envuelta (H.derecho)');colormap("gray");
        subplot(3,2,4);imagesc(Fase_final);title('Fase desenvuelta
        (H.derecho)');colormap("gray");
        subplot(3,2,5);imagesc(Phi1);title('Fase envuelta
        (H.izquierdo)');colormap("gray");
subplot(3,2,6);imagesc(Fase_finali);title('Fase desenvuelta
        (H.izquierdo)');colormap("gray");

```

```

Sumfase1 = (Fase_finali1 + Fase_final1);
% Fase desenvuelta del brazo derecho
figure();
subplot(3,2,1);imagesc(Sumfase1);title('Suma de Fase desenvuelta (Haz derecho y
haz izquierdo)');
subplot(3,2,2); plot(x(:,400:1200),Sumfase1(800:800,400:1200),'m');title('Perfil
fase desenvuelta (Suma)');xlabel('\it x (mm)');ylabel('\it y (mm)');
subplot(3,2,3);imagesc(Phi1);title('Fase envuelta
(H.derecho)');colormap("gray");
subplot(3,2,4);imagesc(Fase_final1);title('Fase desenvuelta
(H.derecho)');colormap("gray");
subplot(3,2,5);imagesc(Phi11);title('Fase envuelta
(H.izquierdo)');colormap("gray");
subplot(3,2,6);imagesc(Fase_finali1);title('Fase desenvuelta
(H.izquierdo)');colormap("gray");

Sumfase2 = (Fase_finali2 + Fase_final2);
% Fase desenvuelta del brazo derecho
figure();
subplot(3,2,1);imagesc(Sumfase2);title('Suma de Fase desenvuelta (Haz derecho y
haz izquierdo)');
subplot(3,2,2); plot(x(:,400:1200),Sumfase2(800:800,400:1200),'m');title('Perfil
fase desenvuelta (Suma)');xlabel('\it x (mm)');ylabel('\it y (mm)');
subplot(3,2,3);imagesc(Phi2);title('Fase envuelta
(H.derecho)');colormap("gray");
subplot(3,2,4);imagesc(Fase_final2);title('Fase desenvuelta
(H.derecho)');colormap("gray");
subplot(3,2,5);imagesc(Phi22);title('Fase envuelta
(H.izquierdo)');colormap("gray");
subplot(3,2,6);imagesc(Fase_finali2);title('Fase desenvuelta
(H.izquierdo)');colormap("gray");

Sumfase3 = (Fase_finali3 + Fase_final3);
% Fase desenvuelta del brazo derecho
figure();
subplot(3,2,1);imagesc(Sumfase3);title('Suma de Fase desenvuelta (Haz derecho y
haz izquierdo)');
subplot(3,2,2); plot(x(:,400:1200),Sumfase3(800:800,400:1200),'m');title('Perfil
fase desenvuelta (Suma)');xlabel('\it x (mm)');ylabel('\it y (mm)');
subplot(3,2,3);imagesc(Phi3);title('Fase envuelta
(H.derecho)');colormap("gray");
subplot(3,2,4);imagesc(Fase_final3);title('Fase desenvuelta
(H.derecho)');colormap("gray");
subplot(3,2,5);imagesc(Phi33);title('Fase envuelta
(H.izquierdo)');colormap("gray");
subplot(3,2,6);imagesc(Fase_finali3);title('Fase desenvuelta
(H.izquierdo)');colormap("gray");

%% Campo de deformación usando la suma de haces
% Datos necesarios
L=6.328e-4; % longitud de onda en mm
radianes = pi/15; % la funcion tiene que estar escrita con pi
theta = (radianes)*(180)/pi;
fprintf('\n El angulo es %0.1f\n', theta);
% theta=12; % angulo de incidencia en el material

```

```

sheax=2; % shearing aplicado al espejo en mm

% Campo de deformación del brazo derecho y del brazo izquierdo (Suma)
wx= (Sumfase*L)/(4*pi*sheax.*(1+cos(theta)));
wx1= (Sumfase1*L)/(4*pi*sheax.*(1+cos(theta)));
wx2= (Sumfase2*L)/(4*pi*sheax.*(1+cos(theta)));
wx3= (Sumfase3*L)/(4*pi*sheax.*(1+cos(theta)));

figure();
subplot(1,2,1);imagesc(x,y,wx); colormap("turbo");colorbar;title('Campo de
deformación de la suma de fases');
subplot(1,2,2); plot(x(:,100:1200),wx(600:600,100:1200), 'Color',[0.3010 0.7450
0.9330]);title('Perfil campo deformación (suma)');
figure();
subplot(1,2,1);imagesc(x,y,wx1); colormap("turbo");colorbar;title('Campo de
deformación de la suma de fases');
subplot(1,2,2); plot(x(:,100:1200),wx1(600:600,100:1200), 'Color',[0.3010 0.7450
0.9330]);title('Perfil campo deformación (suma)');
figure();
subplot(1,2,1);imagesc(x,y,wx2); colormap("turbo");colorbar;title('Campo de
deformación de la suma de fases');
subplot(1,2,2); plot(x(:,100:1200),wx2(600:600,100:1200), 'Color',[0.3010 0.7450
0.9330]);title('Perfil campo deformación (suma)');
figure();
subplot(1,2,1);imagesc(x,y,wx3); colormap("turbo");colorbar;title('Campo de
deformación de la suma de fases');
subplot(1,2,2); plot(x(:,100:1200),wx3(600:600,100:1200), 'Color',[0.3010 0.7450
0.9330]);title('Perfil campo deformación (suma)');

%% Representacion en 3D del campo de deformación según la resta, suma y la
ecuación theta=0
% Esta entonces es la representación en 3D de la deformación según la suma
figure(); meshc(x,y,wx); colormap ("jet");title('Mapa de deformacion a partir de
la suma de las fases');colorbar; xlabel('x'); ylabel('y'); zlabel('z (dw/dx)');
figure(); meshc(x,y,wx1); colormap ("jet");title('Mapa de deformacion a partir
de la suma de las fases');colorbar; xlabel('x'); ylabel('y'); zlabel('z
(dw/dx)');
figure(); meshc(x,y,wx2); colormap ("jet");title('Mapa de deformacion a partir
de la suma de las fases');colorbar; xlabel('x'); ylabel('y'); zlabel('z
(dw/dx)');
figure(); meshc(x,y,wx3); colormap ("jet");title('Mapa de deformacion a partir
de la suma de las fases');colorbar; xlabel('x'); ylabel('y'); zlabel('z
(dw/dx)');

%% Ahora lo que se busca es encontrar el error de encontrar dw/dx con la
ecuacion con la de la suma

% Calcular el error absoluto medio
error_absoluto_medio = mean2(abs(Sumfase - Fase_final));

% Calcular el error porcentual
error_porcentual_fase = (error_absoluto_medio / 255) * 100; % Suponiendo
imágenes de 8 bits (0-255)

% Mostrar el resultado

```



```

fprintf('El error porcentual entre las las fases usando correctamente la funcion
        mean2 es: %.2f%%\n', error_porcentual_fase);

        % Calcular el error absoluto medio
        error_absoluto_m = mean2(abs(wx - we));

        % Calcular el error porcentual
        error_porcentual_f = (error_absoluto_m / 255) * 100;

        % Mostrar el resultado
fprintf('El error porcentual entre las deformacion usando correctamente la
        funcion mean2 es: %.2f%%\n', error_porcentual_fase);

        %% Calculo de integrales de w (segun las ecuaciones)
% Integral de wx y we a partir de los gráficos de las derivadas de wx y we

        % Número de puntos en x y y
        [filas, columnas] = size(wx);

        % Inicializar una matriz para almacenar las integrales de wx
        integral_wx = zeros(filas, columnas);

        % Calcular las integrales a lo largo de cada perfil de wx
        for i = 1:filas
integral_wx(i, :) = cumsum(wx(i, :)); % Integra a lo largo de las columnas (eje
        x)
        end

        % Crear una matriz 3D con perfiles en el eje z
        [X, Y] = meshgrid(x, y);
        Z = integral_wx;

        % Normalizar los valores en Z para expandir el rango
        Z_normalized = (Z - min(Z(:))) / (max(Z(:)) - min(Z(:)));

        % Amplificar los valores en Z si es necesario
% Z_amplificado = Z_normalized * 100; % Ajusta el factor según sea necesario

        % Crear la representación en 3D

figure(17); meshc(x,y,Z_normalized); colormap ("jet");title('Integral a partir
        de la figura 4.5b');colorbar; xlabel('x (mm)'); ylabel('y (mm)'); zlabel('z
        (\mum)');

        %% Calculo de la Temperatura

        % Propiedades termomecánicas del aluminio (valores de ejemplo)
alpha_aluminum = 23e-6; % Coeficiente de dilatación térmica lineal del aluminio
        (en 1/C)

% Calcular la variación de temperatura a partir del campo de deformación (para
        'wx')
        dT_wx = Z * 1000.*(1 / (100))*(alpha_aluminum));

```

```

% Calcular la variación de temperatura a partir del campo de deformación (para
    'we')
    dT_we = abs(we * (1 / alpha_aluminum));

figure(19); meshc(x,y,dT_we); colormap ("jet");title('Variación de Temperatura
(°C) we');colorbar; xlabel('x(mm)'); ylabel('y (mm)'); zlabel('z (Temperatura
(°C))');
    colorbar;
    caxis([min(dT_we(:)), max(dT_we(:))]);

    % Mostrar las figuras
    figure(20);
    subplot(1,2,1);
    plot(y, dT_wx(:, 600));
    title('Perfil de Variación de Temperatura en x=600 (w)');
    xlabel('x (mm)');
    ylabel('Variación de Temperatura (°C)');

    subplot(1,2,2);
    plot(y, dT_we(:, 600));
    title('Perfil de Variación de Temperatura en x=600 (wi)');
    xlabel('x (mm)');
    ylabel('Variación de Temperatura (°C)');

alpha = 23.1e-6; % Coeficiente de dilatación térmica del aluminio en 1/°C
Lx_original = 0.14493; % Ancho original en metros
Ly_original = 0.09390; % Alto original en metros
Lz_original = 0.00027; %Ancho de la placa

[filas, columnas] = size(Z);
temperatura_estimada = zeros(filas, columnas);

% Calcular la temperatura estimada en cada punto de la placa
    for i = 1:filas
        for j = 1:columnas
            deformacion = Z(i, j); % Deformación en el punto (x(i), y(j))
            temperatura_estimada(i, j) = deformacion * 1e-5 / (alpha *Lz_original);
        end
    end

% Ahora, temperatura_estimada contiene las estimaciones de temperatura en cada
punto de la placa.

figure(21); meshc(x,y,temperatura_estimada); colormap ("jet");title('Mapa de
Temperatura wx');colorbar; xlabel('x'); ylabel('y'); zlabel('z (wx)');

```