

Centro de Investigaciones en Óptica A.C.



Aplicación de la Interferometría de Patrones de Moteado y la Holografía Digital al Estudio de Deformaciones en 3D en Piezas Metálicas

Tesis presentada por:

Ing. Manuel Humberto De la Torre Ibarra

Como requisito parcial para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias (Óptica)

León, Guanajuato, México. Marzo 2003

Resumen de la tesis del Ing. Manuel Humberto De la Torre Ibarra, presentada como requisito para la obtención del grado de Maestro en Ciencias (óptica) en la ciudad de León Guanajuato, México Diciembre del 2002.

Resumen aprobado por:

Dr. Fernando Mendoza Santoyo

Director de tesis

El llevar las técnicas de la metrología óptica a situaciones cada vez más extremas, es posible gracias a los avances tecnológicos con que contamos y que permiten desarrollar sistemas mucho más compactos y capaces de interrogar objetos en situaciones marginales, proyectando así, las técnicas de medición en ambientes cada vez más reales. El presente trabajo, trata de la aplicación de la holografía digital con tres fuentes de iluminación como herramienta para observar esfuerzos presentes en piezas metálicas de uso industrial y que normalmente son difíciles de interrogar dada su rigidez y uso al que se ven sometidas. El sistema optoelectrónico que se adoptó para realizar las mediciones, tiene como finalidad el ser lo más flexible posible, pensando en condiciones mucho más inaccesibles. Para en un futuro, desarrollar un sistema robusto que se pueda transportar y operar en las instalaciones en que sea requerido. Por orden se presentan también los resultados obtenidos a través de la técnica de ESPI* así como el tipo de información obtenida para la finalidad perseguida de analizar el estado real de las piezas metálicas. De la misma manera, se hace una presentación de los resultados obtenidos por medio de la holografía digital con tres haces de iluminación y las conclusiones a las que se llegó al finalizar este proyecto.

* Electronic Speckle Pattern Interferometry

Dedicatoria

Si es que no hay camino trazado, y este se hace al andar, mi dedicatoria debe abrazar a un sin fin de personas a las que estimo y llevo conmigo a donde quiera que mi camino se dirija...

Con cariño a mi esposa Mónica, que es gracias a tu apoyo incondicional y tus palabras de aliento a lo largo de todos estos años, que pude realizar mis sueños, aún y cuando me sentía abatido y sin energías para continuar con ellos. Así mismo reconozco el profundo apoyo que mi familia a sabido darme a lo largo de mi existencia y que con gusto le retribuiré de alguna forma...

A mis amigos y conocidos, los nuevos y los viejos, que aunque a muchos el destino nos lleva por caminos distintos, los recuerdo a menudo y pido por que sus metas se vean materializadas, y quizás algún día... volvernos a encontrar.

A los sin nombre, a esa enorme mayoría que solo aparece en las estadísticas, a los que solo se sabe que existen por vil deducción, a los que ayudan a los demás sin siquiera conocerle, a los que nos hemos encontrado en el camino, a los que están por venir, a los que se fueron, a los que nunca conoceré, a los que nada tienen, a los que todo lo dan, a los que ayude, a los que me ayudaron... gracias de todo corazón por estar ahí... y ser siempre los sin nombre...

Y como olvidarte a ti, que sin ti nada soy y contigo todo soy, gracias por ayudarme con mi misión en esta vida, por estar conmigo así en las buenas o en las malas... gracias por ser y no ser...

--- M.D. ---

Reconocimientos

Al Centro de Investigaciones en Óptica por haber sido mi segunda casa durante estos dos años, y en donde encontré personas valiosas a las que admiro y respeto, además de una serie de experiencias valiosas (buenas y malas), que siempre llevaré conmigo.

Mi más sincero y sencillo reconocimiento al CONACyT, por nada menos y nada más que apoyarme económicamente durante mis estudios de maestría y gracias al cual, hoy concluyen.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a todos mis maestros, a los buenos y a los malos, pues dejaron en mi una valiosa enseñanza que les agradezco infinitamente, y es a través de ustedes mis queridos educadores, que se abre una ventana que nos muestra lo que debe y no debe ser en la vida profesional y personal.

- muchas gracias -

A mi director de tesis, el Dr. Fernando Mendoza Santoyo, que aunque no te hable de usted, sabes que te respeto, y te agradezco la confianza que depositaste en mí, para la realización de este tema de tesis. Así también gracias por tu apoyo incondicional para el buen término de este trabajo.

A todo el personal del CIO, que con su trabajo en particular ayudaron de igual manera a la feliz conclusión de mi trabajo de tesis, vaya pues, a todos y cada uno, mi más sincero agradecimiento.

Indice General

Capitulo I	1
Introducción	2
Capitulo II	5
2.1 Moteado	6
2.1.1 Moteado objetivo	7
2.1.2 Moteado subjetivo	9
2.2 Spi	11
2.2.1 Correlación por sustracción	12
2.2.2 Correlación por adición	13
2.3 Espi	15
2.3.1 Interferómetro fuera del plano	16
2.3.2 Interferómetro en el plano	16
2.4 Holografía digital	18
2.5 Iluminación	18
2.6 Sensibilidad en patrones de moteado	19
2.7 Deformaciones 3D	23
2.8 Obtención de fase por medio de la transformada de Fourier	24
2.9 Esfuerzos	26
2.10 Referencias	35
Capitulo III	36
Sección 1 Pruebas por medio de Espi.	38
Sección 1.1 Prueba estática para la barra 1	41
Sección 1.1.1 Prueba con vibración para la barra 1	45
Sección 1.2 Prueba estática para la barra 2 (anverso y reverso)	46
Sección 1.2.1 Prueba con vibración para la barra 2	54
Sección 2 Pruebas por medio de holografía digital.	56
Sección 2.1 Prueba estática para la barra 1	60
Sección 2.2 Prueba estática para la barra 2 en el anverso	62
Sección 2.3 Prueba estática para la barra 2 en el reverso	65

Capitulo IV	67
4.1 Resultados con la barra 1	68
4.2 Resultados con la barra 2	72
Capitulo V	75
5.1 Conclusiones Generales	77
5.2 Trabajo a futuro	78
Apéndice A	79
Pruebas de la perturbación a ejercer en los objetos	80

Indice de figuras

Figura 2.1	Esparcimiento de la luz sobre una superficie rugosa	6
Figura 2.2	Patrón de moteado	7
Figura 2.3	Formación de moteado objetivo	8
Figura 2.4	Formación de moteado subjetivo	9
Figura 2.5	Interferómetro fuera del plano	16
Figura 2.6	Interferómetro en el plano	17
Figura 2.7	Arreglo geométrico para el estudio de la sensibilidad	20
Figura 2.8	Vector de sensibilidad	21
Figura 2.9	Esquema de la transformada de Fourier para el cálculo de la fase	25
Figura 2.10	Distorsión de un cubo arbitrario dentro de un cuerpo, sometido a un sistema de fuerzas	28
Figura 2.11	Gradientes de desplazamiento asociados con el esfuerzo normal ϵ_{xx}	29
Figura 2.12	Gradientes de desplazamiento asociados con el esfuerzo compartido γ_{xy}	31
Figura 3.1	Objetos a) Imagen de la barra 1 b) Imagen de la barra 2	38
Figura 3.2	Objetos a) Barra 1 con revelador b) Barra 2 con revelador	39
Figura 3.3	Arreglo para Espi	40
Figura 3.4	Perturbación ejercida en la barra 1	42
Figura 3.5	Area central de la barra 1 (recuadro blanco)	44
Figura 3.6	Patrones de franjas de la barra 1	45
Figura 3.7	Modo de vibración obtenido a 1.2khz	46
Figura 3.8	Perturbación ejercida en la barra 2 en su parte superior	47
Figura 3.9	Daño en la parte superior de la barra 2	49
Figura 3.10	Combinaciones para la parte superior de la barra 2	50
Figura 3.11	Daño en la parte inferior de la barra 2	51
Figura 3.12	Perturbación ejercida en la barra 2 en su parte inferior	51
Figura 3.13	Combinaciones de desplazamiento en la parte inferior de la barra 2	53
Figura 3.14	Arreglo para Holografía Digital	57
Figura 3.15	Tercia de iluminaciones	58
Figura 3.16	Secciones de la barra 1	60
Figura 3.17	Mapas de fase envuelta para la barra 1 sección central	61

Figura 3.18	Mapas de fase envuelta para la barra 1 sección plana	62
Figura 3.19	Sección del anverso a interrogar de la barra 2	63
Figura 3.20	Mapas de fase envuelta para la barra 2 anverso	63
Figura 3.21	Sección del reverso a interrogar de la barra 2	65
Figura 3.22	Mapas de fase envuelta para la barra 2 reverso	66
Figura 4.1	Mapas tangenciales de la barra 1 a)sección central b)sección plana	69
Figura 4.2	Deformaciones en x para la barra 1	70
Figura 4.3	Esfuerzos normales en la barra 1	71
Figura 4.4	Mapa tangencial del anverso de la barra 2	72
Figura 4.5	Deformación en y del anverso de la barra 2	73
Figura 4.6	Esfuerzos normales en el anverso de la barra 2	73
Figura 4.7	Mapa tangencial del reverso de la barra 2	74
Figura 4.8	Esfuerzos normales en el reverso de la barra 2	75
Figura A.1	Transformada de Fourier (para $5\mu\text{m}$)	81
Figura A.2	Patrón de franjas entre posición 0 y posición 1 (para $5\mu\text{m}$)	82
Figura A.3	Patrón de franjas entre posición 0 y posición 2 (para $5\mu\text{m}$)	82

Indice de tablas

Tabla 3.1	Relación de franjas contra desplazamiento del tornillo micrométrico para la barra 1	43
Tabla 3.2	Relación de franjas contra desplazamiento para la barra 2 en la parte superior	48
Tabla 3.3	Desplazamientos por combinación en la parte superior de la barra 2	50
Tabla 3.4	Relación de franjas contra desplazamiento para la barra 2 en la parte inferior	52
Tabla 3.5	Desplazamientos por combinación en la parte inferior de la barra 2	54
Tabla A.1a	Estímulos a probar y resultado para la barra 1 (incompleta)	80
Tabla A.1b	Estímulos a probar y resultado para la barra 1 (completa)	83

Indice de gráficas

Gráfica 3.1	Comportamiento del número de franjas observadas contra el desplazamiento aplicado en la barra 1	43
Gráfica 3.2	Comportamiento del número de franjas contra el desplazamiento aplicado para la barra 2 en la parte superior	48
Gráfica 3.3	Comportamiento del número de franjas contra el desplazamiento aplicado para la barra 2 en la parte inferior	52



Capítulo I

Capítulo I

Introducción

Desde sus orígenes y a medida que la civilización avanza, se tiene una necesidad siempre creciente de poder interpretar su entorno y explicar los fenómenos que ahí ocurren. Una herramienta tan simple como lo es la comparación le ha permitido establecer medidas que a su vez le son útiles para caracterizar elementos que le rodean. Como se hace patente, la medición nos ha acompañado desde épocas inmemoriales y actualmente existe una inmensa cantidad de información procedente gracias a estas mediciones.

Por tal razón, la complejidad en este rubro ha ido en constante aumento, ya que para interrogar un cuerpo, pueden aplicársele una serie de diversas técnicas para obtener información muy particular de estos objetos en cada caso. Y es aquí que se tiene un gran auge en aplicar técnicas de medición para cuerpos cada vez más complejos o que anteriormente eran interrogados con alguna otra técnica y no se obtenía información satisfactoria de ellos. Por esto, el presente trabajo trata de la aplicación de una técnica de medición conocida a un par de objetos que se describirán más adelante. Para realizar la medición de características de un objeto se pueden utilizar dos tipos de mediciones que pueden ser:

- 1) Destructivas.- Estas técnicas permiten obtener cierta información del objeto, pero es necesario recurrir a elementos perturbadores que envuelven al objeto y modifican en cierta medida su comportamiento.
- 2) No destructivas.- Como el caso anterior, con estas técnicas es posible el obtener información del objeto, pero la perturbación proporcionada no modifica las características propias del objeto.

Si tomamos lo anterior, las mediciones no destructivas resultan una opción apropiada para cierto tipo de objetos, a los que con perturbaciones de mínimo impacto no se modifican sustancialmente sus características y se pueden llevar a cabo mediciones satisfactorias. Pero además, es necesario el realizar las mediciones de forma remota para no interferir en el entorno de dicho objeto y tratar de dar mayor certeza al sistema de medición.

Para nuestro caso particular se tiene como finalidad, el interrogar a un par de objetos por medio de técnicas no destructivas, que echan mano de la óptica y la electrónica, y a medida que estas dos se desarrollan más, es posible caracterizar objetos en condiciones más complejas e inaccesibles, lo que beneficia directamente el estudio tratado aquí.

Los objetos a interrogar son dos piezas metálicas de gran grosor y que provienen de instalaciones petroleras; éstas son sometidas a grandes esfuerzos y en condiciones normales no es posible observar su estado real de deterioro por medio de técnicas de medición superficiales. Un ejemplo de esto resulta la aplicación de Espi (Electronic speckle pattern interferometry) en donde es necesario realizar estímulos muy perturbadores para la pieza, para que se muestren vestigios de los defectos superficiales que pueda tener el objeto, pero que es posible observarlos en ocasiones a simple vista, no ofreciendo información interna que es donde se observaría su estado real de deterioro. Por tal motivo se aplica una técnica más noble, la holografía digital, que ofrece información sensible del objeto, y si a ello se agrega que se realizará por medio de tres haces de iluminación, que tendrá información tridimensional del cuerpo que nos acercará más a su estado real.

De estos datos que arroje la holografía digital se obtienen relaciones de esfuerzos presentes en éstos cuerpos metálicos y que difícilmente se mostrarían de alguna otra forma; estos resultados son sumamente útiles para determinar si la pieza debe o no ser reemplazada de acuerdo al comportamiento observado, a medida de un programa preventivo que ahorre gastos por posibles daños que estas piezas provocarían al fracturarse funcionando en las instalaciones.

Como se puede apreciar, aún queda mucho camino por recorrer en cuanto a las aplicaciones de mediciones por medio de la metrología óptica en pruebas ópticas no destructivas y se puede considerar que el trabajo que aquí se presenta tiene continuidad, en cuanto a desarrollar un sistema portátil que permita acercarnos a condiciones de campo en que operan los objetos que interrogamos, así mismo se puede adentrar más en la interpretación de los resultados que aquí se presentan y que posiblemente sean punto de partida para descifrar otra clase de información útil del objeto analizado.



Capítulo II

Capítulo II

Teoría

En este capítulo se describirán brevemente los conceptos básicos que se emplean en el desarrollo de éste trabajo, y que son los principios de la interferometría de patrones de moteado. Se inicia con la descripción del fenómeno del moteado tanto objetivo como subjetivo. Se continúa con Interferometría de patrones de moteado para pasar a la Interferometría electrónica de patrones de moteado (Espí). Posteriormente, se describen conceptos de holografía digital y la sensibilidad de los patrones de moteado así como el vector de sensibilidad. Siguiendo con deformaciones 3D y el método de evaluación de fase por medio de la transformada de Fourier, para finalmente repasar conceptos de esfuerzos en cuerpos metálicos y mapas de esfuerzos.

2.1 Moteado

El fenómeno del moteado [1, 2] ocurre cuando la luz coherente incide sobre una superficie rugosa con alturas más grandes que la longitud de onda λ de la luz tal como se muestra en la figura 2.1. en donde la luz es dispersada en todas direcciones.

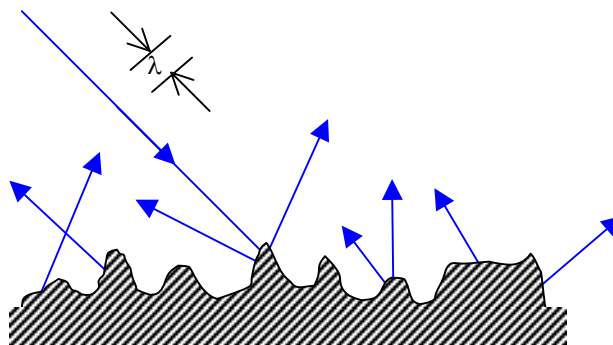


Figura 2.1 Esparcimiento de la luz sobre una superficie rugosa

La luz dispersada por dicha superficie causa la interferencia mutua de muchos frentes de onda dispersados individualmente y que forma patrones de interferencia que consisten de puntos brillantes y oscuros, que se denominan también motas (speckle) que tienen una distribución aleatoria en todo el espacio tridimensional frente al objeto en donde se cruzan los frentes de onda. En la figura 2.2 se muestra un patrón de moteado.

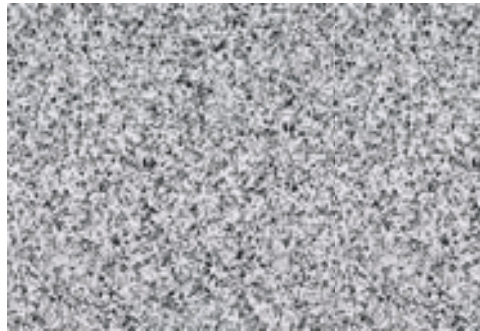


Figura 2.2 Patrón de moteado

De la figura 2.2 se observa que el tamaño de las motas brillantes y oscuras varía. Para encontrar un valor representativo del tamaño de la mota se debe definir que existen:

- ➔ Moteado objetivo
- ➔ Moteado subjetivo

2.1.1 Moteado objetivo

Cuando una superficie rugosa es iluminada por un láser de longitud de onda λ sobre un área de sección transversal D , el patrón de moteado objetivo [1, 2] es observado en una pantalla S colocada a una distancia z de la superficie que esparce la luz (figura 2.3).

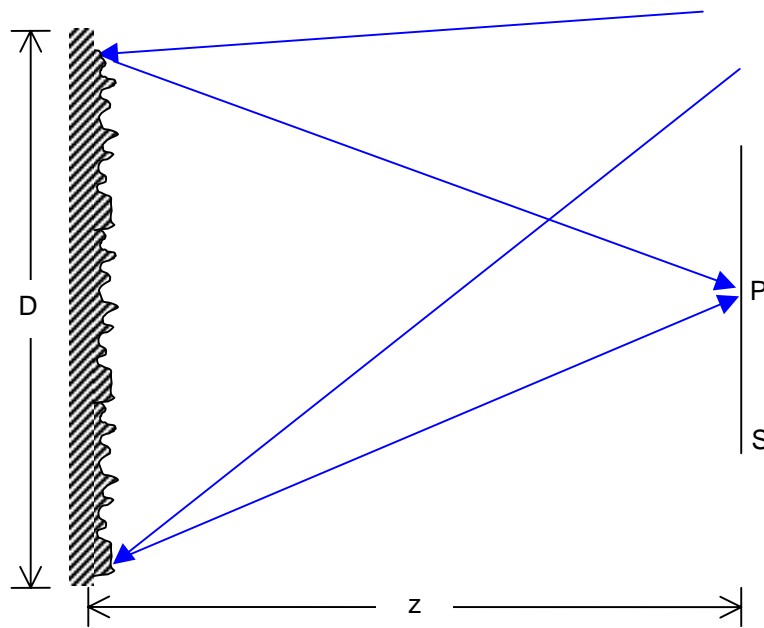


Figura 2.3 Formación de moteado objetivo

En un punto arbitrario P sobre la pantalla, se recibe la contribución de la luz de todos los puntos de la superficie dispersora, suponiendo que el patrón de moteado en el punto P es la superposición de los patrones de franjas formados por la luz dispersada de todos los pares de puntos de la superficie. Cualquier par de puntos están separados una distancia ι con la cual se puede calcular una frecuencia de franjas $f = \iota / (\lambda z)$. Las franjas de alta frecuencia espacial f_{\max} se formarán de dos puntos adyacentes (bordes) quedando $f_{\max} = D / \lambda z$. El periodo de este patrón, es el tamaño de la mota más pequeña, por lo que el tamaño de la mota se puede aproximar como:

$$\sigma_o = \lambda z / D \quad \text{Ec. (2.1)}$$

De ésta ecuación se puede observar que el diámetro de la mota se incrementa a medida que el área transversal disminuye, si λ y z permanecen constantes.

2.1.2 Moteado subjetivo

Al igual que en el moteado objetivo, se ilumina la superficie rugosa generando esparcimiento de la luz, pero si se interpone un sistema óptico que genera una imagen en la pantalla, como se muestra en la figura 2.4.

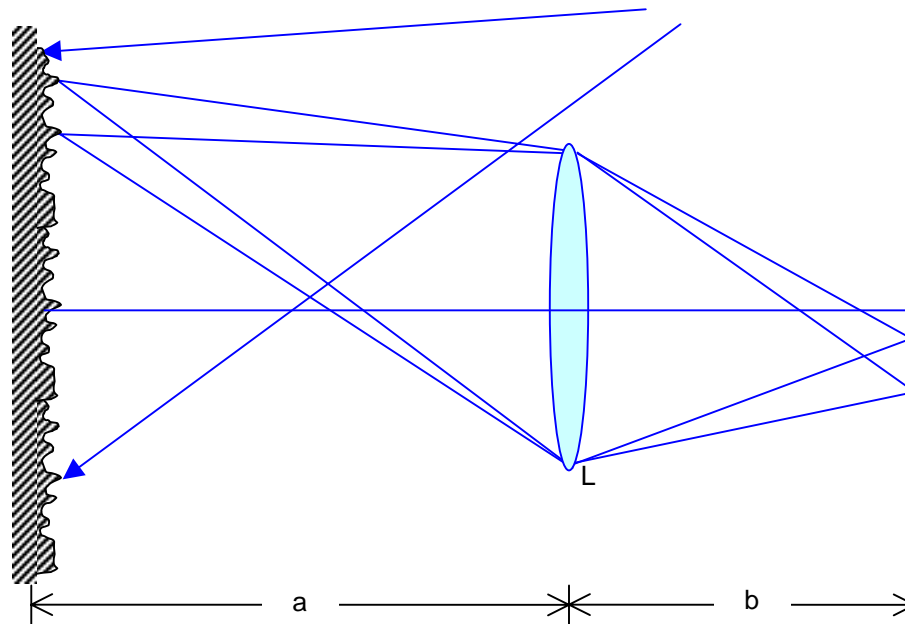


Figura 2.4 Formación de moteado subjetivo

La manera de determinar el tamaño de la mota subjetiva [1, 2], es de forma análoga al caso de la mota objetiva. Aquí la sección transversal del área de iluminación es limitada por el diámetro de las lentes que forman la imagen. El tamaño de la mota está determinado por:

$$\sigma_s = \lambda b / D \quad \text{Ec. (2.2)}$$

Introduciendo el número F como:

$$F^\# = f / D \quad \text{Ec. (2.3)}$$

Donde f es la distancia focal, y como para sistemas con cámaras resulta más simple relacionar en función de $F^\#$ y la magnificación (m) la ecuación 2.2 se puede reescribir aproximadamente como:

$$\sigma_s = (1+m)\lambda F^\# \quad \text{Ec. (2.4)}$$

Donde $m=(b - f)/f$, y de la ecuación 2.4 se puede observar que cuando la apertura disminuye el tamaño de la mota aumenta. Las técnicas de moteado se pueden clasificar en dos grandes categorías: aquéllas que usan la interferencia para producir una variación en el brillo del moteado^{/1}; y las que usan un cambio en la distribución del patrón de moteado^{/2}. Este último se usa para medir principalmente desplazamiento superficial, el cual resulta útil para el científico y el ingeniero en la medición de modos de vibración en campo completo o formas y esfuerzos. La superficie bajo prueba no necesita estar suave ópticamente y no se necesita preparación de esta.

En el caso de interferometría de patrones de moteado, las propiedades más importantes son: el tamaño de la mota y la distribución de intensidad. En un patrón de moteado subjetivo, la apertura del sistema óptico determina la función de punto extendido, y en consecuencia, la resolución del sistema óptico. Para lentes de buena calidad, que introducen aberraciones despreciables, la función de punto extendido para cada punto imagen, representa el límite último de calidad de imagen.

El límite se considera usualmente como el que resuelve patrones de Airy independientes, parcialmente traslapados.

^{/1} Por ejemplo: interferometría de moteado.

^{/2} Por ejemplo: fotografía de moteado.

2.2 Spi

El principio que subyace detrás de SPI [2, 6, 8], requiere que para desplazamientos o deformaciones superficiales pequeñas, la intensidad de los componentes dispersados individuales en el área de resolución, permanezca constante. Esto implica que la posición de cada mota permanezca prácticamente igual. Entonces, la fase de cada mota, en el plano imagen, contiene la información debida al desplazamiento superficial. Si se añade un segundo frente de onda mutuamente coherente al patrón de moteado, este actúa como referencia de fase. La intensidad de cada mota es entonces una función de la relación de fase entre los dos frentes de onda, la cual, en rigor, se relaciona a la deformación superficial. La deformación superficial se puede ver como una diferencia entre intensidades de mota.

La diferencia entre dos patrones de moteado referenciados en fase, uno grabado antes de la deformación y el otro después de la deformación. En regiones donde la superficie no se ha movido, las motas mantienen su intensidad original. Si la superficie se mueve, la intensidad de mota varía de acuerdo a esto. Los dos patrones de moteado se comparan (o son correlacionados) normalmente por la adición o substracción de intensidades. Las diferencias entre los patrones de moteado se revelan por franjas alternadas brillantes y oscuras, correspondientes a lugares de igual diferencia de fase entre los dos frentes de onda. Esta diferencia de fase se relaciona a la diferencia de camino óptico introducido por el movimiento de la superficie.

Para describir el proceso se considera un interferómetro de dos haces que interfieren son mutuamente coherentes y polarizados en un plano en la misma dirección. La intensidad en algún punto $P(n,m)$ en la superficie del detector en el plano imagen se puede aproximar por:

$$I_{ref}(m, n) = I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} \cos \varphi \quad \text{Ec. (2.5)}$$

En donde $I_A(m, n)$ e $I_B(m, n)$ son las intensidades debidas a cada haz actuando separadamente, $\varphi(m, n)$ denota la diferencia de fase entre ellos. Esta fase es la fase del moteado y varía aleatoriamente con la posición (m, n) .

Algún cambio de fase relativo entre los dos frentes de onda en P, causará que la intensidad cambie a:

$$I_{ref}(m, n) = I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} \cos(\varphi + \psi) \quad \text{Ec. (2.6)}$$

La diferencia de fase adicional ψ se puede introducir por deformación o desplazamiento de la superficie en cuestión. Se supone que φ y ψ no varían con el tiempo, o sea, que el objeto está estático o sufre desplazamiento estático. En interferometría clásica, I_A e I_B y φ varían continuamente con la posición (m, n) . En interferometría de moteado, I y φ para uno o ambos haces varían aleatoriamente con la posición. En consecuencia, las franjas de interferencia debida a ψ no aparecen directamente y las mediciones deben hacerse observando el cambio en la intensidad de moteado. La formación de franjas de correlación de moteado se considera en dos tipos:

- Correlación por sustracción [8]
- Correlación por adición [8]

2.2.1 Correlación por sustracción

De las ecuaciones 2.5 y 2.6 se tiene que la correlación por sustracción está dada por:

$$I(m, n) = |I_{def} - I_{ref}| = 2\sqrt{I_A I_B} |\cos(\varphi + \psi) - \cos(\varphi)| \quad \text{Ec. (2.7)}$$

Por lo general, esta sustracción se lleva a cabo electrónicamente, llevándola a una unidad digitalizadora y realizando la sustracción en la unidad de video de I_{def} viniendo directamente de la cámara. De este modo, se tienen franjas en tiempo real en un monitor de TV. El signo de valor absoluto en la ecuación 2.7, representa la operación de eliminar valores negativos de intensidad (voltajes que no serían representados por el monitor de TV. Reescribiendo esta ecuación se obtiene:

$$I(m, n) = 4\sqrt{I_A I_B} \left| \sin\left(\frac{2\varphi + \psi}{2}\right) \sin\left(\frac{\psi}{2}\right) \right| \quad \text{Ec. (2.8)}$$

Esta ecuación describe dos funciones modulándose una a la otra, la primera en alta frecuencia espacial (el ruido de moteado) y la segunda en menor frecuencia espacial (las franjas de correlación). Un mínimo de intensidad en la franja sucede cuando:

$$\psi = 2n\pi \quad \text{donde } n=0,1,2,\dots \quad \text{Ec. (2.9)}$$

Lo que ocurre cuando la intensidad del patrón de moteado ha retornado a su valor original. ψ se puede relacionar al desplazamiento superficial, y permite que se hagan mediciones cuantitativas.

2.2.2 Correlación por adición

En este caso, con referencia a las ecuaciones 2.5 y 2.6 se tiene que:

$$I(m, n) = I_{def} + I_{ref} = 2(I_A I_B) + 2\sqrt{I_A I_B} (\cos(\varphi + \psi) + \cos(\varphi)) \quad \text{Ec. (2.10)}$$

Reescribiéndola, queda de la siguiente manera:

$$I(m, n) = 2(I_A I_B) + 4\sqrt{I_A I_B} \left(\cos\left(\frac{2\varphi + \psi}{2}\right) + \cos\left(\frac{\psi}{2}\right) \right) \quad \text{Ec. (2.11)}$$

De nuevo, aparecen dos funciones modulándose una a la otra, la primera en alta frecuencia espacial (el ruido de moteado) y la segunda en menor frecuencia espacial (las franjas de correlación). El mínimo de las franjas ocurre cuando $\psi = (2n+1)\pi$ con $n=1,2,3,\dots$, defasado en π radianes con respecto a la ecuación de sustracción.

Nótese que hay un término D.C. $2(I_A+I_B)$ que reduce la visibilidad de las franjas. Las franjas de este tipo se pueden obtener por doble exposición del medio de grabación antes y después de la deformación de la superficie.

Se pueden considerar dos métodos de grabación de franjas en adición:

- ➔ Fotográficamente
- ➔ Electrónicamente

De los cuales nos enfocaremos en el segundo de ellos, aquí se emplea una cámara CCD y con un láser de alto índice de repetición se produce un pulso al comienzo de cada periodo de exposición de una cámara CCD. i.e. 60 hz. Usando un pulso doble o pulsos gemelos de este láser, se lanza un segundo pulso en algún otro punto en el periodo de exposición de la cámara CCD. En consecuencia, cada campo en la cámara contiene dos pulsos; el primer pulso I_{ref} y el segundo pulso I_{def} . La adición sucede en la placa sensible de la cámara, produciéndose franjas en un monitor de TV.

De lo anterior podemos desprender que existen dos circunstancias que afectan la grabación de franjas por adición:

- a) El desempeño del láser y como afecta a la visibilidad de franjas.
- b) Métodos para el procesado de franjas.

2.3 Espi

Tomando como preámbulo lo expuesto en el punto 2.2, podemos notar que originalmente el proceso de correlación fue llevado a cabo exponiendo y revelando un negativo del patrón de moteado del objeto sin deformar, para volverlo a posicionar en el mismo lugar del interferómetro. El negativo se usa como una máscara a través de la cual el objeto deformado puede verse, produciéndose la correlación. Similar al punto anterior tenemos que actualmente uno de los métodos importantes para la realización de correlación por sustracción es el método electrónico de interferometría de patrones de moteado, Espi por sus siglas en inglés.

El dispositivo sensor de la cámara CCD para la captura, registra los patrones de moteado y por medio de un ordenador va realizando las sustracciones en tiempo real de una imagen grabada contra las subsecuentes imágenes generadas por el objeto estudiado.

De acuerdo a la sensibilidad que se desea, pueden armarse dos clases de interferómetros:

- Interferómetro para desplazamiento fuera del plano
- Interferómetro para desplazamiento en el plano

2.3.1 Interferómetro fuera del plano

Un interferómetro fuera del plano [2, 6] es un arreglo óptico el cual es sensible a desplazamientos a lo largo del eje de la cámara como se ve en la figura 2.5.

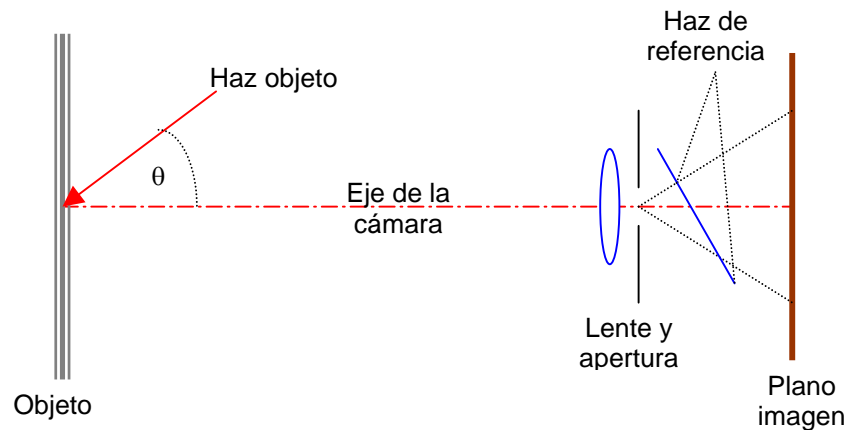


Figura 2.5 Interferómetro fuera del plano.

La sensibilidad del interferómetro está determinada y controlada por el ángulo θ que se forma entre el eje de la cámara y la fuente de iluminación. Para Espi se tiene que la intensidad del haz de referencia va de 1 a 5 % aproximadamente del total que eroga el haz láser. El contraste en este interferómetro se ve incrementado cuando la diferencia de caminos ópticos se iguala a cero.

2.3.2 Interferómetro en el plano

Este interferómetro [2, 6] es sensible a desplazamientos normales al eje de la cámara y en la figura 2.6 se muestra el arreglo óptico.

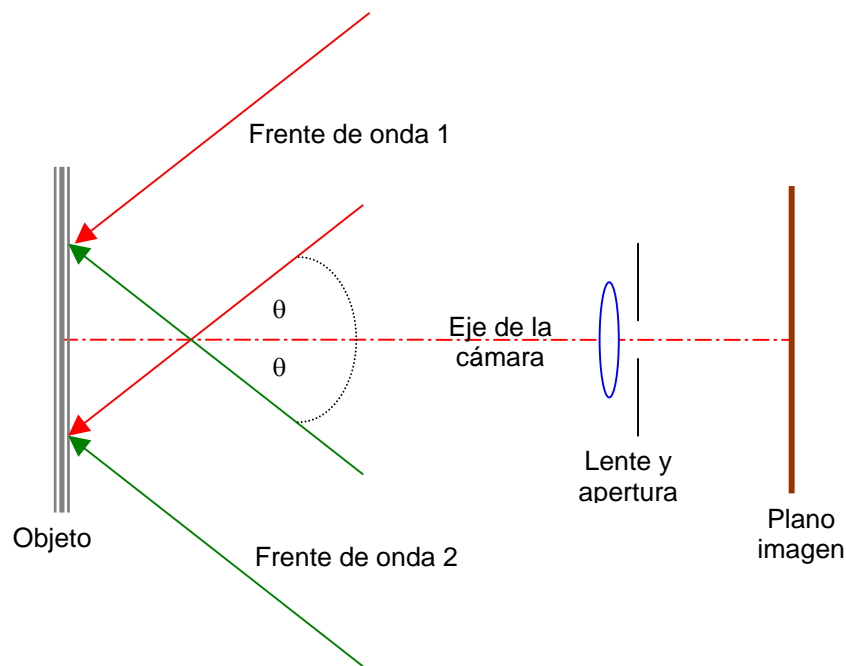


Figura 2.6 Interferómetro en el plano.

La sensibilidad de este interferómetro está controlada por los ángulos subtendidos entre los dos haces de iluminación con respecto al eje de la cámara, y con los ángulos iguales pero opuestos. Cuando los ángulos son pequeños se tienen desplazamientos absolutos grandes y caso contrario, a ángulos grandes se tienen desplazamientos absolutos pequeños.

En Espi la recuperación de la fase se puede realizar de varias maneras, una de ellas es por medio de phase stepping, en la que por medio de un transductor piezoeléctrico, se recorre uno de los espejos del interferómetro, lo que provoca que se tengan desplazamientos del patrón de franjas, que pueden ser de $\pi/2$, $\pi/3$... etc. Teniendo así, phase stepping de 3, 4... pasos. Y con éstas n patrones de franjas se obtiene la fase envuelta, que posteriormente se desenvuelve con técnicas de desenvolvimiento de fase.

2.4 Holografía Digital

Normalmente, un holograma [2, 3, 4, 6] se lleva a cabo en películas de muy alta resolución que va desde las 1250 líneas/mm hasta las 5000 líneas/mm, que estaban desarrolladas para responder a solo ciertas longitudes de onda (por ejemplo 632.8nm).

Ahora bien, como su nombre lo sugiere, la holografía digital echa mano de sistemas opto electrónicos que deben cumplir con ciertas características para llevar a cabo la formación de hologramas digitales. La primera de ellas es el uso de una cámara CCD de alta resolución que puede ir a partir de más de 1000x1000 pixeles de resolución a diferencia de Espi que puede llevarse a cabo desde 400x400 pixeles.

La obtención de la fase se realiza con dos hologramas del objeto (doble exposición) y posteriormente se procesan para recuperar la fase desenvuelta. La ventaja de esto, es que la información de puede almacenar y analizar posteriormente en distintos estados del objeto.

2.5 Iluminación

El tipo de iluminación, es factor determinante de acuerdo a la clase de deformación a la que se ve sometido el objeto a iluminar. Podemos pensar en dos grandes grupos, estáticas y dinámicas. Para saber que tipo de iluminación emplear, ya sea pulsada o continua (cw) se debe analizar la imagen que el sensor CCD colecta, la cual está dada por la ecuación 2.5 en donde I_A e I_B son I_o e I_r respectivamente.

Y cuando se presenta la deformación en el objeto, se tiene la ecuación 2.6; se puede emplear la transformada de Fourier para extraer el término de fase, entonces las imágenes se correlacionan por medio de substracción, para desplegar así el término de fase (ψ).

La observación de este factor, depende de la fuente, ya que si se emplea iluminación continua para un objeto sometido a vibración, se corre el riesgo de que la superficie sea grabada con una exposición de tiempo mucho más grande en comparación al periodo de la vibración, que es $T \gg 2\pi/\omega$, en donde ω es la vibración mecánica del objeto. Por esto, se puede considerar una vibración armónica en el objeto que provoca que el término de diferencia fase de la ecuación 2.6 cambie de $\psi \rightarrow \psi \sin(\omega t)$, con t como el tiempo de lectura de la cámara CCD. Se puede considerar que si $I_r \approx I_o = I_p$, sustituyendo en la ecuación 2.6 se hace una integración en el tiempo y lo que el sensor detecta es:

$$I = I_p J_0^2(\psi) \quad \text{Ec. (2.12)}$$

En donde J es el orden cero de la función Bessel, lo que complica la extracción de información dada su complejidad matemática, lo que nos limita a obtener tan solo información cualitativa y no cuantitativa del objeto. Por ello, en pruebas dinámicas conviene el uso de una fuente pulsada (sincronizada) y en estáticas un cw es más que apropiado (puede usarse también una fuente pulsada).

2.6 Sensibilidad en patrones de moteado

La distribución aleatoria de la intensidad [1] así como la fase óptica del moteado, son patrones de interferencia sumamente sensibles a los desplazamientos [2], giros y características del difusor iluminado.

Para explicar lo anterior consideremos la figura 2.7.

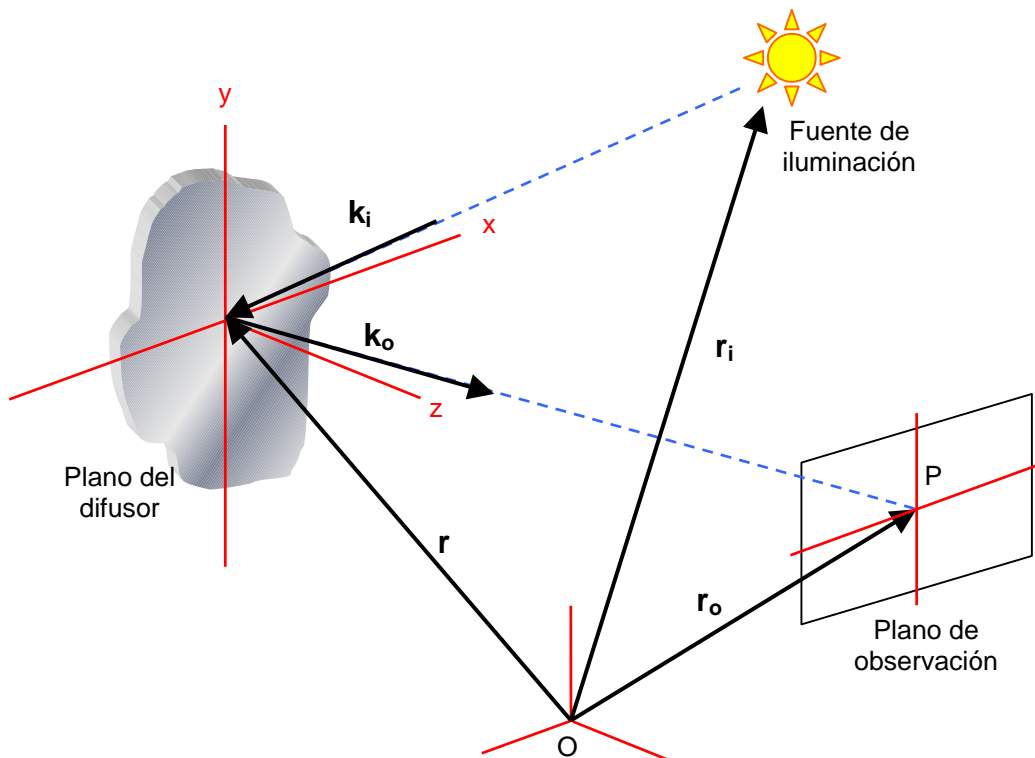


Figura 2.7 Arreglo geométrico para el estudio de la sensibilidad

De la figura, la fase del patrón de moteado observada en un punto P del plano de observación, se expresa como la función del camino recorrido por la luz desde la fuente hasta el punto P, teniendo:

$$\psi = \psi_p + \phi = \psi_p + \phi_i + \mathbf{k}_i \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) + \mathbf{k}_o \cdot (\mathbf{r}_o - \mathbf{r}) \quad \text{Ec. (2.13)}$$

La fase total del moteado, se compone de la suma de una componente aleatoria (ψ_p) y una componente determinística (ϕ), la cual se compone a su vez de la fase inicial de la fuente de iluminación ϕ_i más los defasamientos que va experimentando la luz cuando se propaga desde la fuente $\mathbf{k}_i \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)$ hasta el punto de observación $\mathbf{k}_o \cdot (\mathbf{r}_o - \mathbf{r})$. Este par de defasamientos están

determinados por los vectores de posición del difusor \mathbf{r} , el vector de posición de la fuente \mathbf{r}_i y el vector de posición del plano de observación \mathbf{r}_o .

Ahora definiendo los vectores de iluminación y observación en función de vectores unitarios, se escriben:

$$\bar{\mathbf{k}}_i = \frac{2\pi}{\lambda} \hat{\mathbf{n}}_i \quad \text{Ec. (2.14)}$$

$$\bar{\mathbf{k}}_o = \frac{2\pi}{\lambda} \hat{\mathbf{n}}_o \quad \text{Ec. (2.15)}$$

De la figura 2.8

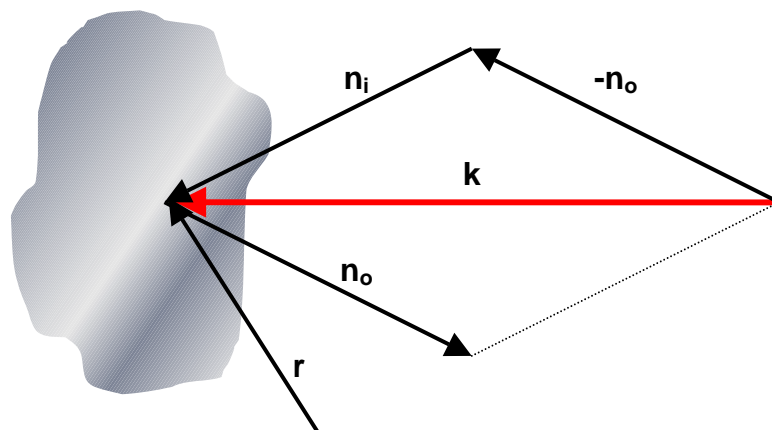


Figura 2.8 Vector de sensibilidad

El vector de sensibilidad \mathbf{k} queda definido como:

$$\bar{\mathbf{k}} = \hat{\mathbf{n}}_i - \hat{\mathbf{n}}_o \quad \text{Ec. (2.16)}$$

Sustituyendo en la ecuación 2.13.

$$\psi = \psi_p + \phi' + \frac{2\pi}{\lambda} \bar{\mathbf{k}} \cdot \bar{\mathbf{r}} \quad \text{Ec. (2.17)}$$

En donde $\phi' = \phi + \mathbf{k}_o \cdot \mathbf{r}_o - \mathbf{k}_i \cdot \mathbf{r}_i$ y al variar el difusor, las condiciones de iluminación cambian y la fase queda dada por:

$$\Delta\psi = \Delta\psi_p + \Delta\phi' + \Delta\left(\frac{2\pi}{\lambda} \vec{k} \cdot \vec{r}\right) = \underbrace{\Delta\psi_p}_{a1} + \underbrace{\Delta\phi'}_{a2} + \underbrace{\frac{2\pi}{\lambda} \Delta\vec{k} \cdot \vec{r}}_{a3} + \underbrace{\frac{2\pi}{\lambda} \vec{k} \cdot \Delta\vec{r}}_{a4} \quad \text{Ec. (2.17)}$$

Describiendo los términos de la ecuación 2.17, tenemos que el término a1 se puede considerar nulo, ya que si los desplazamientos no alteran significativamente la micro estructura del difusor este término es despreciable. El término a2 representa los cambios que sufre la geometría de la iluminación y la fase inicial de la fuente. El término a3 es la representación del efecto combinado de las variaciones simultáneas que presentan ambos parámetros. Finalmente, a4 indica un incremento en la fase producido por desplazamientos del difusor. Tomando en cuenta éstas consideraciones, la ecuación 2.17 se puede aproximar a:

$$\Delta\psi = \Delta\phi' + \frac{2\pi}{\lambda} \Delta\vec{k} \cdot \vec{r} + \frac{2\pi}{\lambda} \vec{k} \cdot \Delta\vec{r} \quad \text{Ec. (2.18)}$$

Con la ecuación 2.18 es posible modelar todas las técnicas de interferometría que empleen moteado, y para fines prácticos si la geometría de la iluminación permanece constante el factor a2 se puede despreciar y tenemos que la sensibilidad de la fase al desplazamiento del difusor esta en función del vector de sensibilidad.

$$\Delta\psi = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{k} \cdot \Delta\vec{r} \quad \text{Ec. (2.19)}$$

2.7 Deformaciones 3D

Para obtener la deformación 3D de un objeto [9], se deben combinar tres vectores de sensibilidad independientes a fin de tener información en los tres sentidos. Hasta la ecuación 2.19 se consideró una sola dirección del vector de iluminación y una para el de observación. Reescribiendo la ecuación 2.19 en forma general queda.

$$\Delta\psi_i = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{k}_i \bullet \Delta r \quad i = 1,2,3 \quad \text{Ec. (2.20)}$$

Lo que genera un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas que expresándolo en forma matricial queda:

$$\frac{\lambda}{2\pi} \begin{pmatrix} \Delta\psi_1 \\ \Delta\psi_2 \\ \Delta\psi_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{1x} & k_{1y} & k_{1z} \\ k_{2x} & k_{2y} & k_{2z} \\ k_{3x} & k_{3y} & k_{3z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta r_x \\ \Delta r_y \\ \Delta r_z \end{pmatrix} \quad \text{Ec. (2.21)}$$

Que es soluble cuando se tienen los mapas de fase desenvueltos correspondientes a tres direcciones de iluminación. El problema está resuelto con parámetros mensurables experimentalmente como son:

- ➔ La posición de la cámara CCD
- ➔ Los puntos del objeto en función de coordenadas x,y,z
- ➔ Los mapas de fase también en función de coordenadas

Además, es imprescindible contar con información de la forma del objeto para los puntos **P**, lo que se logra experimentalmente para superficies complicadas y matemáticamente para superficies conocidas.

2.8 Obtención de fase por medio de la transformada de Fourier

El empleo de la transformada de Fourier para la evaluación de la fase, se aplica generalmente en patrones de franjas con perfil sinusoidal a los que se les introduce una portadora espacial de frecuencia conocida, y en esta variante espacial, la fase se evalúa a partir de un único patrón de franjas al que se le introduce la portadora espacial f_c como sigue.

$$I(x) = I_m(x) \left[1 + V(x) \cos(\phi(x) + 2\pi f_c x) \right] \quad \text{Ec. (2.22)}$$

Reescribiendo la ecuación 2.22 con notación compleja.

$$I(x) = I_m(x) \left[1 + \frac{1}{2} c(x) e^{i2\pi f_c x} + \frac{1}{2} c^*(x) e^{-i2\pi f_c x} \right] \quad \text{Ec. (2.23)}$$

En donde $c(x) = V(x)e^{i\phi(x)}$, calculando la transformada de Fourier de la ecuación anterior, resulta:

$$\hat{I}(f) = \hat{I}_m(f) * \left[\delta(f) + \frac{1}{2} \mathcal{L}(f - f_c) + \frac{1}{2} \mathcal{L}(-f - f_c) \right] \quad \text{Ec. (2.24)}$$

La notación $(\hat{})$ indica transformada de Fourier y $(*)$ convolución. Ahora bien, si la frecuencia espacial portadora f_c es lo suficientemente alta para separar el espectro de la intensidad media del patrón y su convolución con la visibilidad compleja, la transformada de Fourier presenta una distribución trimodal como se puede apreciar en la figura 2.9(a).

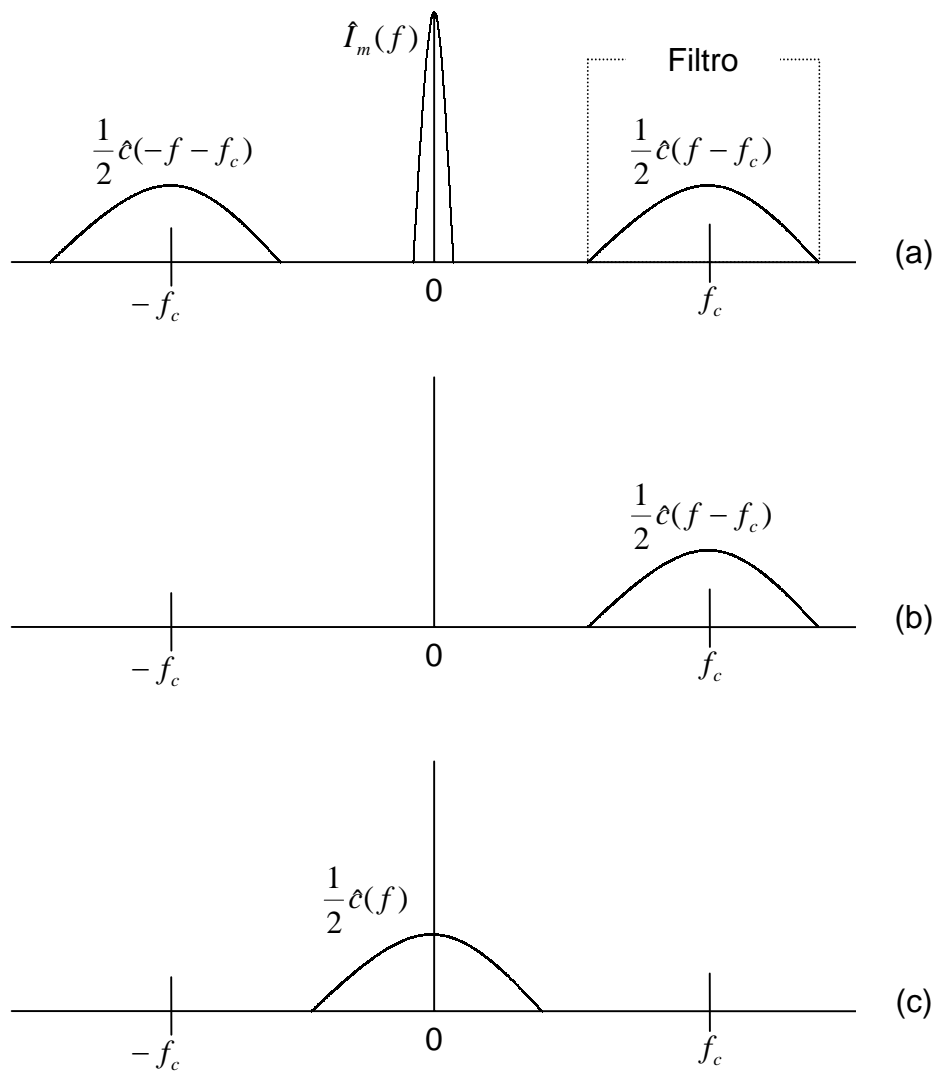


Figura 2.9 Esquema de la transformada de Fourier para el cálculo de la fase

Por medio de un filtro pasa bandas se puede aislar el término correspondiente a la visibilidad compleja 2.9(b) quedando 2.24 como:

$$\hat{I}'(f) = \hat{I}_m(f) * \left[\frac{1}{2}\hat{c}(f-f_c) \right] \quad \text{Ec. (2.25)}$$

Cuya transformada inversa se obtiene y sustituyendo $c(x)$ obtenemos:

$$\hat{I}'(x) = \frac{1}{2} I_m(x) V(x) e^{i[\phi(x)+2\pi f_c x]} \quad \text{Ec. (2.26)}$$

De donde se puede extraer la suma de la fase y la portadora como sigue:

$$\phi(x) + 2\pi f_c x = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[I'(x)]}{\text{Re}[I'(x)]} \right\} \quad \text{Ec. (2.27)}$$

La portadora se pueda eliminar tanto en el dominio espacial a partir de un valor conocido de f_c o en el dominio espectral, desplazando el espectro de $I'(x)$ al origen de frecuencias antes de realizar el cálculo de la transformada inversa de Fourier como se muestra en la figura 2.9(c).

Este método, tiene la ventaja de que solamente es necesario un patrón de franjas para cada estado de la fase, lo que permite aplicarlo en condiciones no repetibles o de baja estabilidad. Así mismo, se tiene la dificultad del carácter aleatorio de la intensidad media de los interferogramas, entonces, para lograr la separación del espectro, es preciso emplear lentes con aperturas pequeñas para moderar el ancho de banda espectral del moteado. Las portadoras de frecuencia espacial deben ser elevadas, lo que recae en un pobre aprovechamiento de la potencia luminosa disponible, por consiguiente, se tiene la necesidad de utilizar cámaras de video de muy alta resolución.

2.9 Esfuerzos

En este punto, el objeto de estudio es la deformación y el esfuerzo asociado, como el esfuerzo [5] es una cantidad geométrica, no existen restricciones en el material del objeto. Si un objeto es sometido a un sistema de fuerzas, puntos individuales de este cuerpo en general se mueven. Este movimiento de un punto arbitrario es un vector de cantidad conocido como desplazamiento. Si varios puntos del objeto se someten a diferentes movimientos, cada uno puede ser representado por un único vector de desplazamiento. Cada vector puede ser resuelto en componentes paralelas a un arreglo de ejes coordenados

cartesiano con u , v y w que serán las componentes de desplazamiento en las direcciones x , y , z respectivamente.

El movimiento del objeto puede ser considerado como la suma de dos partes.

- Una traslación y/o una rotación del objeto como un total.
- El movimiento de los puntos del cuerpo relativos a otro punto.

La traslación o rotación del objeto como un total es conocida como movimiento del cuerpo rígido. Este tipo de movimiento es aplicable tanto al cuerpo rígido idealizado como al cuerpo real deformable. El movimiento de los puntos relativo a cada otro punto es conocido como una deformación y es obviamente una propiedad solamente de los cuerpos reales.

Los movimientos de un cuerpo rígido pueden ser grandes o pequeños. Las deformaciones en general, son pequeñas excepto cuando son materiales elásticos u otras estructuras especializadas en donde están envueltas vigas delgadas y largas.

Se definen dos tipos de esfuerzos, esfuerzos normales y esfuerzos compartidos. Un esfuerzo normal está definido como el cambio de longitud de un segmento de línea entre dos puntos dividido por la longitud original del segmento de línea. Un esfuerzo compartido, está definido como el cambio angular entre dos segmentos de línea los cuales eran originalmente perpendiculares entre sí. La relación entre esfuerzo y desplazamiento puede ser determinada si se considera la deformación de un cubo arbitrario dentro de un cuerpo, cuando éste último es deformado. Esta deformación de muestra en la figura 2.10.

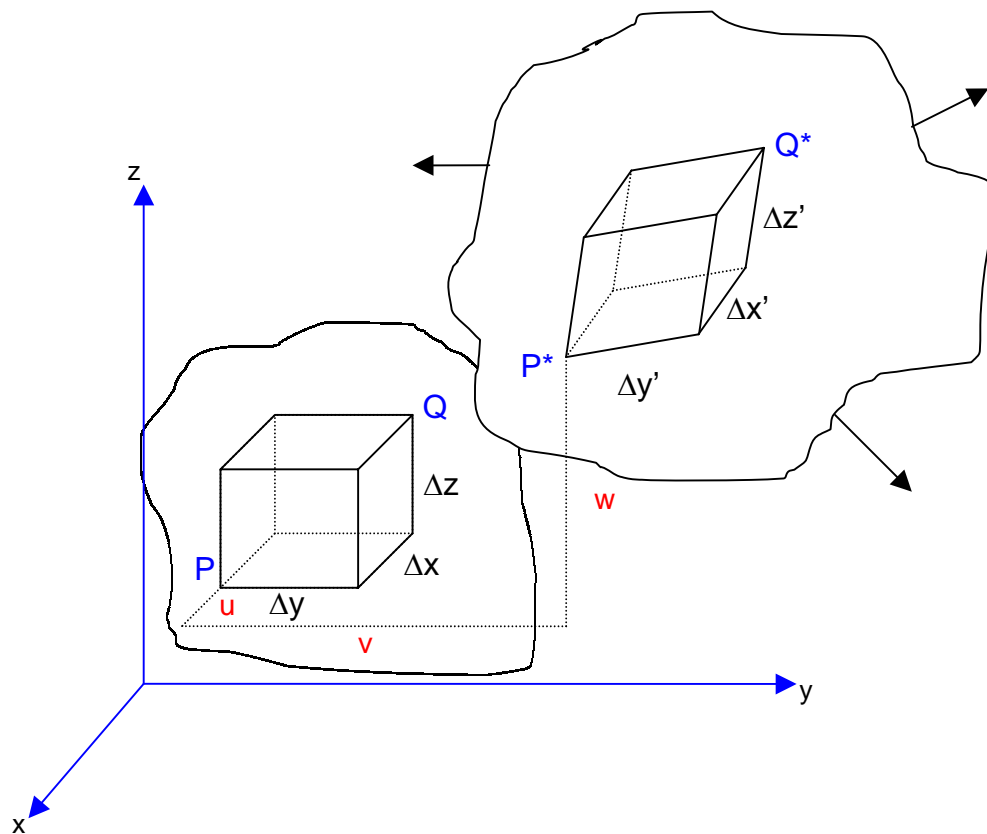


Figura 2.10 Distorsión de un cubo arbitrario dentro de un cuerpo, sometido a un sistema de fuerzas

De la figura, un punto general P es movido a distancia u en la dirección x, v en la dirección y, y w en la dirección z. Las otras esquinas del cubo también son desplazadas, y en general, éstas pueden ser desplazadas por aportaciones que pueden diferir a las del punto P. Por ejemplo, los desplazamientos u^* , v^* y w^* asociados con el punto Q, pueden ser expresados en términos de los desplazamientos u , v y w del punto P a través de una expansión en series de Taylor, quedando expresados:

$$u^* = u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial u}{\partial z} \Delta z + \dots$$

$$v^* = v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial v}{\partial z} \Delta z + \dots \quad \text{Ec. (2.28)}$$

$$w^* = w + \frac{\partial w}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial w}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial w}{\partial z} \Delta z + \dots$$

Los términos mostrados en las expresiones anteriores, son solamente significativos si se asume que el cubo es lo suficientemente pequeño para desprestigiar los términos de más alto orden de la serie. Bajo estas condiciones, planos seguirán siendo planos y rectas seguirán siendo rectas (figura 2.10).

El esfuerzo normal promedio a lo largo de un segmento de recta fue previamente definido, pero este esfuerzo normal puede ser expresado en términos de los desplazamientos experimentados por los puntos al final de los segmentos. Para ejemplificar lo anterior, consideremos que la línea PQ originalmente orientada paralela al eje x, como se ve en la figura 2.11.

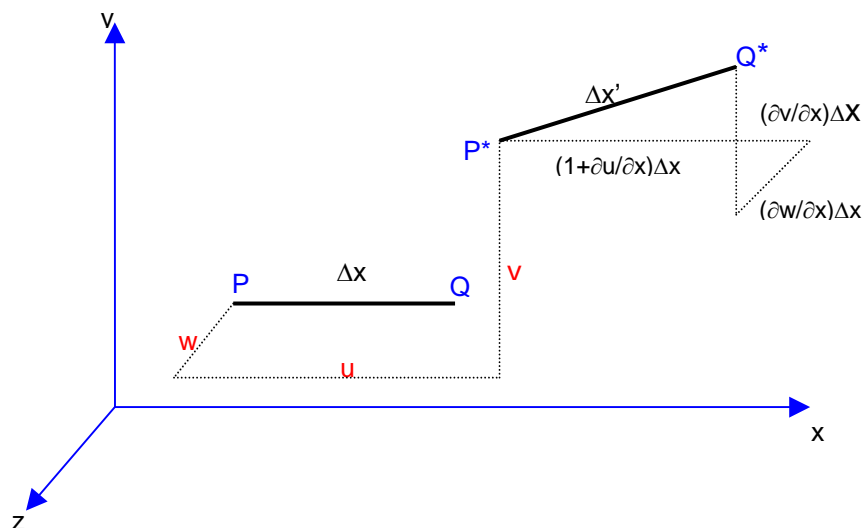


Figura 2.11 Gradientes de desplazamiento asociados con el esfuerzo normal ϵ_{xx}

Aquí z e y son constantes a lo largo de PQ, la ecuación 2.28 se reescribe:

$$\begin{aligned} u^* &= u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x \\ v^* &= v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x \\ w^* &= w + \frac{\partial w}{\partial x} \Delta x \end{aligned} \quad \text{Ec. (2.29)}$$

De la definición de esfuerzo normal:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\Delta x' - \Delta x}{\Delta x} \quad \text{Ec. (2.30)}$$

Que es equivalente a:

$$\Delta x' = (1 + \varepsilon_{xx}) \Delta x \quad \text{Ec. (2.31)}$$

Como se ve en la figura 2.11, la longitud de deformación $\Delta x'$ puede expresarse en términos de los gradientes de desplazamiento como:

$$(\Delta x')^2 = \left[\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \Delta x \right]^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \Delta x \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \Delta x \right)^2 \quad \text{Ec. (2.32)}$$

De la ecuación 2.31 se calcula su raíz y sustituyendo en 2.32, se obtiene después de reducir términos:

$$\varepsilon_{xx} = \sqrt{1 + 2 \frac{\partial u}{\partial x} + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2} - 1 \quad \text{Ec. (2.33)}$$

De forma similar, considerando segmentos de línea orientados paralelos a los ejes y e z tenemos que:

$$\epsilon_{yy} = \sqrt{1 + 2\frac{\partial v}{\partial y} + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2} - 1 \quad \text{Ec. (2.34)}$$

$$\epsilon_{zz} = \sqrt{1 + 2\frac{\partial w}{\partial z} + \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2} - 1 \quad \text{Ec. (2.35)}$$

Las componentes del esfuerzo compartido pueden ser relacionadas a desplazamientos si consideramos los cambios angulares experimentados por los bordes del cubo durante la deformación. Consideremos las líneas PQ y PR que se muestran en la figura 2.12.

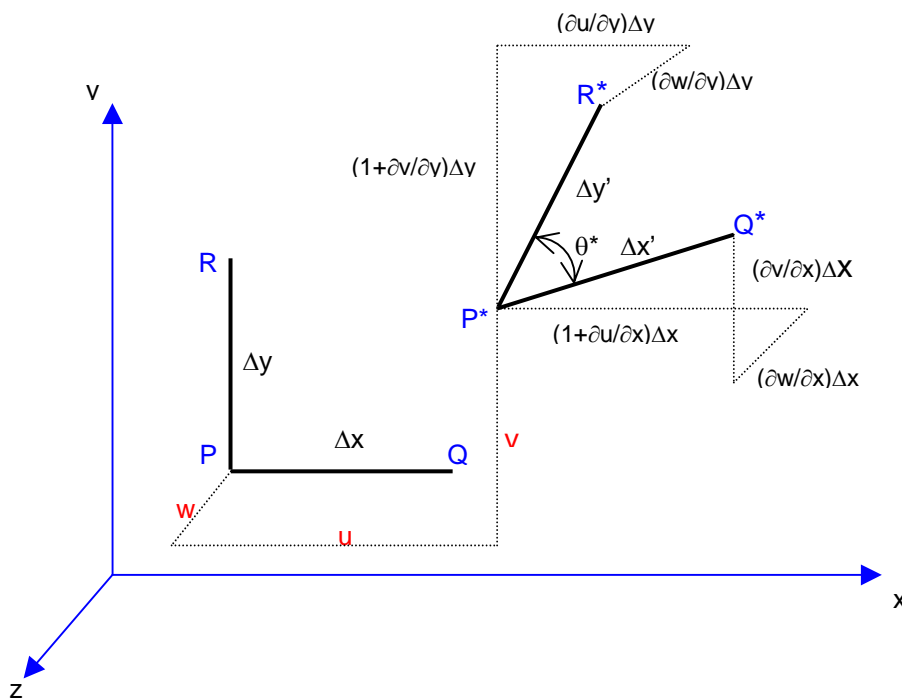


Figura 2.12 Gradientes de desplazamiento asociados con el esfuerzo compartido γ_{xy}

El ángulo θ^* entre P^*Q^* y P^*R^* en el estado deformado, se puede expresar en términos de los gradientes de desplazamiento, en que el coseno del ángulo subtendido por cualquier par de líneas intersectándose en el espacio, es la suma de los productos cruzados de los cosenos directores de las líneas con respecto al mismo conjunto de ejes de referencia, como se muestra a continuación.

$$\cos \theta^* = \left[\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \frac{\Delta x}{\Delta x'} \right] \left[\frac{\partial u \Delta y}{\partial y \Delta y'} \right] + \left(\frac{\partial v \Delta x}{\partial x \Delta x'} \right) \left[\left(1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \frac{\Delta y}{\Delta y'} \right] + \left(\frac{\partial w \Delta x}{\partial x \Delta x'} \right) \left(\frac{\partial w \Delta y}{\partial y \Delta y'} \right) \quad \text{Ec. (2.36)}$$

De la definición de esfuerzo compartido:

$$\gamma_{xy} = \left(\frac{\pi}{2} - \theta^* \right) \quad \text{Ec. (2.37)}$$

Reescribiendo la ecuación anterior, queda:

$$\sin \gamma_{xy} = \cos \theta^* \quad \text{Ec. (2.38)}$$

Sustituyendo la ecuación 2.36 en la ecuación 2.38, y empleando la ecuación 2.31 tanto para x como y, tenemos:

$$\gamma_{xy} = \arcsin \frac{\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y}}{(1 + \epsilon_{xx})(1 + \epsilon_{yy})} \quad \text{Ec. (2.39)}$$

En forma similar, considerando dos segmentos de líneas orientados paralelos a y e z, así como a z y x, se obtiene:

$$\gamma_{yz} = \arcsin \frac{\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial z}}{(1 + \varepsilon_{yy})(1 + \varepsilon_{zz})} \quad \text{Ec. (2.40)}$$

$$\gamma_{zx} = \arcsin \frac{\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial x}}{(1 + \varepsilon_{zz})(1 + \varepsilon_{xx})} \quad \text{Ec. (2.41)}$$

Las ecuaciones 2.33-2.35 y 2.39-2.41 representan una descripción común del esfuerzo en términos de la posición de puntos en un cuerpo antes y después de ser deformado. En el desarrollo de éstas ecuaciones no se impusieron restricciones en cuanto a la magnitud de los esfuerzos. Sólo una restricción fue contemplada, que es cuando los términos de orden mayor de la expansión de la serie de Taylor fueron despreciados. Pues bien, ésta restricción tiene el efecto de restringir el tamaño del segmento de recta (galgas longitudinales) empleado para la determinación del esfuerzo, en donde los gradientes de desplazamiento de la región de interés permanecen esencialmente constantes.

Si los gradientes de desplazamiento cambian rápidamente con la posición en la región de interés, pequeñas galgas se requerirán para dar precisión a las mediciones de esfuerzo. En una amplia variedad de problemas de ingeniería, los desplazamientos y esfuerzos producidos por la aplicación de cargas, son muy pequeños.

Bajo éstas condiciones, se puede asumir que los productos y raíces de los gradientes de desplazamiento serán pequeños con respecto a los gradientes de desplazamiento y por tal motivo pueden ser despreciados. Con ésta suposición las ecuaciones se ven reducidas a ecuaciones de desplazamiento-esfuerzo (ecuaciones 2.42-2.47) comúnmente encontradas en la teoría de elasticidad, y que muestran una forma sencilla de convertir un campo de desplazamiento a un campo de esfuerzo.

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \text{Ec. (2.42)}$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \text{Ec. (2.43)}$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad \text{Ec. (2.44)}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad \text{Ec. (2.45)}$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \quad \text{Ec. (2.46)}$$

$$\gamma_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \quad \text{Ec. (2.47)}$$

2.10 Referencias

- [1] R. Jones and C. Wykes, Holographic and speckle interferometry (second edition), Cambridge University Press, Cambridge, 1989
- [2] Kjell J. Gasvik, Optical metrology, John Wiley & Sons Ltd, 1987
- [3] W. Schumann – m. Dubas, Holographic Interferometry, Springer Veriag Berlin Heidelberg New York, 1979
- [4] Schumann - Zürcher - Cucho, Holography and deformation analysis, Springer Veriag Berlin Heidelberg New York Tokyo, 1985
- [5] James W. Dally - William F. Riley, Experimental stress analysis (third edition), Mc Graw Hill, 1991
- [6] Gary Cloud, Optical methods of engineering analysis, Cambridge, 1995
- [7] Raymond J. Roark and Warren C. Young, Formulas for stress and strain (fifth edition), Mc Graw Hill, 1982
- [8] Fernando Mendoza, Apuntes de metrología óptica I y II, 2001 y 2002
- [9] F. Mendoza Santoyo, G. Pedrini, S. Schendin, and H. J. Tiziani, “3D displacement measurements of vibrating objects with multi-pulse digital holography”, Meas. Sci. Tech. Vol. 10, p. 1305-1308, 1999.



Capítulo III

Capítulo III

Procedimiento Experimental

En el presente capítulo se describe ampliamente el procedimiento experimental al que se vieron sometidas el par de piezas metálicas estudiadas, el capítulo se divide en secciones, esto debido a que los objetos fueron interrogados a través de diversas pruebas bajo diferentes técnicas, y es a lo largo de estas secciones que se irá observando que información es posible extraer de cada pieza (barra 1 y barra 2) bajo distintas condiciones. Para mejor comprensión de esto, a continuación se muestra la organización propuesta.

➔ Sección 1 Pruebas por medio de Espi.

➔ Sección 1.1 Prueba estática para la barra 1

➔ Sección 1.1.1 Prueba con vibración para la barra 1

➔ Sección 1.2 Prueba estática para la barra 2 (anverso y reverso)

➔ Sección 1.2.1 Prueba con vibración para la barra 2

➔ Sección 2 Pruebas por medio de holografía digital.

➔ Sección 2.1 Prueba estática para la barra 1

➔ Sección 2.2 Prueba estática para la barra 2 en el anverso

➔ Sección 2.3 Prueba estática para la barra 2 en el reverso

En el capítulo siguiente es en donde se explicarán los resultados obtenidos de la sección 2, ya que como se verá mas adelante en este mismo capítulo, son los resultados que más ofrecen información para la finalidad que se persigue en el presente trabajo.

Antes de continuar, y con el fin de identificar los objetos de estudio, tenemos que se llevan a cabo experimentos con dos piezas metálicas que como se mencionó en la introducción, provienen de la industria, así que se encuentran

deterioradas y en diferente estado de corrosión, por lo que serán diferenciadas como barra 1 y barra 2, y a continuación se muestran las imágenes de ambas piezas.



Figura 3.1 Objetos a) Imagen de la barra 1 b) Imagen de la barra 2

Sección 1

Para poder llevar a cabo la interferometría de moteado electrónico (ESPI) es necesario evitar el comportamiento especular de las barras, ya que se pierde información por estos excesivos reflejos metálicos. Para evitar este inconveniente se utiliza un aerosol que contiene sellador industrial empleado para detectar junto con otros compuestos, fracturas en tuberías u otras piezas metálicas y que se adhiere perfectamente a la superficie sobre la que se aplica, dando como resultado, un acabado en color blanco mate no especular y que contrarresta el inconveniente de los reflejos metálicos, además de que la luz láser que incida sobre esta superficie, tiene un comportamiento uniforme y aún con baja potencia se puede observar el objeto iluminado a través de una cámara CCD; las piezas ya con revelador aplicado se muestran en la figura 3.2.

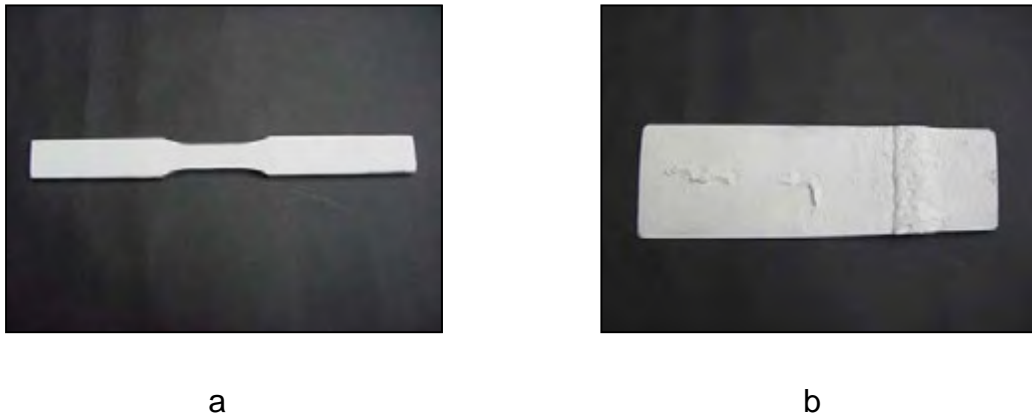


Figura 3.2 Objetos a) Barra 1 con revelador b) Barra 2 con revelador

Debido a que las piezas metálicas presentan irregularidades diversas en su superficie, es posible que un interferómetro fuera del plano sea capaz de detectar las imperfecciones que presentan estos objetos. Ya que es por la naturaleza misma de las piezas, que son sumamente rígidas, que un pequeño esfuerzo aplicado a éstas últimas, puede no verse reflejado si se observa en el plano.

Es por ello que se armó un interferómetro fuera del plano como se ve en la figura 3.3, en donde el láser es de He-Ne (633nm) a 25mW con una longitud de coherencia aproximadamente de 22cm (calculada en laboratorio con anterioridad), lo que resulta más que suficiente para el área que se pretende observar. Los haces de iluminación tanto para el objeto como el de referencia (f_1 y f_2 respectivamente), son llevados a través de fibras ópticas, con la finalidad de permitir el cambiar la posición y el ángulo con que se ilumina el objeto.

La cámara que se emplea en este punto, es una cámara CCD Cohu de baja resolución, pero que es suficiente para resolver el moteado producido por el láser de He-Ne. La imagen del objeto se hace llegar a la cámara CCD por medio de un zoom comercial marca Nikon que va de 28-70mm.

El divisor de haz $d1$, el cual se encarga de dividir el haz láser directo en haz objeto y haz referencia, transmite el 80% de la luz hacia el objeto y el resto hacia la referencia, y debido a que la intensidad del haz de referencia se debe atenuar, se utiliza un filtro neutro de densidad variable de baja potencia ($a1$). Para el recombinador de haces ($d2$) se emplea un cubo 50/50.

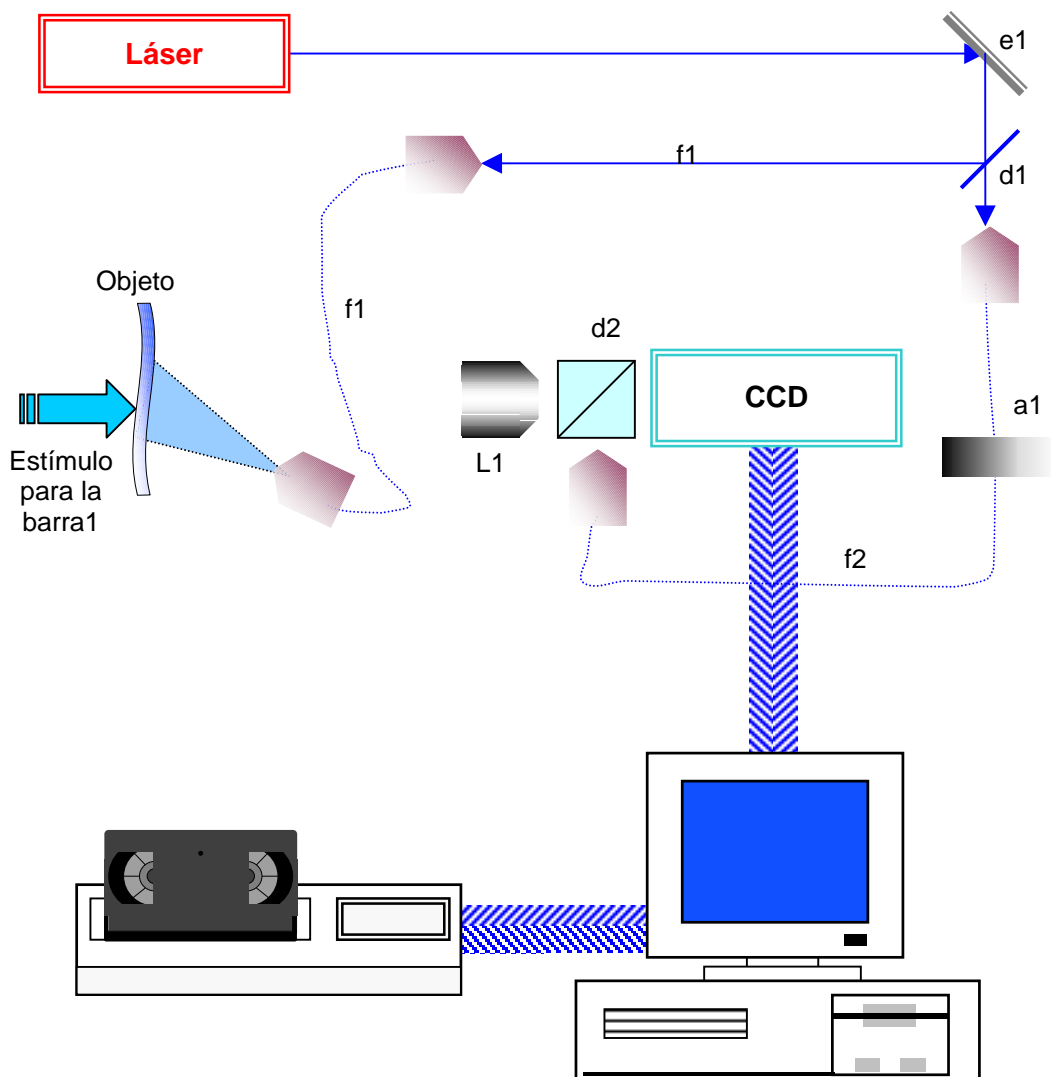


Figura 3.3 Arreglo para Espi

La información que proporciona la cámara CCD, se hace llegar a una computadora Pentium en donde se procesan los patrones de moteado, que posteriormente se hacen llegar a un monitor Sony b/n en el que se observan los patrones de franjas en tiempo real por medio de substracción. Para grabar la salida de video del monitor, se utiliza una video casetera en formato VHS.

Sección 1.1

Una vez que se cuenta con el interferómetro montado y fijo a la mesa holográfica, se plantea el estímulo que se le debe aplicar a la barra 1. Este debe ser repetible y controlado, se probaron presiones con pinzas metálicas, prensas mecánicas y otros objetos sin que se pudiera cumplir la condición de repetibilidad ocasionado por lo rudimentario que éstas herramientas resultan para desplazamientos finos.

Así pues, se optó por ejercer desplazamientos a través de tornillos micrométricos de la marca Newport, colocados de tal suerte que puedan revelar los defectos de las piezas metálicas al momento que estos entren en contacto con la barra. Para llevar a cabo este dispositivo de perturbación, se montaron dos bases magnéticas como soportes, más una barra transversal para fijarlos y dar mayor rigidez al dispositivo.

Con la montura de un filtro espacial de la misma marca se arma la cabeza del dispositivo sobre la cual va montado el tornillo micrométrico. Una vez ensamblado esto, se fija a la mesa holográfica por medio de tornillos y

abrazaderas mecánicas para evitar que se desplace a sí mismo al entrar en acción.

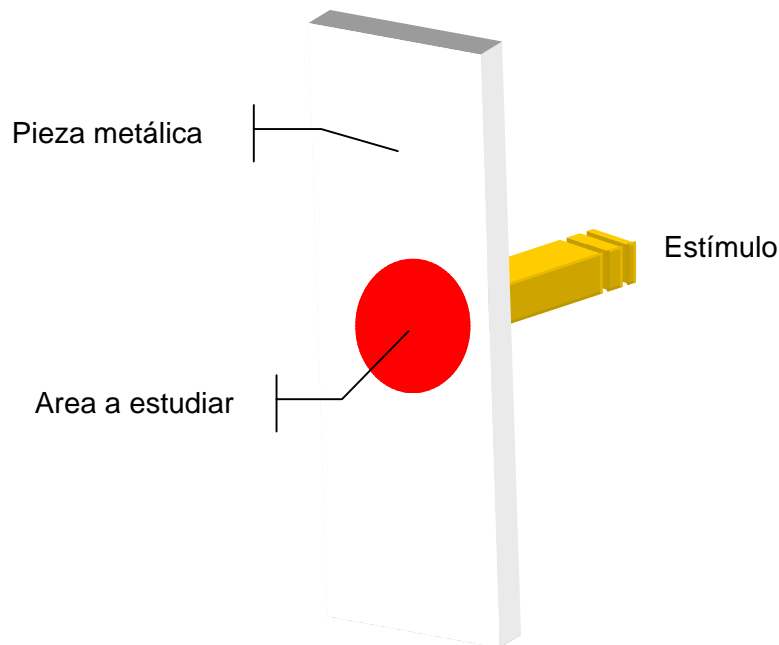


Figura 3.4 Perturbación ejercida en la barra 1

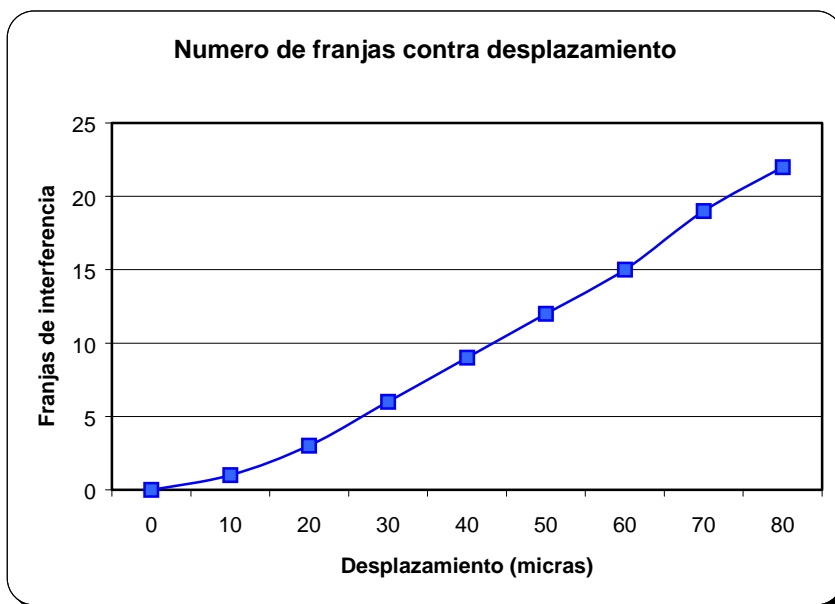
Para el caso particular de la barra 1, la cual es una barra delgada y muy rígida, se le coloca un tornillo micrométrico justo detrás del área de estudio (centro) como se ve en la figura 3.4. El desplazamiento se empieza a contar a partir del momento en que este hace contacto con la barra, para este punto se cuenta como $0\mu\text{m}$ de desplazamiento y no se forma franja alguna en el monitor. Una vez en esa posición, se cuentan las franjas que aparecen en el monitor a razón de las micras de desplazamiento ejercidas y que aparecen en la tabla 3.1, con la finalidad de detectar el comportamiento que presenta la barra 1.

Tabla 3.1 Relación de franjas contra desplazamiento del tornillo micrométrico para la barra 1

Desplazamiento (μm)*	Numero de franjas que aparecen en el monitor
0	0
10	1
20	3
30	6
40	9
50	12
60	15
70	19
80	22

El tornillo micrométrico da un desplazamiento de $10\mu\text{m}$ por división

De los valores que se muestran en la tabla 3.1, se obtiene la gráfica 3.1, en la que es posible observar el comportamiento casi lineal que presenta la barra 1 debido a su gran solidez ante el estímulo del tornillo micrométrico.



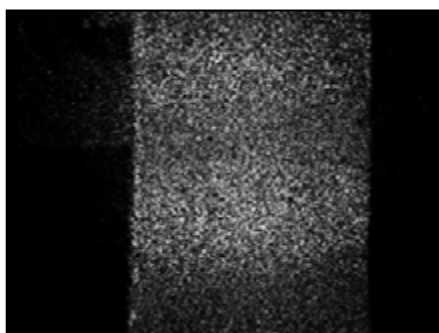
Gráfica 3.1 Comportamiento del número de franjas observadas contra el desplazamiento aplicado en la barra 1.

La barra 1 cuenta con un daño en su parte central tal y como se muestra en la figura 3.5 y que es el área de principal interés, ya que es ahí en donde se espera encontrar rastros de esfuerzos ocasionados por el impacto. El recuadro punteado indica el área visualizada por el arreglo óptico y que es donde se observarán los patrones de franjas de la figura 3.6.

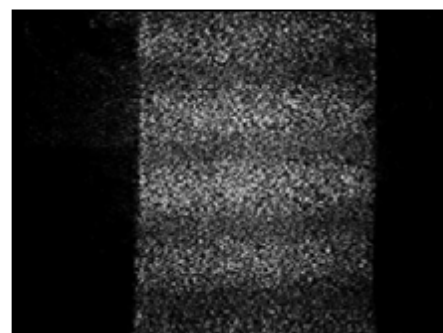


Figura 3.5 Área central de la barra 1 (recuadro blanco)

A continuación se despliegan imágenes de los patrones de franjas obtenidos a diferentes desplazamientos ejercidos sobre la barra 1.



a) 10µm



b) 20µm

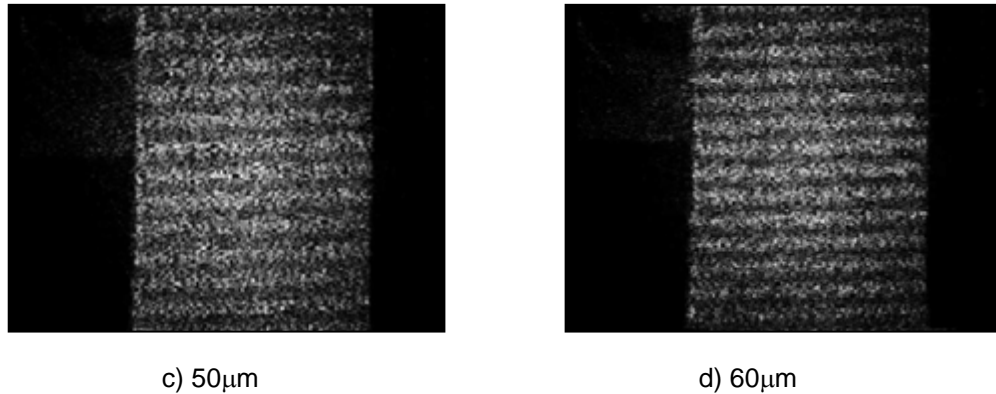


Figura 3.6 Patrones de franjas de la barra 1

De las imágenes anteriores se puede percatar que los patrones de franjas no están sugiriendo la presencia de algún daño en la barra, aún para desplazamientos grandes, por lo que esta clase de estímulo no proporciona información que sea de utilidad para el fin que se persigue.

Sección 1.1.1

Al no encontrar información útil en la prueba estática por Espi, se busca otra clase de estímulo, para ello, se coloca en la posición en que anteriormente estaba situado el tornillo micrométrico, un vibrador mecánico de la marca LDS, el cual es capaz de producir un barrido en frecuencia que va desde 10hz hasta 10khz con una potencia máxima de salida de 5 watts rms (ajustado manualmente). El objetivo que se tiene en mente para esta sección, es realizar un barrido en frecuencia y encontrar las frecuencias en las que entra en resonancia la barra 1. Después de esto, se selecciona la o las frecuencias en las que se muestren patrones de franjas bien definidos que den idea de la presencia de daño o esfuerzo alguno.

Los modos de vibración muestran franjas del tipo Bessel, por lo que el contraste se ve seriamente afectado, pero a 1.2khz se encontró un modo de vibración al que responde la barra 1 y se muestra en la figura 3.7.

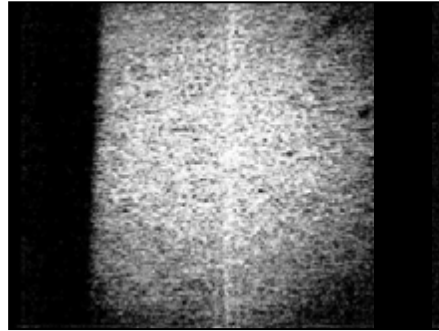


Figura 3.7 Modo de vibración obtenido a 1.2khz

De la figura anterior, aún y cuando se observa un patrón que podría ser revelador para encontrar el daño físico con que cuenta la barra, no es confiable ya que se llevaron a cabo pruebas sujetando la barra a diferentes alturas y este patrón varía sensiblemente de acuerdo a la posición de sujeción.

Sección 1.2

Tomando ahora la barra 2, se coloca en el mismo arreglo interferométrico mostrado en la figura 3.3, pero debido a que es sumamente diferente la pieza (más grande y ancha), al desplazarla con el tornillo micrométrico no se observó nada revelador en el monitor, así que se busca modificar el dispositivo de desplazamiento para que pueda perturbarla más. No fue sino después de varias pruebas con diferentes arreglos, que se opta por un sistema de tres tornillos micrométricos tal y como se muestra en la figura 3.8.

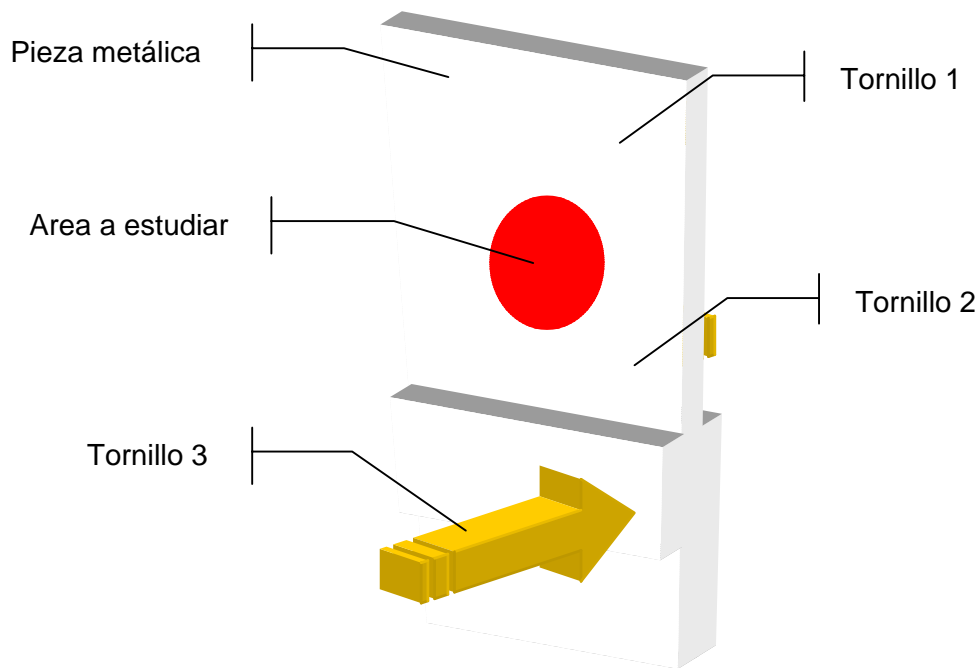


Figura 3.8 Perturbación ejercida en la barra 2 en su parte superior.

Al igual que en la sección 1.1, se consideran los desplazamientos a partir del momento en que el tornillo micrométrico hace contacto con el objeto ($0\mu\text{m}$), y una vez que se tiene el arreglo de tal forma que se puede hacer repetible, se encuentran las relaciones entre las franjas observadas y el desplazamiento para cada tornillo, para determinar a cual de todos ellos resulta más sensible la barra.

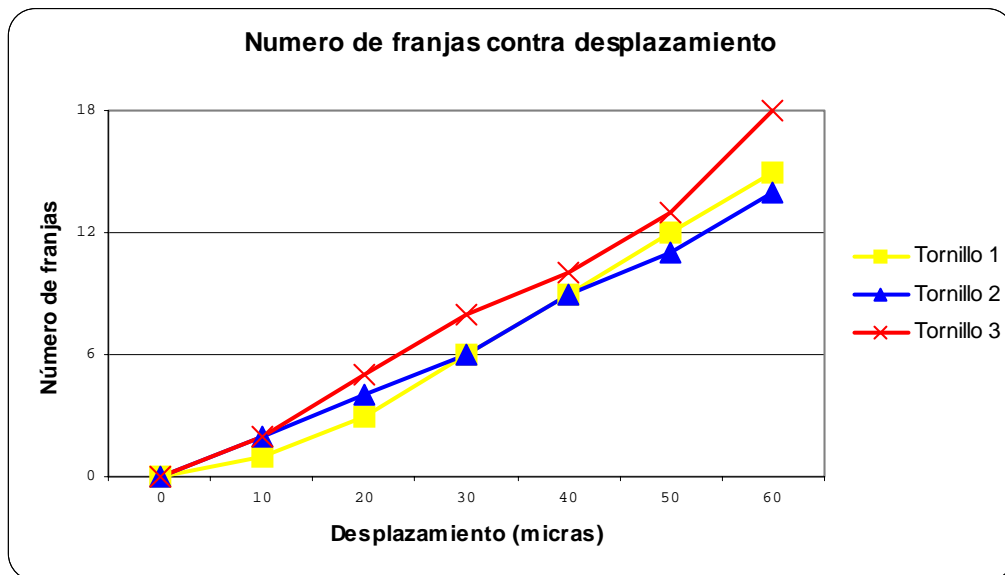
Para realizar lo anterior, se observa el comportamiento de la barra 2 con cada uno de los tornillos, manteniendo el tornillo a medir en contacto y el par restante sin hacer contacto con la pieza, lo que genera la información que se destaca en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Relación de franjas contra desplazamiento para la barra 2 en la parte superior.

Desplazamiento (μm)*	Franjas por el tornillo 1	Franjas por el tornillo 2	Franjas por el tornillo 3
0	0	0	0
10	1	2	2
20	3	4	5
30	6	6	8
40	9	9	10
50	12	11	13
60	15	14	18

Cada tornillo micrométrico da un desplazamiento de $10\mu\text{m}$ por división

Basándose en los valores de la tabla anterior, se obtiene la gráfica 3.2.



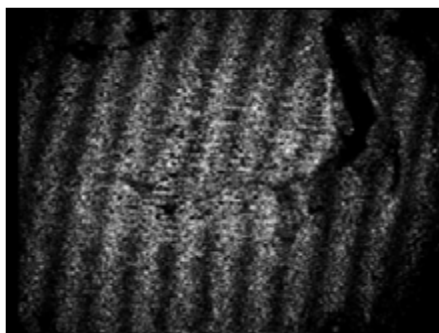
Gráfica 3.2 Comportamiento del número de franjas contra el desplazamiento aplicado para la barra 2 en la parte superior.

De la gráfica 3.2, destaca el hecho de la barra 2 es ligeramente más sensible a desplazamientos ocasionados por el tornillo 3, lo que se considerará al forzar la pieza. Una vez obtenido lo anterior, se llevan a cabo una serie de combinaciones en desplazamientos, proporcionados por los tornillos micrométricos para determinar si es posible detectar la falla en la parte superior de la barra 2, que se muestra en el recuadro rojo de la figura 3.9.

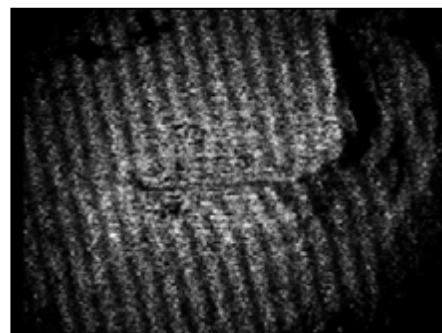


Figura 3.9 Daño en la parte superior de la barra 2.

Es este recuadro rojo, el que se observa por el interferómetro de la figura 3.3 y cuyos patrones de franjas por diferentes combinaciones, se muestran en la figura 3.10 a, b, c y d. En estos patrones de franjas, se alcanza a apreciar una desviación en las franjas cerca del área dañada de la barra 2 (figura 3.9). En la tabla 3.3 se muestran los desplazamientos ejercidos por cada tornillo en cada una de las combinaciones de la figura 3.10.



a) combinación 1



b) combinación 2

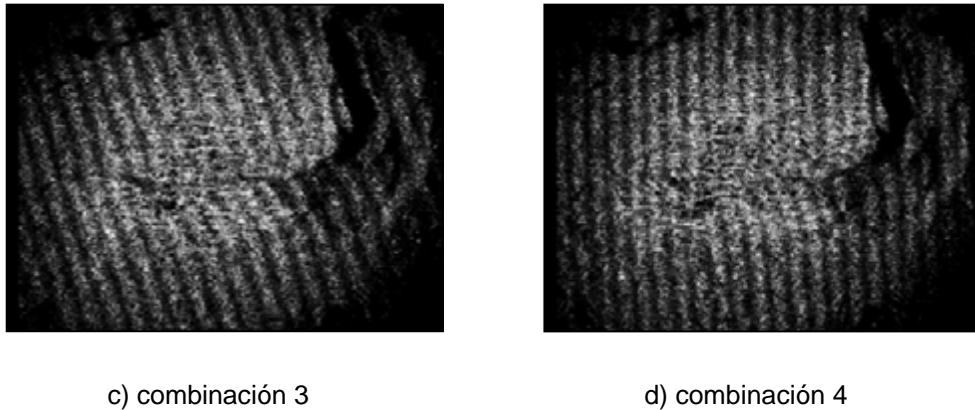


Figura 3.10 Combinaciones para la parte superior de la barra 2.

Tabla 3.3 Desplazamientos por combinación en la parte superior de la barra 2

Combinación	Desplazamiento (μm) para el tornillo 1	Desplazamiento (μm) para el tornillo 2	Desplazamiento (μm) para el tornillo 3
1	30	150	200
2	20	400	200
3	0	400	200
4	80	400	300

De la tabla 3.3 se puede observar que los desplazamientos ejercidos son bastante grandes, lo que coincide con la rigidez de esta barra. Pero aún y cuando es posible detectar una desviación en las franjas cuando éstas se dibujan sobre el área dañada, no se puede tomar con certeza el resultado, ya que la repetibilidad y el control son difíciles de cumplir, por ello, se repite el proceso de los tres tornillos en la parte inferior de la misma barra, pero en esta área presenta otro tipo de deterioro tal y como se puede apreciar en la figura 3.11.



Figura 3.11 Daño en la parte inferior de la barra 2.

Con la distribución de tornillos micrométricos como sigue:

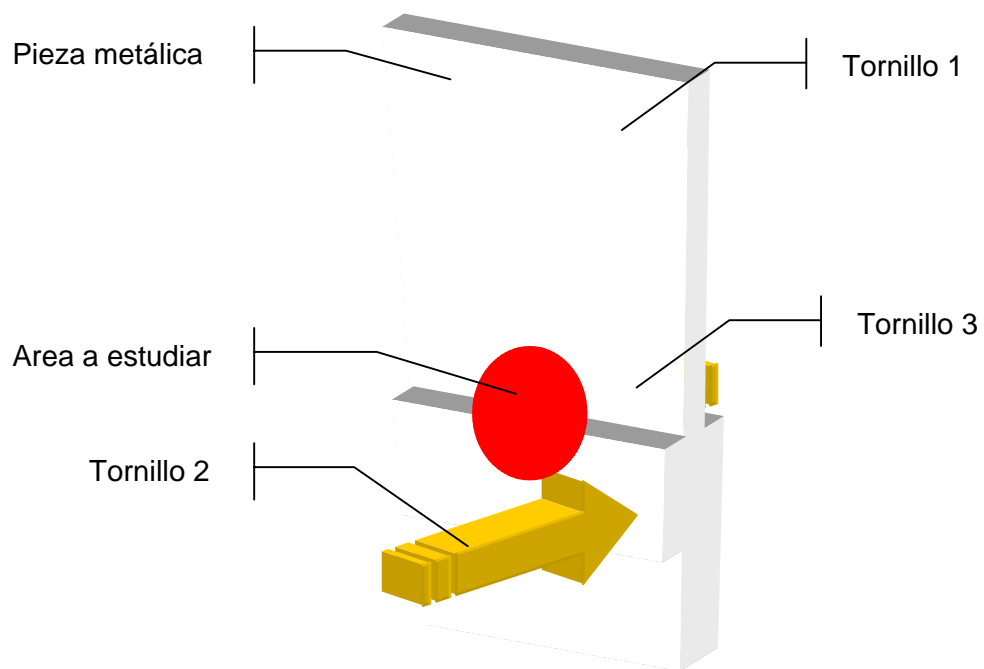


Figura 3.12 Perturbación ejercida en la barra 2 en su parte inferior.

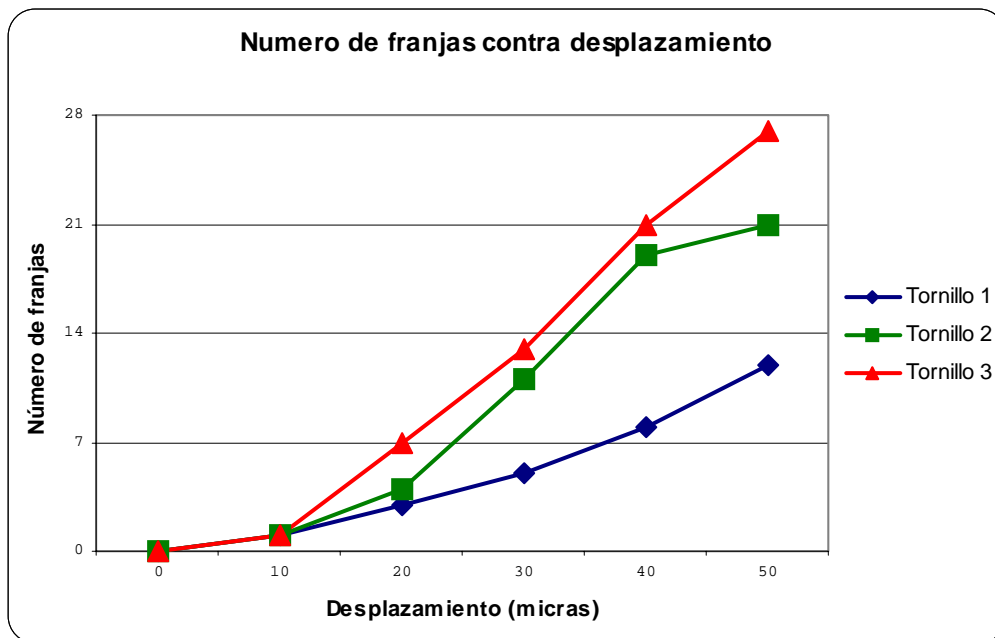
Al igual que en la parte superior, se tabula el número de franjas observado a razón del desplazamiento ejercido cada tornillo micrométrico, obteniendo la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Relación de franjas contra desplazamiento para la barra 2 en la parte inferior.

Desplazamiento (μm)*	Franjas por el tornillo 1	Franjas por el tornillo 2	Franjas por el tornillo 3
0	0	0	0
10	1	1	1
20	3	4	7
30	5	11	13
40	8	19	21
50	12	21	27

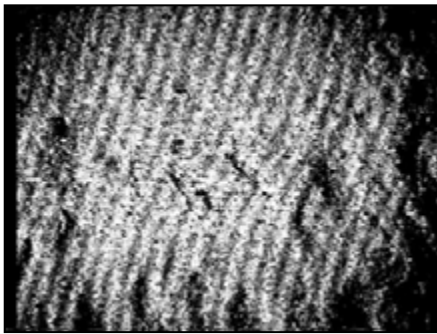
Cada tornillo micrométrico da un desplazamiento de $10\mu\text{m}$ por división

Graficando estos datos se obtiene:

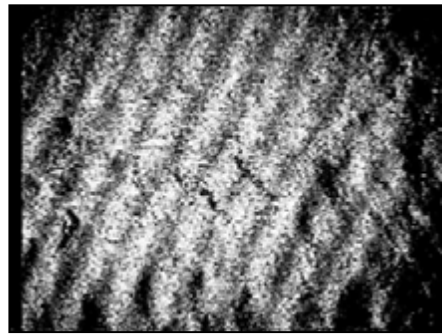


Gráfica 3.3 Comportamiento del número de franjas contra el desplazamiento aplicado para la barra 2 en la parte inferior.

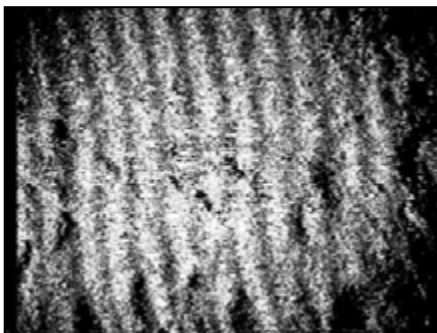
De forma similar a lo que se practicó en la parte superior de la barra 2, se realizan combinaciones de desplazamientos entre los tres tornillos, tratando de encontrar combinaciones en donde se observe el estado que guarda la barra 2 en esta área y que se muestran en la figura 3.13 a, b, c y d.



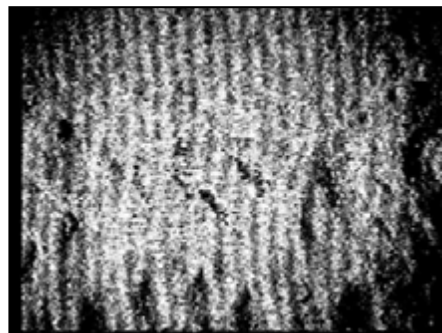
a) combinación 1



b) combinación 2



c) combinación 3



d) combinación 4

Figura 3.13 Combinaciones de desplazamiento en la parte inferior de la barra 2

Para cada combinación de la figura 3.13 se tienen diferentes desplazamientos combinados en los tornillos micrométricos, tal y como se muestra en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Desplazamientos por combinación en la parte inferior de la barra 2

Combinación	Desplazamiento (μm) para el tornillo 1	Desplazamiento (μm) para el tornillo 2	Desplazamiento (μm) para el tornillo 3
1	150	320	290
2	150	0	290
3	190	290	300
4	0	300	300

Al igual que en la parte superior, fue necesario el ejercer desplazamientos grandes a fin de observar desviaciones en las franjas que se formaban sobre la pieza. Queda así pues, probado que si es posible observar defectos en la barra 2 por medio de estos estímulos, más cabe resaltar el hecho de que los defectos en la barra son visibles a simple vista, quedando como una inspección meramente superficial, lo que no ofrece una gran ventaja al momento de inspeccionar la pieza metálica.

Además existe el hecho de que el arreglo del estímulo con los tres tornillos, puede no ser la mejor opción, ya que la calibración de éste es difícil y se requiere para poder garantizar el que sea repetible el experimento.

Sección 1.2.1

Al igual que con la barra 1, se monto el vibrador mecánico LDS, a fin de encontrar los modos de resonancia de la barra2, pero esta barra es tal su grado de deterioro y oxidación, que ante el barrido en frecuencia provocado por el vibrador, se muestran patrones de franjas demasiado ruidosos que no aportaron algo significativo al fin que se persigue.

Es así como al final de esta primera sección de este capítulo, se encuentra la problemática de haber encontrado información meramente superficial de daños que se observan a simple vista en las dos barras. Motivo por el cual se busca una técnica conocida, que ofrezca mayor posibilidad de interrogación en estas piezas metálicas. Esta técnica es la holografía digital, la cual resulta más sensible a pequeñas variaciones que se producen en el objeto ante un estímulo, pero que son reflejo de su estructura interna y es en la sección 2 que se mostrará lo realizado con los objetos de interés.

Sección 2

Como ya se mencionó al final de la sección 1, en esta sección se trabajará con la holografía digital en modo estático; esto, debido a que como se encontró en las secciones 1.1.1 y 1.2.1, los objetos no responden favorablemente a la vibración y no se obtiene mucha información de ellos bajo este modo.

El arreglo interferométrico con que se llevará a cabo la holografía digital no es tan simple como ocurrió en el caso de Espi, pues como se mencionó en el capítulo anterior, se van a tomar tres mediciones por evento que sufra el objeto, así que el arreglo debe ser lo suficientemente flexible y a la vez sólido, que permita realizar las mediciones en forma confiable.

En la figura 3.14 se muestra el arreglo a emplear para las dos piezas, sobresale el hecho de que las piezas metálicas se fijan por medio de una prensa mecánica (en rojo), que evita cualquier reacomodo que pudiera sufrir la pieza metálica a estudiar y añadir información errónea durante la doble exposición, por lo que es necesario hacer mayor énfasis en la fijación de las monturas y equipo de medición a la mesa holográfica.

Para estabilizar el laboratorio, éste se cierra completamente para evitar corrientes de aire que provoquen flujos frente a la cámara CCD, el aire acondicionado se apaga con horas de anticipación a la captura de datos. Otra medida, es que solo este en el laboratorio quién va a manipular el equipo, ya que sólo así se garantiza la obtención de resultados veraces.

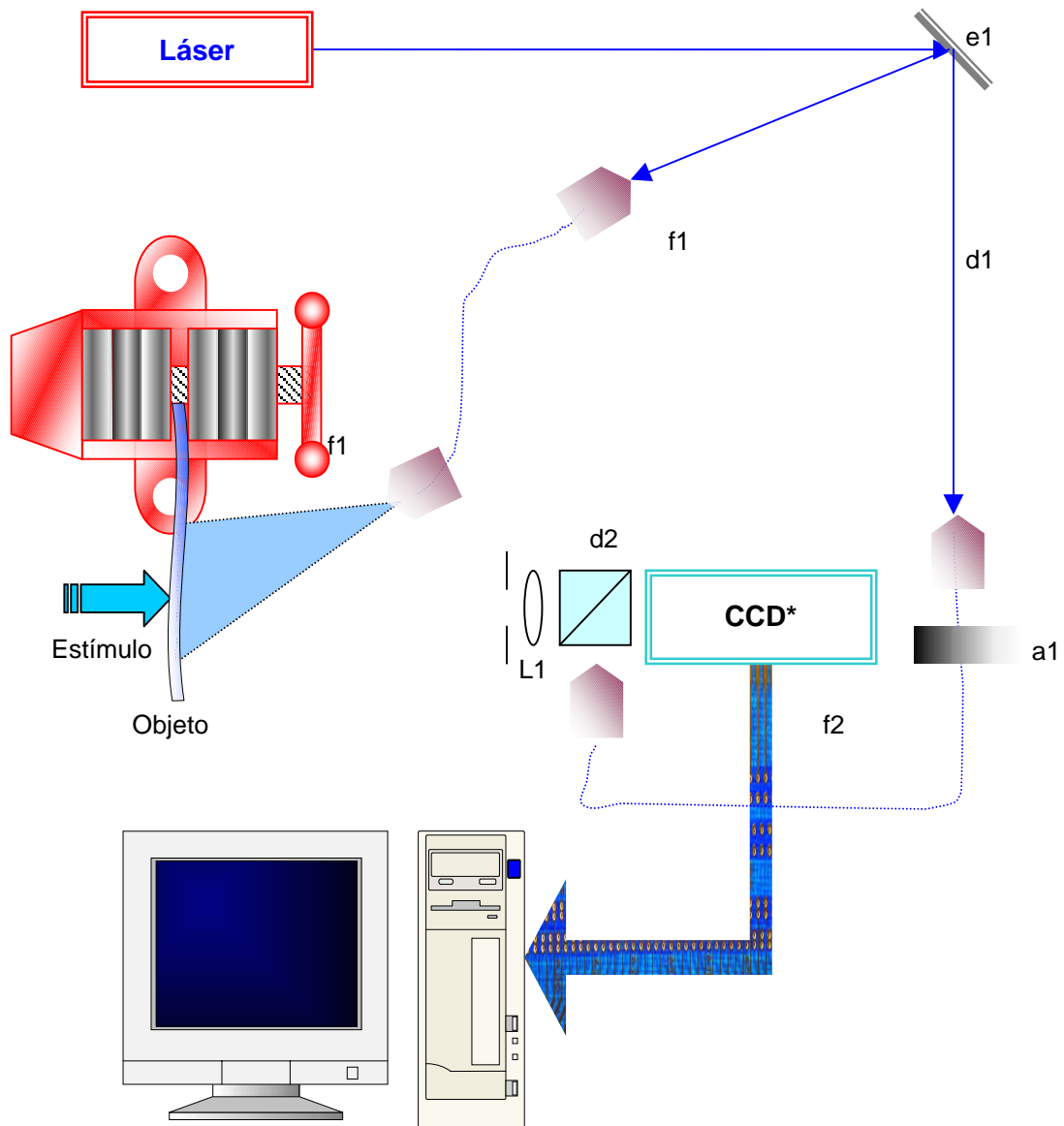


Figura 3.14 Arreglo para Holografía Digital

Al igual que la figura 3.3, la descripción de los elementos es similar, excepto por los detalles que a continuación se listan. El láser empleado en esta sección es un láser de Ion Argón de 460-517nm en azul, de mayor potencia y que

cuenta con apenas 80 milímetros de longitud de coherencia (medido experimentalmente en laboratorio), pero que es lo suficientemente holgada para las áreas que se interrogan. El zoom es sustituido por una lente biconvexa de distancia focal de 50mm y 50mm de diámetro, frente a la cual se coloca una apertura rectangular (de cartulina negra). La cámara CCD a diferencia que la sección anterior es una cámara de alta resolución (Sensicam) de 1024 por 1280 pixeles a 12 bits, la cual esta conectada directamente a una computadora Pentium III (750 Mhz) en donde se capturan las imágenes generadas por dicha cámara.

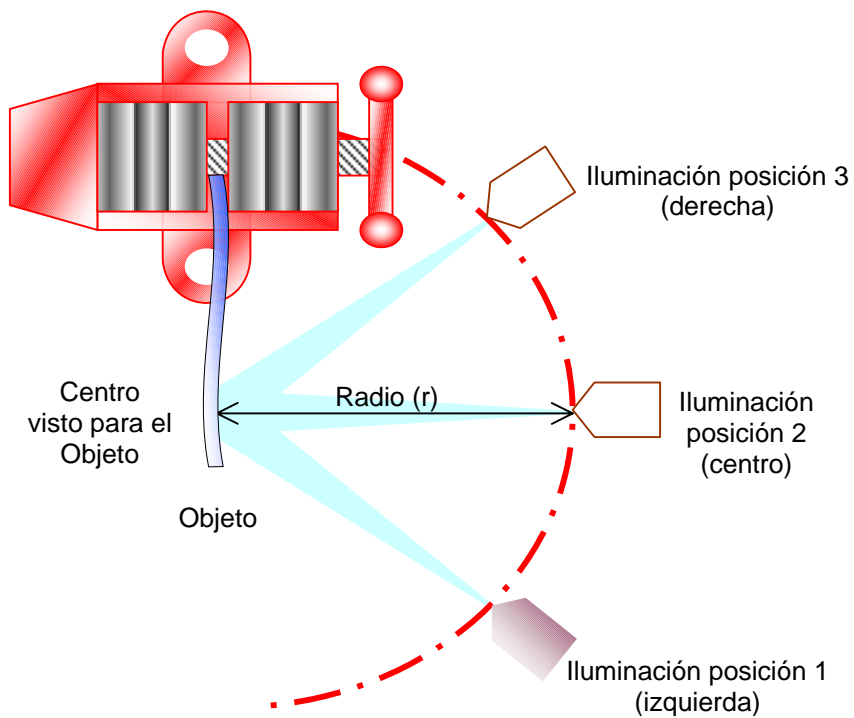


Figura 3.15 Tercia de iluminaciones.

La información que se requiere, debe proporcionar información en la tres direcciones (x,y,z), para lo cual se llevan a cabo iluminaciones desde tres puntos distintos como se ejemplifica en la figura 3.15.

El software que incluye la cámara Sensicam permite seleccionar un área específica dentro del total que cubren los pixeles, fijando así el centro visto del objeto que funcionará como la coordenada $x=0$, $y=0$, $z=0$.

Ahora bien, por facilidad, este punto se considera como el centro de una esfera de radio r sobre cuya superficie se hace coincidir la mínima diferencia de camino óptico del interferómetro (ajustando los caminos ópticos), para que sin importar en que punto de la superficie se coloque la fuente de iluminación, se obtenga un contraste máximo en el patrón de franjas observado.

En esta sección se busca un estímulo que cumpla con que:

- ❖ Sea repetible
- ❖ Restituya la pieza a inspeccionar a su estado original una vez retirado
- ❖ Fácil de implementar

Considerando lo anterior, podemos pensar un ejercer una presión sobre la pieza metálica, para ello se emplea nuevamente un tornillo micrométrico. Pero se busca un desplazamiento que cumpla con los incisos anteriormente enunciados, para lo cual se completó cuantas veces fue necesario el proceso descrito en el apéndice A, para encontrar que el estímulo que reúne los requisitos es el desplazamiento a $5\mu\text{m}$.

Sección 2.1

La barra 1 es colocada en el arreglo interferométrico mostrado en la figura 3.14, se coloca la parte central de la barra coincidiendo hacia la cámara CCD (figura 3.16), una vez fijada la barra, se llevan a cabo la captura de las imágenes desde tres puntos de iluminación (figura 3.15) sobre la superficie de la esfera propuesta anteriormente, dando como resultado tres pares de imágenes (cada par con una imagen no perturbada y otra perturbada con $5\mu\text{m}$).

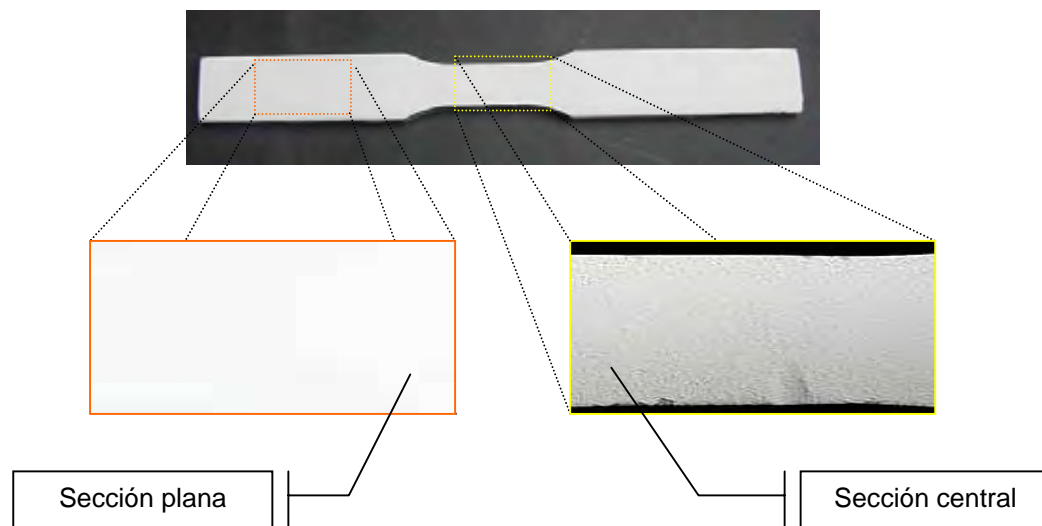


Figura 3.16 Secciones de la barra 1

Cada uno de estos pares es sometido a un programa, que al igual que el programa descrito en el apéndice A, obtiene la resta holográfica, pero aquí además de esto, se calcula la diferencia de fase entre ambos y se obtiene así el mapa de fase envuelto de cada posición de iluminación para la parte central de la barra 1, los cuales se muestran en la siguiente figura.

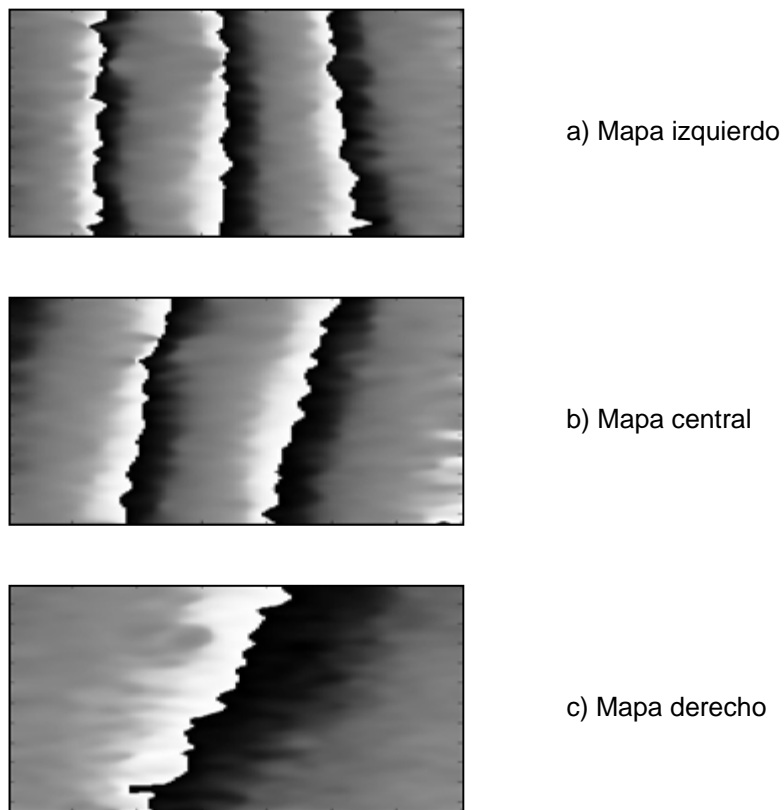
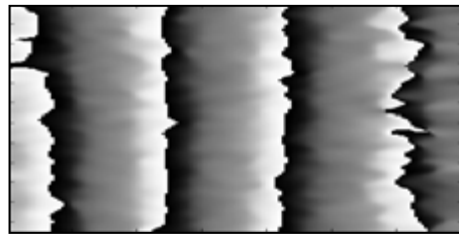


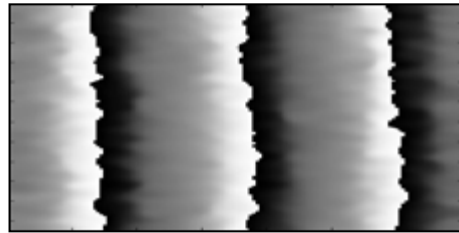
Figura 3.17 Mapas de fase envuelta para la barra 1 sección central

Para cada uno de los mapas envueltos se cuenta con las coordenadas de posición relativa de la fuente de iluminación con respecto al centro del objeto, así mismo las coordenadas de la cámara CCD. Ahora bien, de la misma forma en que se interrogó la parte central de la barra1, se desplaza la barra hacia la parte plana de ésta, con el fin de tener un parámetro de referencia que indique distinción entre ambas secciones.

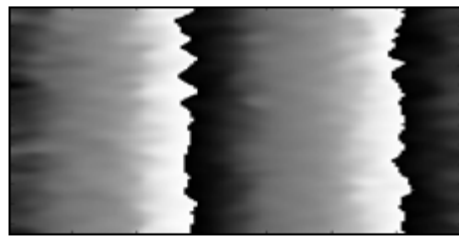
De la parte plana se obtuvieron los mapas de fase envuelta con sus correspondientes coordenadas relativas, como se ve en la figura 3.18.



a) Mapa izquierdo



b) Mapa central



c) Mapa derecho

Figura 3.18 Mapas de fase envuelta para la barra 1 sección plana

A partir de este punto se obtienen los mapas de fase desenvuelta, los que se procesan en un programa y en el siguiente capítulo se discutirán los resultados obtenidos.

Sección 2.2

El anverso de la barra 2 presenta varias secciones dañadas, así que se selecciona la parte inferior (figura 3.11) y en la siguiente figura se muestra el área que es interrogada en el arreglo de la figura 3.14.

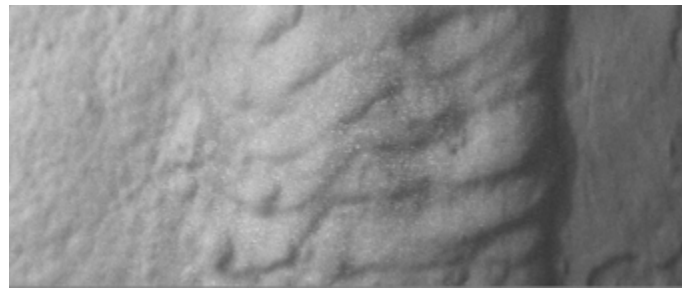
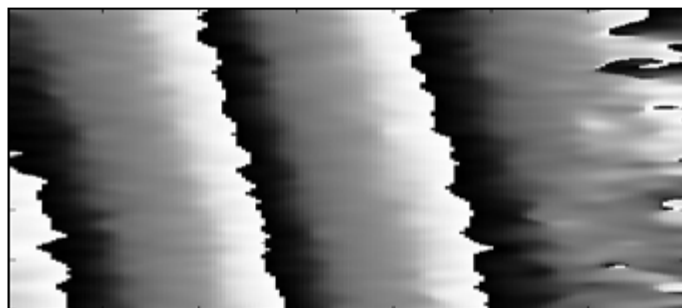
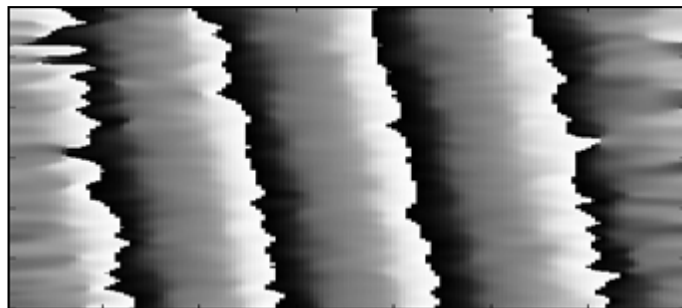


Figura 3.19 Sección del anverso a interrogar de la barra 2

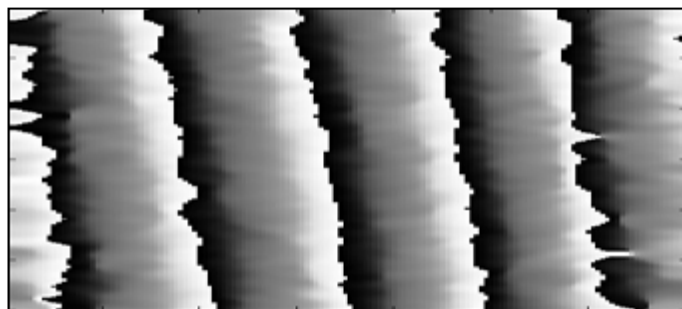
De forma similar a la sección 2.1, se obtienen los mapas de fase envuelta para las tres posiciones de iluminación y que se muestran en la siguiente figura.



a) Mapa izquierdo



b) Mapa central



c) Mapa derecho

Figura 3.20 Mapas de fase envuelta para la barra 2 anverso

Las coordenadas relativas de posición, cambian de prueba a prueba, ya que se buscan los puntos que iluminen suficiente a la barra que esta siendo interrogada, de tal forma que no se pierda información al momento de desenvolver los mapas de fase envuelta. Ya que como se mencionó en la sección 2, el láser posee muy poca longitud de coherencia.

Los mapas mostrados en la figura anterior, se observan mucho más accidentados que los que se obtuvieron con la barra 1, ya que al ser muy rugoso el anverso de la barra 2 la iluminación se pierde fácilmente en la vecindad de una pequeña área, más sin embargo, esto se solucionó con iluminaciones en ángulos pequeños que evitan la formación de sombras indeseables. Se une además a esto, que los bordes de los mapas están ya cerca del límite de la longitud de coherencia del láser, por lo que se realiza un filtrado para mejorar la imagen.

Sección 2.3

Una vez interrogado el anverso de la barra 2, se gira a ésta, para interrogar el reverso, que como se ve en la figura 3.21, es una sección menos rugosa pero mucho más oxidada y nos servirá de parámetro al momento de interpretar los resultados del anverso.

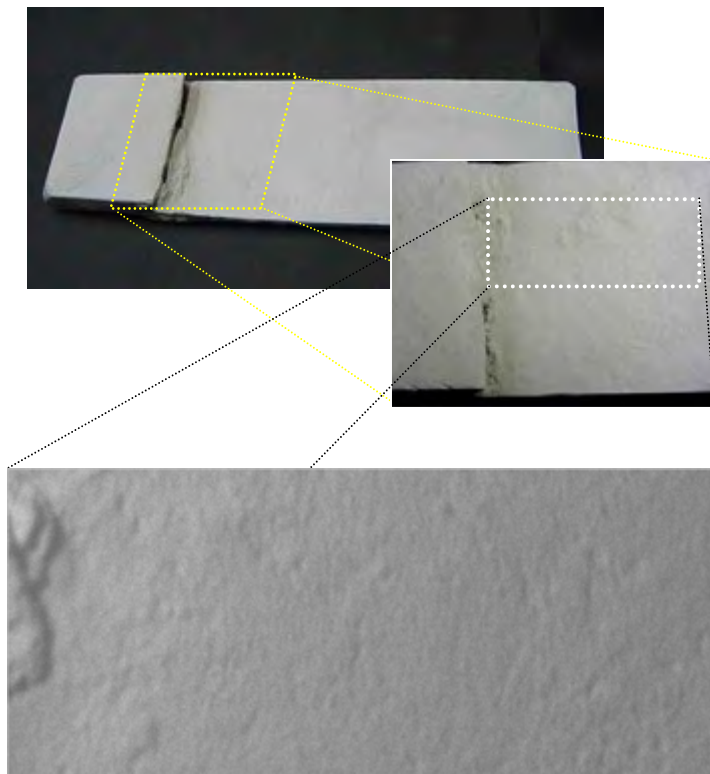
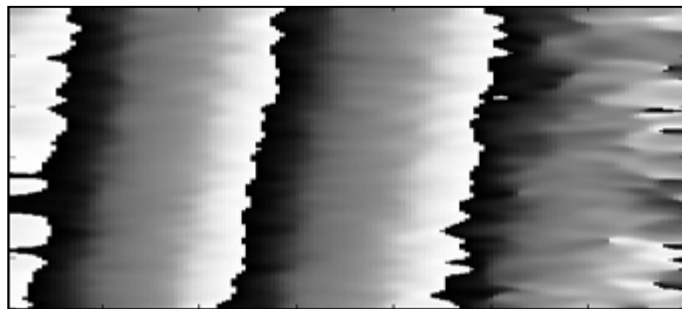
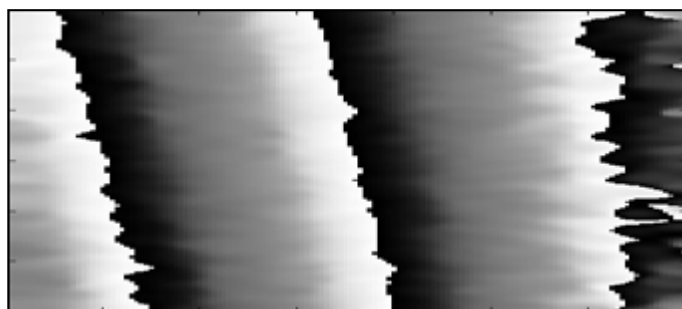


Figura 3.21 Sección del reverso a interrogar de la barra 2

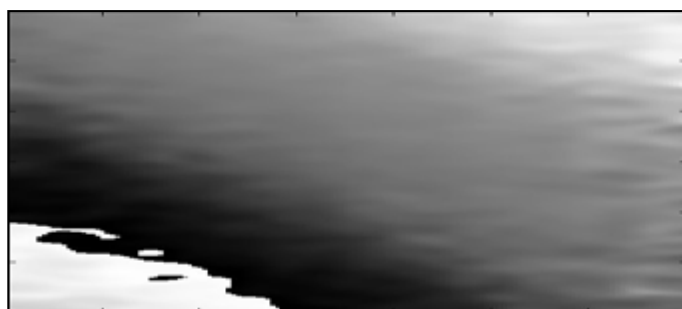
La sección que se agranda de la figura 3.21 es la que se interroga en el arreglo interferométrico de la figura 3.14, que después de capturar las seis imágenes y procesarlas, nos generan los tres mapas de fase envuelta mostrados en la figura 3.22.



a) Mapa izquierdo



b) Mapa central



c) Mapa derecho

Figura 3.22 Mapas de fase envuelta para la barra 2 reverso

La perturbación presente en todos los mapas de fase envuelta mostrados, corresponden al estímulo de $5\mu\text{m}$, y es en el capítulo siguiente, que se muestran los resultados obtenidos tanto con la barra 1 como con la barra 2 en holografía digital.



Capítulo IV

Capítulo IV

Es en este capítulo que se mostrarán los resultados obtenidos por medio de la holografía digital en las dos barras, y con ayuda de un programa desarrollado en matlab, se llevará a cabo la combinación de los mapas de fase desenvuelta para observar las deformaciones producidas en el objeto ante la presencia del estímulo. Estas deformaciones se pueden observar en los tres ejes y con combinaciones de éstos, que nos dan mapas de esfuerzos presentes en los cuerpos analizados.

4.1 Resultados con la barra 1

De la barra 1, se tiene que en la sección central se puede presentar un mapa tangencial con datos de la deformación en x e y, tal y como se muestra en la figura 4.1a. Para realizar una comparación cualitativa con la parte plana de la barra y observar como varía el comportamiento tangencial con respecto a la sección central, se muestra en la figura 4.1b el de la sección plana.

De las figuras 4.1a y 4.1b se puede observar rápidamente, una gran diferencia en el patrón de sensibilidad (orientación de las flechas), ya que en la parte central de la barra alrededor de la zona en que está ubicado el daño, se observa un vórtice o deflexión de las flechas destacándolo (este daño se observa en la figura 3.5 recuadro central). Este comportamiento no ocurre en la sección plana de la barra, en donde todas las flechas están orientadas a un mismo sentido dada su planicidad y rigidez, que el sentido de las flechas no debe ser forzosamente el mismo dado que la posición de iluminación cambió de uno a otro. Ahora bien, esta diferencia en el comportamiento de las dos secciones de la barra 1 debe reflejarse también en las deformaciones por eje, así que en la figura 4.2 se muestra la deformación en x para la sección central (4.2a) y la sección plana (4.02b), En donde se observa que la deformación en x que presenta la sección plana es suave y nos sugiere la presencia de una superficie lisa sin daños.

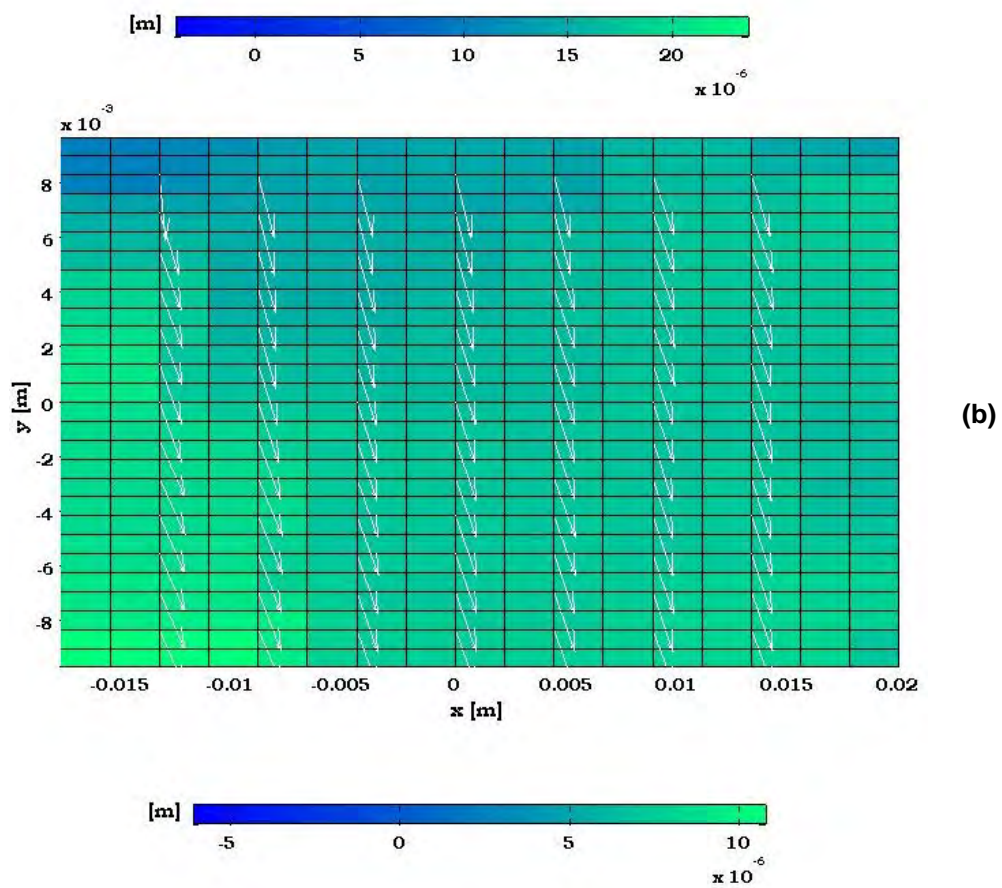
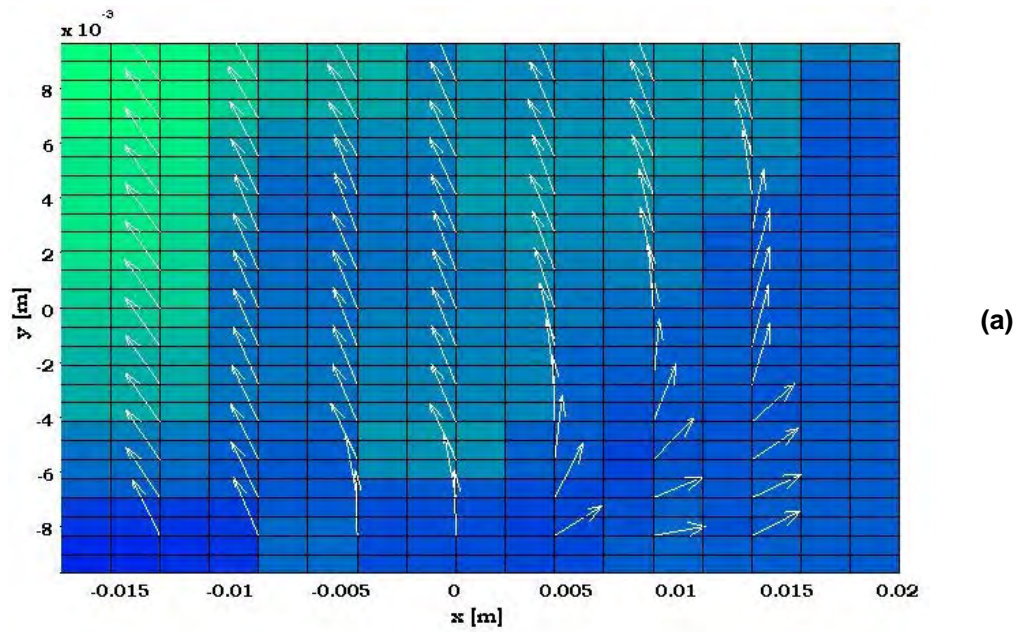
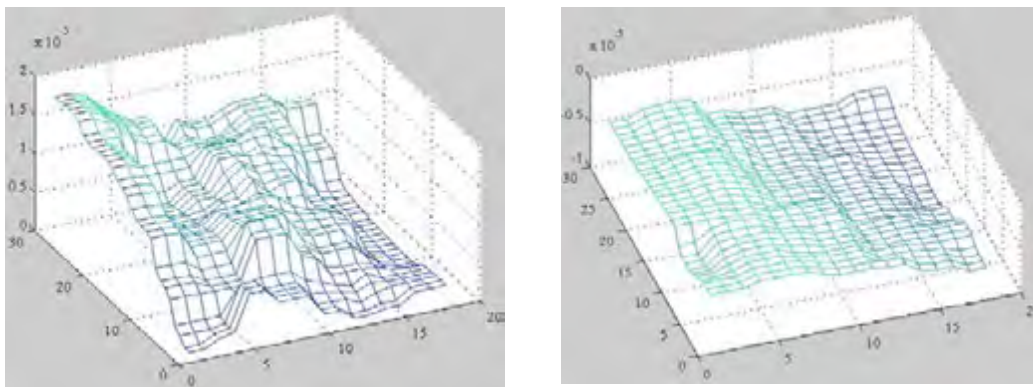


Figura 4.1 Mapas tangenciales de la barra 1 a)sección central b)sección plana



a) Sección central

b) Sección plana

Figura 4.2 Deformaciones en x para la barra 1

El comportamiento de la barra 1 mostrado en la figura 4.2 es hasta cierto punto de esperarse, ya que es tal su rigidez, que en la sección plana se puede apreciar un desplazamiento de toda la superficie como una sola unidad, y el ángulo mostrado corresponde al desplazamiento de $5\mu\text{m}$.

Considerando la observación hecha en el objeto, y tomando las relaciones a las que se llegó en el capítulo dos para un esfuerzo normal (ecuaciones 2.42 a la 2.45). De estas relaciones se puede ver que la contribución en un sentido puede ser sustituida por las deformaciones obtenidas en los ejes, y es así como se puede crear un mapa de relación de esfuerzos perpendicular al sentido en que se aplicó el esfuerzo, así que se desarrolla un programa que lleve a cabo esta operación de relacionar las deformaciones.

En la figura 4.3 se presentan los mapas de relación de esfuerzos para la barra 1, comparando la sección central con la sección plana de la misma.

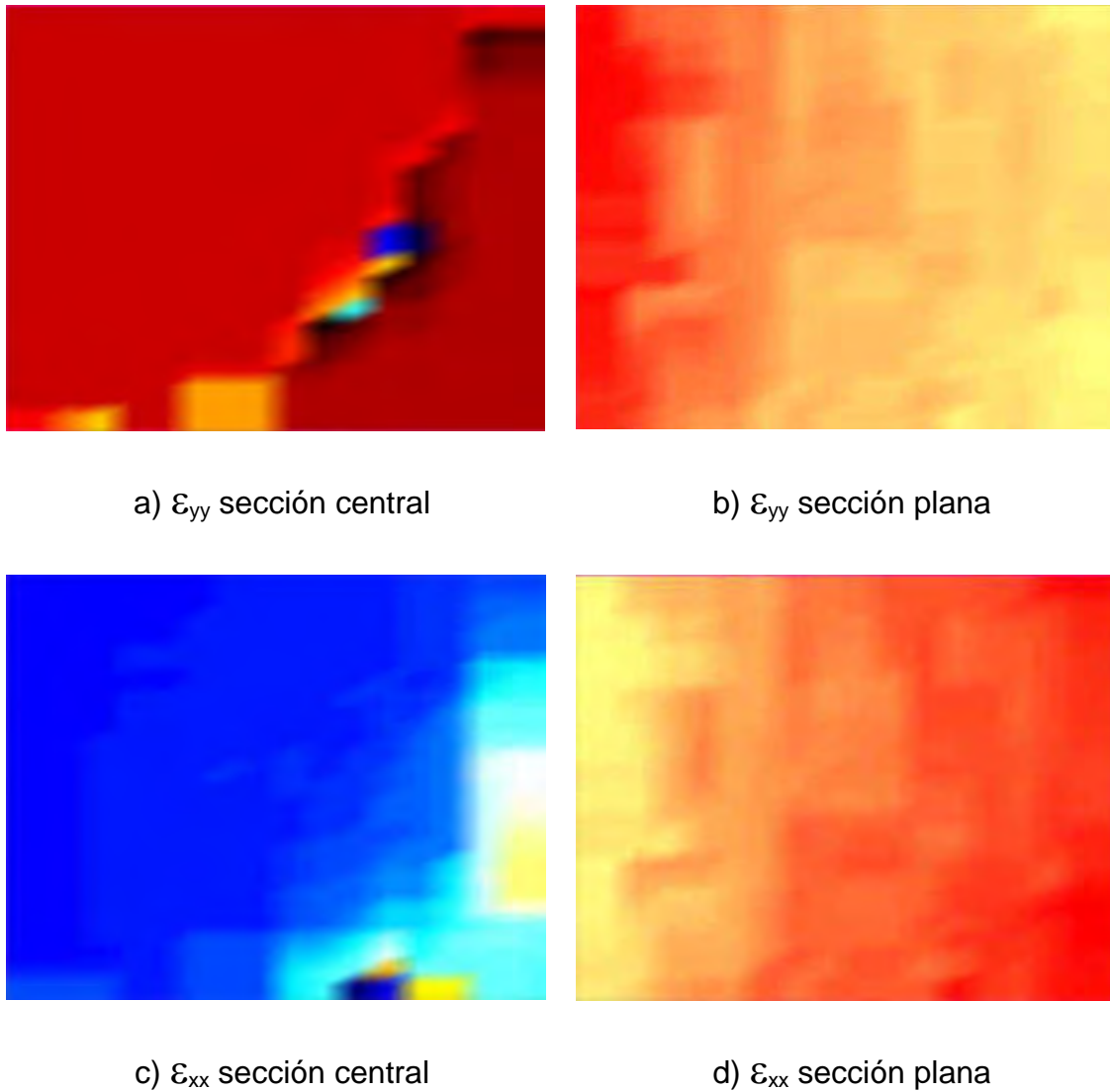


Figura 4.3 Esfuerzos normales en la barra 1

Es notoria la presencia de un esfuerzo en la parte central de la barra 1 (4.3a y 4.3c), pues esta pieza anteriormente se había partido por la mitad pero fue soldada de tal forma que a simple vista no era posible determinar la trayectoria de la soldadura aplicada, y con Espi no fue posible observarla tampoco. Entonces queda probado que la holografía digital es sumamente sensible en un arreglo de tres fuentes de iluminación para observar pequeños esfuerzos presentes alrededor de éstas imperfecciones.

4.2 Resultados con la barra 2

Una vez que se comprueban los resultados obtenidos con la barra 1, se procesa la información de la barra 2 en el anverso, obteniendo su mapa tangencial como se muestra en la figura 4.4

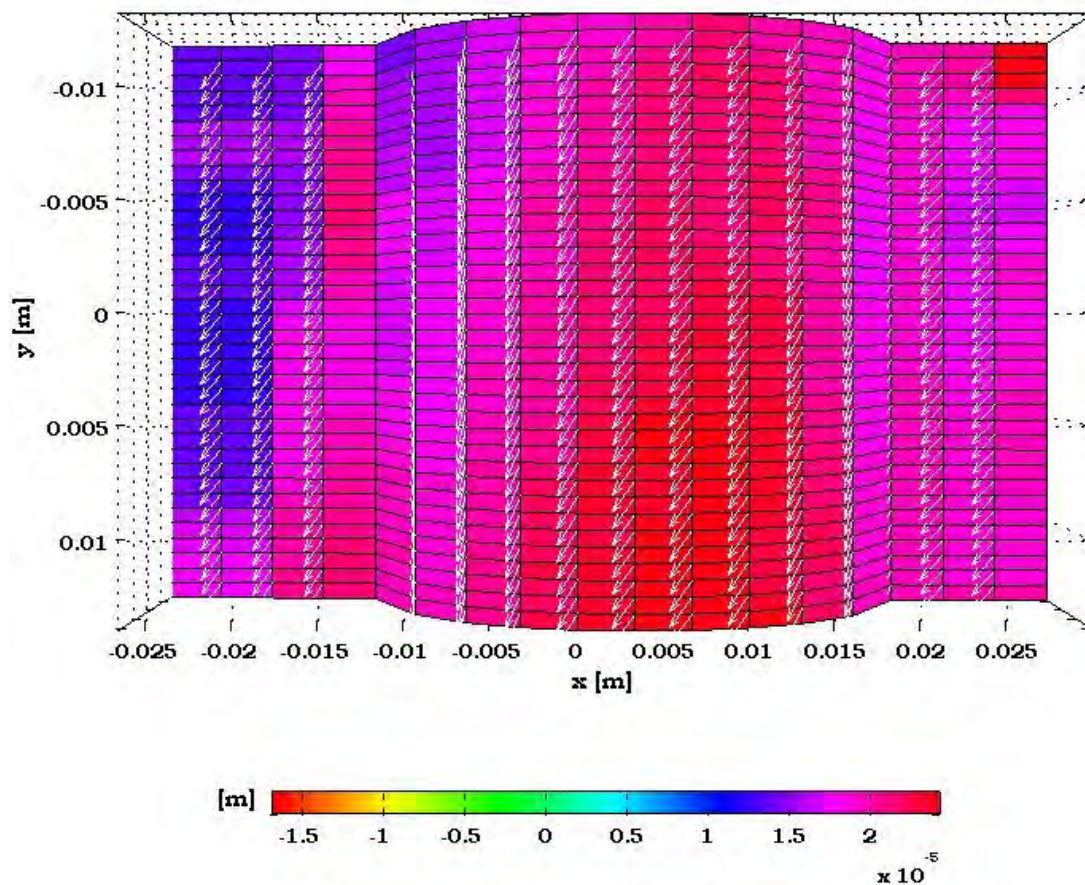


Figura 4.4 Mapa tangencial del anverso de la barra 2

De la figura 4.4, destaca la rigidez de la barra, más sin embargo se aprecian diferencias entre las secciones planas y la sección curva. Para resaltar esto, en la figura 4.5 se muestra la deformación en y que muestra el patrón de curvado en la pieza, el cual fue simulado en computadora para que el perfil de la pieza encajara correctamente con este contorno.

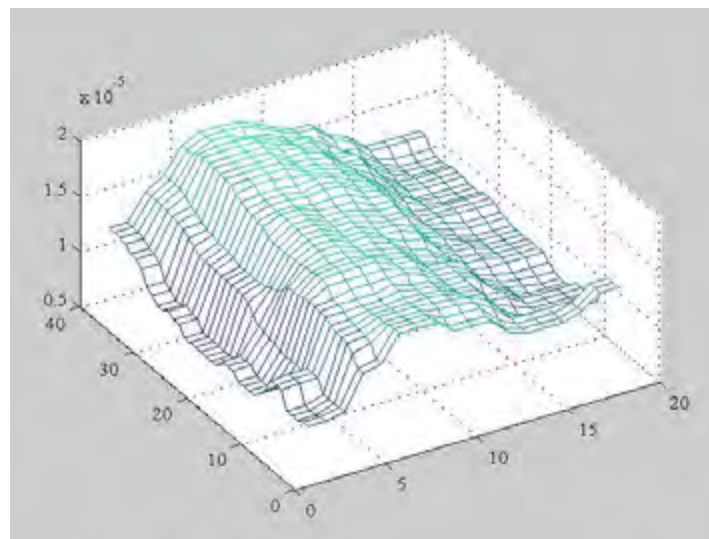


Figura 4.5 Deformación en y del anverso de la barra 2

Con la información de las deformaciones en los ejes, se calculan los esfuerzos normales en x e y como se ve en la figura 4.6.



a) ϵ_{xx} anverso



b) ϵ_{yy} anverso

Figura 4.6 Esfuerzos normales en el anverso de la barra 2

En la figura 4.6 se puede observar la diferencia de patrones de esfuerzos presentes en la barra 2, cuando en una superficie se agrega un cuerpo con soldadura como es el caso. Las secciones planas de la barra 2 presentan un comportamiento similar a diferencia de la sección cilíndrica.

Para comprobar la diferencia entre las superficies planas y las irregulares, se analizó el reverso de la barra 2, de donde se obtuvo su mapa tangencial que es mostrado en la figura 4.7.

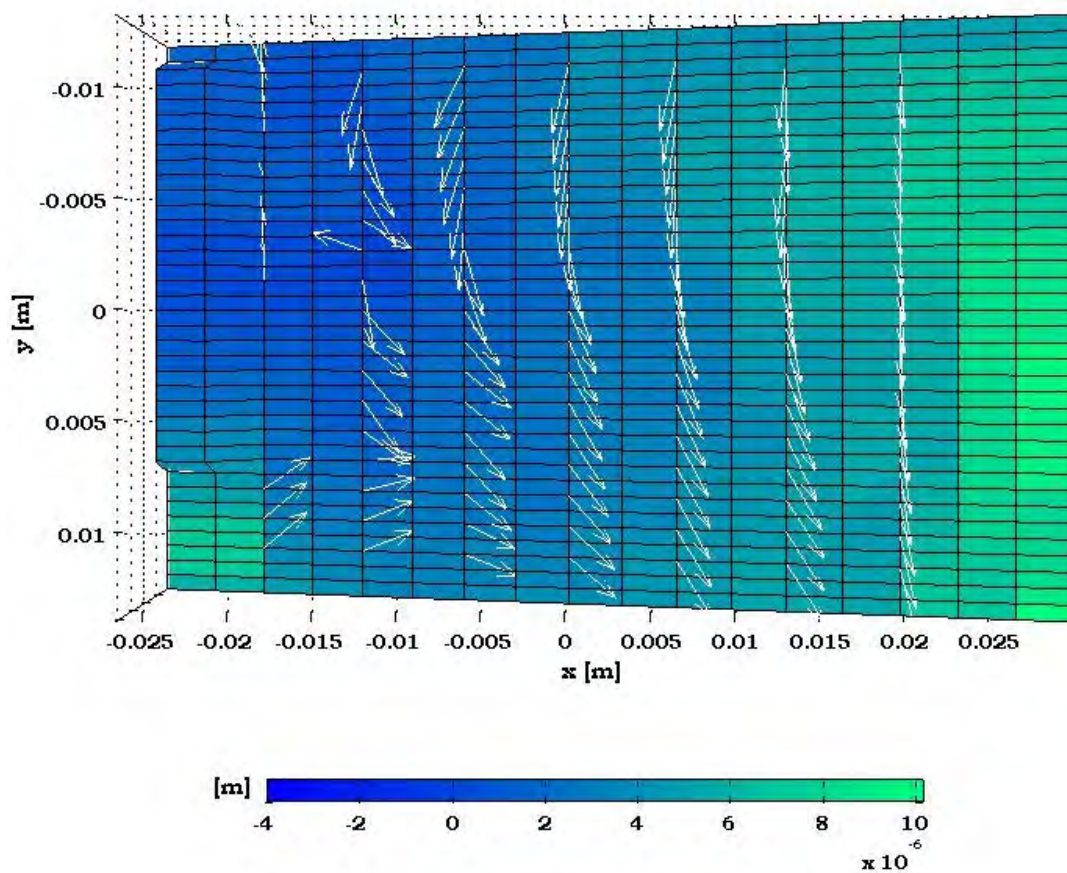


Figura 4.7 Mapa tangencial del reverso de la barra 2

Debido a que en esta sección de la barra se presenta un aglomerado de soldadura robusto, se hace patente la influencia que este ejerce en la superficie plana, produciendo desviaciones en la sensibilidad del área de intersección de estos dos planos.

Como se mencionó en el capítulo tres, ésta barra posee oxidación, sobre todo en su reverso, éste óxido provocó una serie de películas sobrepuestas una encima de la otra, dando un acabado semi escalonado en la parte plana de ella, por esto, en los mapas de esfuerzo normal de la figura 4.8, se puede apreciar este escalonamiento además de los esfuerzos ejercidos por la soldadura aglomerada.

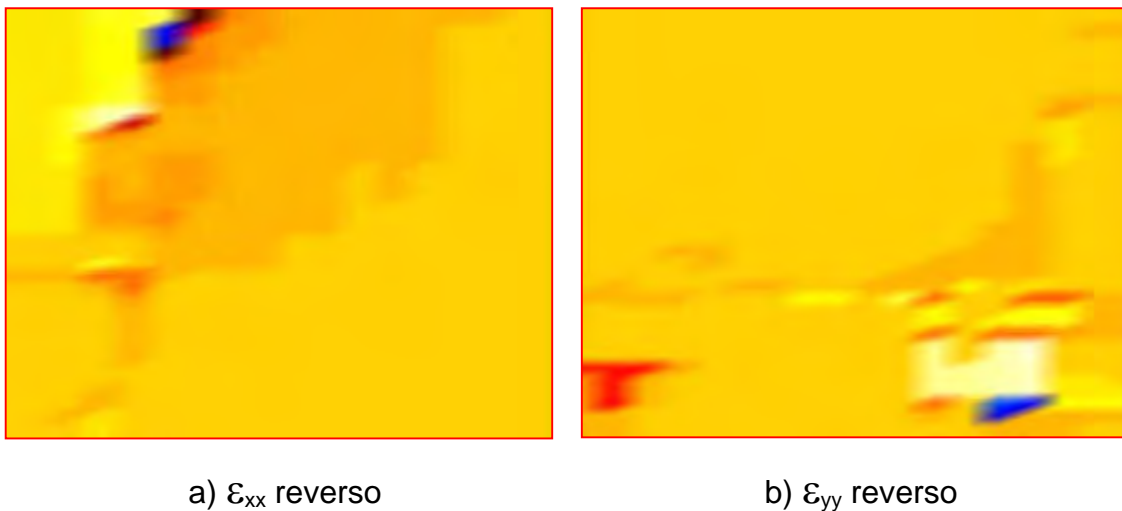


Figura 4.8 Esfuerzos normales en el reverso de la barra 2

El esfuerzo normal a x (4.8a) muestra los rastros de las capas y por ende los esfuerzos que existen en las uniones ocasionados por los bordes de las capas. Es así como al igual que con la barra 1, se observan patrones distintivos en la barra 2, que nos dan idea de los esfuerzos presentes en ella.



Capítulo V

Capítulo V

5.1 Conclusiones generales

Es en este punto, cuando ya se han llevado a cabo las pruebas propuestas a las piezas, que se puede tener un panorama más claro de lo que aquí se realizó. Este proceso fue paulatino, así como la recolección de datos que provenían de las piezas. Aquí se presentaron los resultados más significativos por cada sección, pero queda detrás un fondo más amplio de pruebas no expuestas aquí, que hacían la función estadística requerida para pruebas de laboratorio.

Y es con todo esto que se puede asegurar que los esfuerzos en un cuerpo pueden desentrañarse por más de un camino según el tipo de objeto que se interroga, pues si recordamos, fue con Espi que se obtuvo un patrón de deformación para la barra2, pero es con la holografía digital desde tres puntos de iluminación que se hizo patente el esfuerzo en la parte central de la barra 1.

Con esto, se trata de establecer lo que se aseguró en la introducción, un objeto da información de sí, de acuerdo al tipo de interrogación que se le aplique. Bajo esta primicia, tenemos que es posible encontrar esfuerzos en un objeto de forma cualitativa y cuantitativa con las técnicas que aquí se usaron.

Finalmente, se puede concluir que la holografía digital con tres fuentes de iluminación resulta una herramienta mucho muy sensible a pequeñas variaciones que se ejerzan en el objeto bajo estudio, con la nobleza de que la información recabada se puede manipular de tal suerte que se puedan realizar análisis más elaborados, cuando se trabaja con las componentes de deformación en forma aislada o en combinación con alguna otra.

5.2 Trabajo a futuro

Pensando un poco más allá, en un trabajo a futuro, sería el llevar a cabo la tarea de encontrar información cuantitativa del estado de las piezas u objetos que se interrogan, pues se tiene la ventaja que la información queda almacenada y los hologramas se pueden emplear para futuras mediciones que nos generaría un historial completo del deterioro al que se ven sometidas las piezas en condiciones de trabajo.

Con un historial de este tipo, se tendrá la posibilidad de reconocer a tiempo las piezas metálicas que deben ser reemplazadas en determinado momento, para evitar así costosas reparaciones que pudieran desencadenarse si las piezas se dañan en pleno uso industrial.

Apéndice A

Apéndice A

Pruebas de la perturbación a ejercer en los objetos

Para verificar que el estímulo aplicado a las piezas sea el correcto, se prueban distintos desplazamientos que como se menciona en la sección 2 del capítulo 3, deben ser capaces de producir franjas de interferencia, pero a la vez deben ser capaces de restaurar el estado original de la barra 1 o la barra 2 según sea el caso. Para ello se realizaron pruebas a diferentes desplazamientos que se indican en la tabla A.1a.

Tabla A.1a Estímulos a probar y resultado para la barra 1 (incompleta)

Desplazamiento (μm)	Franjas	Restauración
50	?	?
40	?	?
30	?	?
20	?	?
15	?	?
10	?	?
5	?	?

Para completar la tabla A.1 se siguió el siguiente proceso por cada estímulo propuesto en ella.

1).- Primeramente, se escoge una posición de iluminación cualquiera sobre la superficie de la esfera imaginaria que se propuso en la sección 2 del capítulo 3, cuidando que la iluminación sobre el objeto sea la máxima.

2).- Enseguida, se fija el tornillo micrométrico a la pieza metálica y se deja estabilizar. Se captura esa primera imagen con un nombre de archivo de posición cero (base).

3).- A continuación se le aplica a la pieza el desplazamiento, se graba esa imagen como archivo de posición uno (perturbado).

4).- Se retira el desplazamiento ejercido y la pieza regresa a la posición original en que estaba anteriormente, y a este archivo se le nombra posición dos (base restituida).

5).- Una vez que se tienen las tres imágenes para un desplazamiento, éstas se convierten a archivo de tipo TIFF, que una vez convertidas a este formato, se trabaja en pares con ellas.

6).- Se emplea un programa desarrollado en matlab, en que se calculan las transformadas de Fourier de las dos imágenes (posición cero y posición uno), después de filtrar el espectro centrado que muestra la apertura con el término central de la convolución como se ve en la figura A.1 (Se ve con giro pues la apertura esta girada).

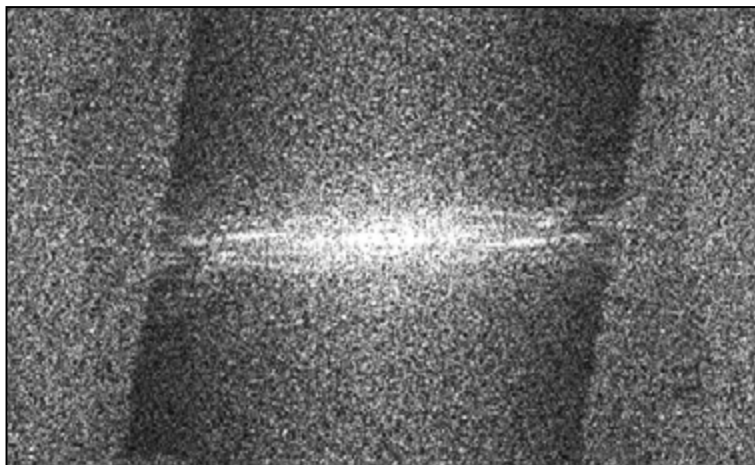


Figura A.1 Transformada de Fourier (para 5µm)

7).- Después de filtrar la transformada de Fourier (figura A.1), se aplica la transformada inversa de Fourier para obtener la amplitud compleja de la onda de campo del objeto en el plano holograma digital, para enseguida realizar la

resta de estos hologramas digitales, obteniendo el patrón de franjas como se ve en la figura A.2.

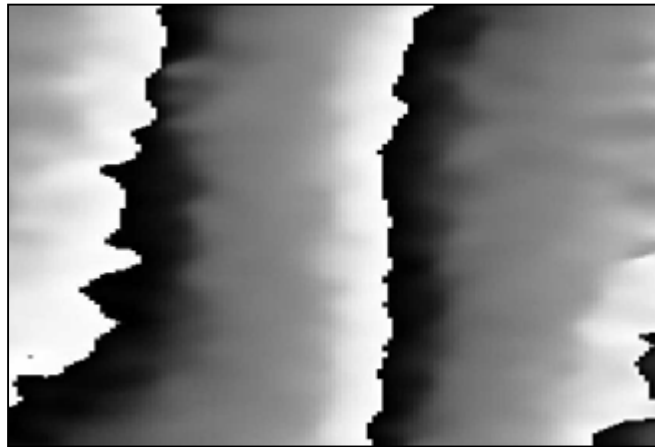


Figura A.2 Patrón de franjas entre posición 0 y posición 1 (para $5\mu\text{m}$)

8).- Ahora bien, se repiten los pasos 2 al 7 pero esta vez con las posiciones cero y posición dos, ya que un desplazamiento efectivo nos dará franjas entre posición uno y posición cero, así mismo entre posición uno y posición dos. Pero no debe aparecer ni el más mínimo rastro de franjas entre posición cero y posición dos, pues de ser así, el desplazamiento es excesivo y no restaura la pieza a su estado original. Después de realizar la resta se obtiene el patrón de franjas de la figura A.3.



Figura A.3 Patrón de franjas entre posición 0 y posición 2 (para $5\mu\text{m}$)

Así se repite el proceso hasta completar la información de la tabla A.1a que finalmente queda:

Tabla A.1b Estímulos a probar y resultado para la barra 1 (completa)

Desplazamiento (μm)	Franjas	Restauración
50	x	x
40	x	x
30	✓	x
20	✓	x
15	✓	x
10	✓	x
5	✓	✓

De la tabla A.1b, destaca el desplazamiento de $5\mu\text{m}$ (cuyo comportamiento se muestra en las figuras A.1-A.3) y el cual es el único estímulo que cumplió con las restricciones propuestas para llevar a cabo la holografía digital.