



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

***Detección de Forma y Deformaciones
Por ESPI***

Presenta:

Ing. Daniel Donato Aguayo

Como requisito para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias (Óptica)

Asesores:

Dra. Amalia Martínez García

Dr. Ramón Rodríguez Vera

León, Guanajuato, México, Agosto 2004

RESUMEN de la tesis de Daniel Donato Aguayo, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS (ÓPTICA). León, Guanajuato, México, Agosto de 2004.

Detección de forma y deformaciones por ESPI

Resumen Aprobado

Dra. Amalia Martínez García

Dr. Ramón Rodríguez Vera

Se hace el estudio teórico y experimental de las técnicas ESPI para detección de forma y deformaciones usando luz colimada. Se presentan los resultados experimentales para la obtención del espesor de una gasket, a partir del uso de la técnica de ESPI utilizando iluminación dual. Al aplicar la técnica, se introduce un ángulo de rotación muy pequeño en el objeto. Usando un interferómetro con sensibilidad en fuera de plano se analizan las deformaciones del objeto al ser sometido a un esfuerzo. Aquí se utiliza la teoría de análisis del vector de sensibilidad, resultado de publicaciones recientes. Así mismo se presenta un análisis cualitativo de los modos de vibración del objeto, los cuales se comparan contra otros materiales de menor y/o mayor rigidez.

I recommend getting your heart trampled on to anyone
I recommend walking around naked in your living room
Swallow it down (what a jagged little pill), It feels so good (swimming in your stomach)

Wait until the dust settles
You live you learn, You love you learn
You cry you learn, You lose you learn
You bleed you learn, You scream you learn

I recommend biting off more then you can chew to anyone...I certainly do
I recommend sticking your foot in your mouth at any time...Feel free
Throw it down (the caution blocks you from the wind), Hold it up (to the rays)

You wait and see when the smoke clears
You live you learn, You love you learn
You cry you learn, You lose you learn
You bleed you learn, You scream you learn

Wear it out (the way a three-year-old would do),
Melt it down (you're gonna have to eventually anyway)

The fire trucks are coming up around the bend
You live you learn, You love you learn
You cry you learn, You lose you learn
You bleed you learn, You scream you learn
You grieve you learn, You choke you learn
You laugh you learn, You choose you learn
You pray you learn, You ask you learn

At least you'll live and in the worst case I LEARN

ALANIS MORISSETTE

Dedicatorias

A mi madre Ma. Concepción Aguayo, por todo su amor cariño, comprensión, y paciencia infinita ante mis histerias de hijo.

A mi papa Pedro Donato por el apoyo durante todo este tiempo.

A mis Hermanos: Angélica, Pedro, Cristina y Sandra.

A mis niñas, Cynthia, Jessica, Mónica y Claudia.

A Claudio por ser un gran amigo y compañero durante todo este tiempo, a Ale Vargas por su amistad.

A todos y cada uno de ellos dedico todo el trabajo y la alegría por lograr un objetivo mas en mi carrera profesional y una satisfacción mas en mi vida personal.

Agradecimientos

A mi asesor de tesis, Dr. Ramón Rodríguez Vera por todo el apoyo y amistad que me ha demostrado desde mi llegada al CIO, hace casi tres años.

A la Dra. Amalia Martínez por su valiosa contribución como asesora de este trabajo de tesis, y por todo el apoyo que recibí de su parte durante los cursos regulares.

Al Ing. Juan A. Rayas por todo el apoyo invaluable durante el trabajo de laboratorio de este trabajo de tesis.

Al Dr. Bernardino Barrientos y Dr. J. Ascensión Guerrero por aceptar ser parte del comité de evaluación para la obtención de grado.

A todos mis maestros durante este tiempo en que tome mis cursos de maestría, especialmente al Dr. Gonzalo Páez por todas las enseñanzas durante este tiempo; así mismo al Dr. Daniel Malacara Hernández y al Dr. Moisés Cywiak.

A todo el personal del CIO que tuvo algo que ver en el desarrollo de este trabajo de tesis.

A mis compañeros de maestría Mauricio Flores, J. Luis Cabellos, Haggeo Desirena y Cornelio Alvarez, por todos los ratos agradables y los no tan agradables, así como todas las veces que me tuvieron que llevar al hospital por que me amole el tobillo.

Al CONACYT por su apoyo económico bajo la beca de Maestría.

Un agradecimiento muy especial para Laura González Ochoa por su apreciable amistad, y la paciencia que tuvo para escucharme cada vez que lo necesite, y siempre estuvo ahí para darme el apoyo cuando realmente lo necesite.

A todo el personal de la dirección de formación académica, Lic. Guillermina Muñiz, Dr. Manuel Servín por todo el apoyo durante la maestría, así como de biblioteca, Ángeles y Marissa.

A luli por ser una amiga y soportarme cuando ni yo mismo lo hacía. A mis compañeros de universidad que aunque ya no los veo tan seguido siguen estando presentes en particular Ale Mina, Rubén García, Octavio Villa, Antonio, Adin Canales, Diana Torrero, Chucho Cruz y todo aquel que se me olvide.

Y a todos aquellos que nunca han creído en mí, ni en mis palabras también se los agradezco porque gracias a sus críticas, he sabido superarme y demostrarme a mí mismo que soy capaz de lograr lo que para muchos parece imposible, a todos ellos gracias.

Y esto no es más que otro peldaño en una escalera interminable, lo que solamente da término a una etapa en este juego llamado vida, pero marca el inicio de un ciclo más en esta ruleta, así no hay porque correr por que aun soy un Creyente Verdadero(True Believer).

Índice

Introducción general	1
Objetivo.....	1
Referencias.....	6
Capítulo 1. Interferometría de moteado (ESPI)	
1.1. Introducción.....	8
1.2. Patrón de moteado.....	8
1.2.1. Tamaño del speckle.....	10
1.2.2. Patrón de speckle objetivo.....	10
1.2.3. Patrón de speckle subjetivo.....	11
1.3. Patrón de speckle y su desplazamiento superficial.....	13
1.3.1. Desplazamiento lineal en plano.....	14
1.3.2. Desplazamiento fuera de plano.....	15
1.4. Obtención del patrón de interferencia.....	16
1.5. Vector de sensibilidad para sistemas en plano.....	21
1.6. Vector de sensibilidad para sistemas fuera plano.....	23
1.7. Conclusiones.....	25
1.8. Referencias.....	27
Capítulo 2. Sistema ESPI en plano para contorneo	
2.1. Introducción.....	30
2.2. Obtención de la expresión para topografía usando un sistema con iluminación dual colimada.....	30
2.3. Conclusiones.....	34
2.4. Referencias.....	34

Capítulo 3. Detección de la fase óptica	
3.1. Introducción.....	35
3.2. Desplazamiento de fase (phase stepping).....	35
3.3. Desenvolvimiento de fase.....	43
3.3.1. Desenvolvimiento de mapas de fase consistentes.....	43
3.3.2. Desenvolvimiento de mapas de fase en una región conectada.....	44
3.3.3. Desenvolvimiento de mapas de fase con ruido.....	44
3.3.4. Desenvolvimiento de mapas de fase por phase tracking regularizado.....	45
3.4. Conclusiones.....	49
3.5. Referencias.....	50
Capítulo 4. Implementación de un interferómetro ESPI para topografía y detección de desplazamiento en una membrana gasket	
4.1. Introducción.....	53
4.2. Detección de forma.....	53
4.3. Detección de deformaciones.....	56
4.4. Análisis cualitativo de vibración.....	64
4.5. Discusión y análisis de los resultados experimentales.....	70
4.6. Conclusiones.....	72
4.7. Referencias.....	74
Capítulo 5. Conclusiones generales y trabajo futuro	
5.1. Conclusiones generales.....	75
5.2. Trabajo futuro.....	76
Apéndice A	
A.1. Hoja de datos técnicos del piezoeléctrico PE4 de Thorlabs®	78

Apéndice B. Trabajos derivados del proyecto de tesis

B.1. Participación en congresos.....79

Capítulo C. Microscopía estereo

C.1. Introducción.....81

C.2. El microscopio óptico.....81

C.3. El microscopio estereo.....84

C.4. Conclusiones.....87

C.5. Referencias.....89

LISTA DE PIE DE FIGURAS:

RESUMEN

Figura A. Esquema una celda de carga (DAC).

Figura B. Fotografía de la gasket bajo estudio.

CAPÍTULO 1

Figura 1.1. Formación patrón de moteado o speckle.

Figura 1.2. Formación del patrón de speckle objetivo.

Figura 1.3. Formación del patrón de speckle subjetivo.

Figura 1.4. Desplazamiento en plano con un (a) patrón de speckle objetivo y (b) patrón speckle subjetivo.

Figura 1.5. Desplazamiento fuera de plano(a) patrón de speckle objetivo y (b) patrón de speckle subjetivo.

Figura 1.6. Arreglo experimental para ESPI.

Figura 1.7 Vector de sensibilidad para iluminación dual.

Figura 1.8 Vector de sensibilidad para un haz de iluminación.

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 Diagrama de un interferómetro con iluminación dual colimada.

Figura 2.2. Diagrama para determinar la topografía de un objeto.

CAPÍTULO 3

Figura 3.1. Interferogramas para detección de forma con un desplazamiento en fase de (a) 0 , (b) $\pi/2$, (c) π , (d) $3\pi/2$

Figura 3.2 (a) Mapa de fase envuelta para tres pasos (b) Mapa de fase envuelta para cuatro pasos desplazados en $\pi/2$, (c) Mapa de fase envuelta para 21 pasos usando el algoritmo (N+1) [Surrel(1996)], con un desplazamiento de $2\pi/21$.

Figura 3.3. Interferogramas para detección de deformaciones con un desplazamiento en fase de (a) 0 , (b) $\pi/2$, (c) π , (d) $3\pi/2$

Figura 3.4. Mapa de fase envuelta del desplazamiento inducido por carga estática de (a) 5 Volts(0.5 μm), (b) 10 Volts(1 μm), (c) 15 Volts(1.5 μm), (d) 20 Volts (2 μm).

Figura 3.5. Fase desenvuelta de la forma de la gasket a partir de un mapa de fase de (a) cuatro pasos y (b) veintiún pasos.

Figura 3.6. Mapa de fase desenvuelta de la deformación de la gasket de un mapa de fase de cuatro pasos, (a) 5 Volts(0.5 μm), (b) 10 Volts(1 μm), (c) 15 Volts(1.5 μm), (d) 20 Volts (2 μm).

CAPÍTULO 4

Figura 4.1. Interferómetro con iluminación dual implementado para la técnica de contorneo.

Figura 4.2. Forma recuperada de la gasket por ESPI, usando un interferómetro con iluminación dual.

Figura 4.3. Interferómetro con un haz de iluminación implementado para detección de deformaciones.

Figura 4.4. Componentes del vector de sensibilidad para un interferómetro tipo Michelson (a) $e_x(x,y)$, (b) $e_y(x,y)$ y (c) $e_z(x,y)$.

Figura 4.5. Desplazamiento en el eje Z con respecto a la gasket, al aplicar carga estática por medio del PZT, al aplicar un voltaje de (a) 5 Volts y (b) 10 Volts.

Figura 4.6. Desplazamiento en el eje Z con respecto a la gasket, al aplicar carga estática por medio del PZT, al aplicar un voltaje de (a) 15 Volts y (b) 20 Volts.

Figura 4.7. Curva de desplazamiento contra voltaje aplicado por el PZT sobre la gasket.

Figura 4.8. Arreglo experimental para detección de modos de vibración del objeto en estudio.

Figura 4.9. Comportamiento de la gasket sometida a frecuencias de audio, para la detección de modos de vibración.

Figura 4.10. Modos de vibración obtenidos para una membrana de látex sometida a frecuencias de resonancia de (a)440 Hz ,(b) 612Hz,(c)675 Hz, (d)711 Hz, (e) 850 Hz, (f) 1.05 kHz.

Figura 4.11. Modos de vibración obtenidos para una membrana de aluminio sometida a frecuencias de resonancia de (a) 290 Hz, (b) 480 Hz ,(c)2.85 kHz, (d) 3.9 kHz, (e) 4 kHz, (f) 5.4 kHz.

Figura 4.12. Modos de vibración obtenidos para una membrana de plástico rígido sometida a frecuencias de resonancia de (a) 125 Hz,(b) 240 Hz.

APÉNDICE C

Figura C.1. Diagrama esquemático de un microscopio compuesto.

Figura C.2. Arreglo de lentes de un microscopio.

Figura C.3. Microscopio estereo Stemi 2000-C de la compañía Zeiss.

Figura C.4. Sistema óptico microscopio Stemi 2000-C.

LISTA DE TABLAS:

APÉNDICE C

Tabla C.1. Componentes del microscopio Stemi 2000-C de Zeiss

Tabla C.2. Características de los oculares y campos de objeto del Stemi 2000C[Carl Zeiss(1998)].

Introducción general

El objetivo principal de este trabajo es estudiar el comportamiento de una membrana metálica que forma parte de un empaquetamiento conocido comercialmente como “gasket”. Esta membrana es usada en una celda de carga, la gasket es una parte esencial de la celda de carga de diamante, DAC de sus siglas en inglés Diamond Anvil Cell. La DAC es una prensa mecánica constituida por dos piezas de diamante con una cara plana unidas para crear una gran presurización en la muestra bajo estudio, la cual es sostenida por las membranas metálicas o gasket. Es usada en simulaciones de pruebas nucleares, ya que usa pequeñas muestras, provee de precisión, confiabilidad en la información sobre las pruebas del comportamiento físico y químico de los materiales presiones muy altas (del orden de MPa).

Mencionada ya la importancia de esta membrana, que denominaremos simplemente como gasket, procederemos a describir el proceso que se llevara a cabo para su estudio. Este elemento será sometido a esfuerzos inducirán deformación en el mismo, las cuales serán estudiadas al implementar un sistema ESPI fuera de plano. También se hará un estudio de sus modos de vibración. Así mismo se obtiene la topografía del elemento bajo estudio mediante la técnica de ESPI. Lo anterior como un estudio previo para introducir las condiciones de esfuerzo reales que sufre la gasket.

De manera general cabe mencionar que el material de la gasket no es tan crucial como el diamante presente en la celda, éste puede ser de la forma y material que se ajuste mejor a las necesidades de presión y temperatura de cada material [Dunstan (1989)]. El material de esta gasket es acero inoxidable.

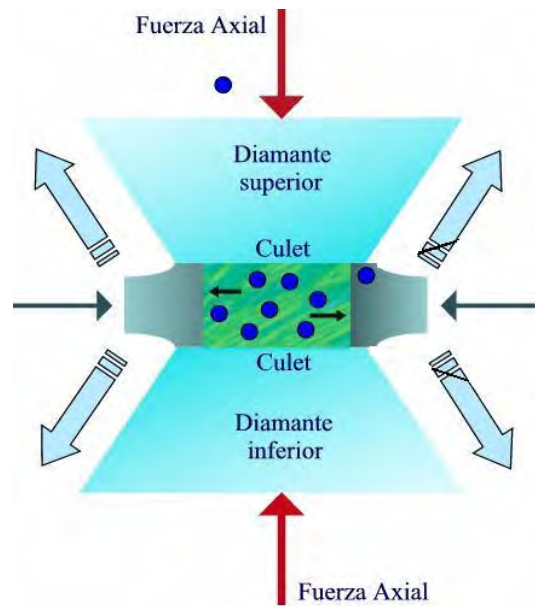


Figura A. Esquema de una celda de carga (DAC)

La figura A muestra una DAC, donde se observan sus componentes y la posición donde se localiza la gasket. Esta se encuentra en medio de las piezas de diamante, y este es sometido a presiones del orden de 350 GPa y aproximadamente a 6000 °C [Jagannadham (1996)].

Las dimensiones de la gasket tiene implicaciones en las mediciones que se realizan con una DAC, principalmente al considerar el grosor y el diámetro del agujero de la muestra, ya que sus dimensiones dependen de la hidrostática del fluido del medio. Lo anterior implica que si el gasket tiene un grosor pequeño (generalmente es de 0.5 mm), se produce un incremento mas rápido en la presión hidrostática.

La figura B muestra una fotografía de la gasket utilizada en este trabajo de tesis, de la cual se obtiene forma y deformación, aplicando una carga estática por medio de un piezoeléctrico, y un sistema de detección óptico con sensibilidad fuera de plano.



Figura B. Fotografía de la gasket bajo estudio.

Las aplicaciones que tiene la DAC, son muy variadas y lo que implica un costo elevado al usar dos piezas de diamante. Algunas aplicaciones de estas celdas de carga, son por ejemplo en experimentos de onda de choque, pruebas físicas de armas evitando las pruebas nucleares, así como mediciones de cambios de volumen y densidad en las estructuras cristalinas a altas presiones. Este tipo de celdas proveen mayor estabilidad y confiabilidad en las mediciones, así como en las predicciones del comportamiento de armas nucleares y con un mayor rango de seguridad, y evitando las pruebas destructivas a nivel masivo. Dado el interés del comportamiento de esta pieza mecánica en otras áreas de la ciencia, ya mencionadas, se desarrolla el trabajo que aquí se presenta, haciendo un revisión teórica de pruebas de interferometría, algoritmos de desenvolvimiento de fase para la evaluación de deformaciones y recuperación de forma.

El contenido de esta tesis es:

Capítulo 1: se desarrolla la teoría del fenómeno de moteado, así como los tipos de moteado que se producen (subjetivo y objetivo). Se explica la técnica de interferometría electrónica de patrón de moteado (ESPI), y su uso en la medición de deformaciones en plano (in-plane) y fuera de plano (out-of-plane).

Para calcular dichas deformaciones y cuantificarlas en unidades físicas se presenta la teoría que sustenta el cálculo de desplazamiento en plano y fuera de plano; lo anterior es posible al calcular el vector de sensibilidad [Kreis (1996), Martínez, et al (2004)] que depende de la geometría del sistema interferométrico. Dicho vector se relaciona con la fase óptica, la cual es producto del procesamiento de la información obtenida en forma experimental. De esta forma el vector desplazamiento puede ser cuantificado.

Capítulo 2: en esta parte del trabajo se sustenta la teoría de recuperación de forma o contorno (contouring) utilizando la técnica de ESPI [Kreis (1996), Sirohi (1999), Jones (1989)].

Capítulo 3: se presenta la forma en que es procesada digitalmente la magnitud de la fase óptica, la cual contiene información de la deformación aplicada a la gasket. Las técnicas y algoritmos computacionales usados se describen en este capítulo. Se presentan los algoritmos para la obtención de la fase envuelta (wrapped phase), todos estos sustentados en la técnica de desplazamiento en fase (phase stepping) [Malacara, et al (1998)]. De la misma manera se presentan las técnicas de desenvolvimiento de fase, y el método empleado para desenvolver la fase el objeto (unwrapping) [Servín, et al (1999)], usando el método de desenvolvimiento de fase regularizado

Capítulo 4: aquí se presentan los resultados experimentales de la topografía de la gasket [Joenathan, et al (1990)]. Para la obtención de relieve se utilizó un sistema de ESPI utilizando iluminación dual colimada. Utilizando un sistema de ESPI de un solo haz de iluminación, se estudia la deformación del objeto como consecuencia de la aplicación de una carga estática. La topografía del objeto es de suma importancia ya que a partir de la fase óptica, se pueden cuantificar las deformaciones que sufre el objeto en coordenadas reales. También se realiza un análisis cualitativo de los modos de vibración del material de la gasket con respecto a otros materiales. Como complemento de los resultados obtenidos, se hace una interpretación y discusión de los resultados y los alcances de los sistemas interferométricos implementados, para aplicaciones industriales y/o de investigación.

Capítulo 5: presenta un compendio de las conclusiones que se derivan de este trabajo experimental. También se incluye el trabajo futuro que se puede desprender de la realización de esta tesis.

En el **Apéndice A**, se muestra la hoja de datos técnicos para el piezoeléctrico PE4 de Thorlabs®.

En el **Apéndice B**, se presentan los trabajos generados de este trabajo de tesis y los congresos en los que fueron presentados.

Apéndice C: se describe la técnica de la microscopía estereoscópica y las ventajas que presenta con respecto a la microscopía convencional. Asimismo se sustenta la razón del porque se emplea un microscopio estereo, en reemplazo de una cámara CCD (Charge Couple Device), la cual a su vez está implementada en el microscopio utilizado en arreglo de ESPI.

Referencias

Dunstan, J.D., The Gasket, www.diacell.de, 1989.

Jagannadham, A., The Diamond Anvil Cell: probing the behaviour of metals under ultrahigh pressures, Science & Technology Review, pp.17-27, 1996.

Joenathan, C., Pfister, B & Tiziani, H.J., Contouring by electronic speckle pattern interferometry employing dual beam illumination, Appl. Opt., Vol. 29, No. 13, 1905-1911, 1990.

Jones. R. & Wykes, C., Holographic And Speckle Interferometry, Cambridge University Press, Great Britain, 1989.

Kreis, T., Holographic Interferometry: Principles and Methods, Akademie Verlag, Germany, 1996.

Malacara, D., Servín, M. Y Malacara; Z., Interferogram analysis for optical testing; Ed. Marcel Dekker, Inc. U. S. A., 1998.

Martínez, Amalia, Rayas, J.A., Rodríguez-Vera, R. & Puga, H.J., Three-dimensional deformation measurement from the combination of in-plane and out-of-plane electronic speckle pattern interferometers, Applied optics, 43, No.24, 2004.

Rodríguez Vera, R., Kerr, D. & Mendoza-Santoyo, F., Electronic speckle contouring, J. Opt. Soc. Am. A Vol. 9, No. 11, 2000-2008, 1992.

Servín, M., Cuevas, F. J., Malacara, D., Marroquín, J.L. & Rodríguez-Vera, R., Phase unwrapping through demodulation by use of the regularized phase-tracking technique, *Appl. Opt.*, Vol. 38, No. 10, pp. 1934-1941, 1999.

Sirohi, R.S. & Siong Chau, F., *Optical methods of measurements: wholefield techniques*, Ed. Marcel Dekker, Inc. U.S.A., 1999.

Capítulo 1**Interferometría de moteado (ESPI)****1.1. Introducción**

En metrología óptica existen técnicas basadas en la iluminación láser capaces de medir desplazamientos estáticos o dinámicos, así como la forma de objetos de superficies rugosas con sensibilidad del orden de la longitud de onda [Jones (1989)].

Cuando se observa una superficie iluminada por un haz láser, se puede observar una apariencia “granular” reflejada por la superficie del objeto. Esta apariencia granular, es el efecto del moteado (speckle), que ocurre cuando la superficie es ópticamente rugosa (como cualquier superficie real y ordinaria), en las cuales las variaciones en la altura de las rugosidades en la superficie son mayores o del orden de la longitud de onda del haz del láser de iluminación. Esto resulta en un patrón aleatorio de interferencia como resultado de las múltiples reflexiones que ocurren en la superficie rugosa. Este efecto juega un papel importante en la formación y generación del patrón de franjas producidas por cualquier superficie real, cuando ésta es observada en su condición inicial de deformación. Dependiendo del método empleado en el grabado y en la observación del patrón de franjas, los desplazamientos locales de la superficie o los gradientes de los desplazamientos pueden ser tan sensibles como en el plano de observación. El medio de registro requiere una alta resolución espacial, por lo que la interferencia que produce el patrón de moteado es una técnica mas flexible que la interferometría holográfica [Sirohi (1999)], en cuanto a métodos de grabado de información.

1.2 Patrón de moteado

El patrón de moteado es producto de la autointerferencia de numerosas ondas que presenta la superficie difusa en forma aleatoria, en un punto P en el espacio.

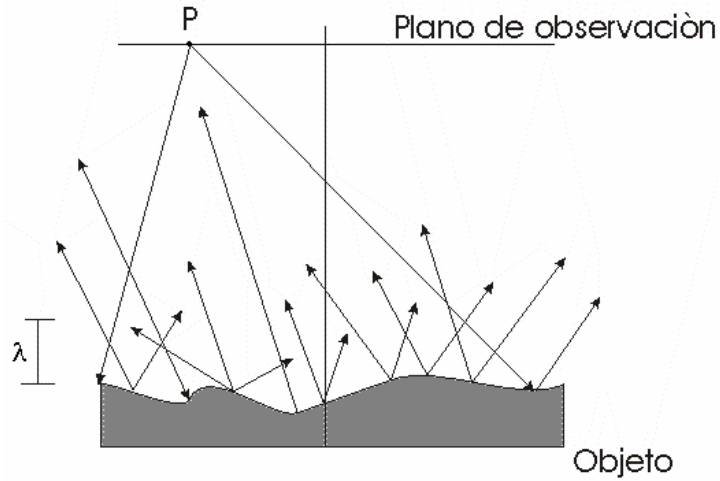


Figura 1.1. Formación patrón de moteado o speckle

En la figura 1.1 se muestra la formación de un patrón de moteado, en el cual las fases y amplitudes de las ondas esparcidas son aleatorias, por lo que éstas pueden ser representadas como variables estadísticas independientes, como se muestra en la ecuación (1.1), esto implica que sean también independientes de la amplitud y fase con respecto a las demás ondas (1.2), esta característica se presenta debido a la distribución aleatoria uniforme de las fases en un rango de $-\pi$ a π . La amplitud resultante compleja $u(x, y) = \mu(x, y)e^{i\phi}$ está dada por:

$$\mu(x, y)e^{i\phi} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N \mu_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N a_k e^{i\phi_k} \quad (1.1)$$

donde a_k y ϕ_k son la amplitud y la fase del k -ésimo esparcimiento. Cuando estas ondas son tratadas bajo postulados estadísticos gaussianos, la función de densidad probabilística $P(I)$ de la intensidad de una mota está dada por

$$P(I) = \frac{1}{\bar{I}} e^{-\left(\frac{I}{\bar{I}}\right)} \quad (1.2)$$

$$C = \frac{\sigma}{\bar{I}} \quad (1.3)$$

donde \bar{I} es la intensidad promedio de las motas [Sirohi (1999)]. La intensidad de mayor probabilidad tiene un valor igual a cero. Una medición del contraste que presenta el patrón de moteado se establece por la relación (1.3), donde σ es la desviación estándar de la intensidad de la mota.

1.2.1 Tamaño del speckle

El speckle o moteado no tiene una estructura definida, pero sí posee promedio, esto nos lleva a tomar un tamaño promedio para las motas presentes en la superficie del objeto [Gasvik (1987), Kreis (1996)]. Para determinar el tamaño de las motas se toma en cuenta el tipo de patrón de speckle que se forma, esto es speckle objetivo o subjetivo, que dependen del arreglo óptico que se implementa.

1.2.2 Patrón de speckle objetivo

Cuando la superficie de un objeto difuso se ilumina con un haz de luz coherente, se forma el speckle, que es producido por la propagación en el espacio de las ondas [Sirohi (1999), Jones (1989)], este tipo de moteado es conocido como patrón objetivo de speckle. En este patrón de moteado el tamaño de las motas es definido por:

$$\sigma_{ob} = \frac{\lambda z}{D} \quad (1.4)$$

donde D es el tamaño del área iluminada del objeto, z es la distancia que existe entre el objeto y el plano de observación y λ es la longitud de onda de la fuente coherente usada. El tamaño mínimo de un speckle es dependiente de la interferencia que se produce entre las ondas de los puntos extremos de esparcimiento, y éstos se incrementan en forma lineal con la separación entre el objeto y el plano de observación. La figura 1.2 muestra una configuración para la formación de un patrón de moteado objetivo.

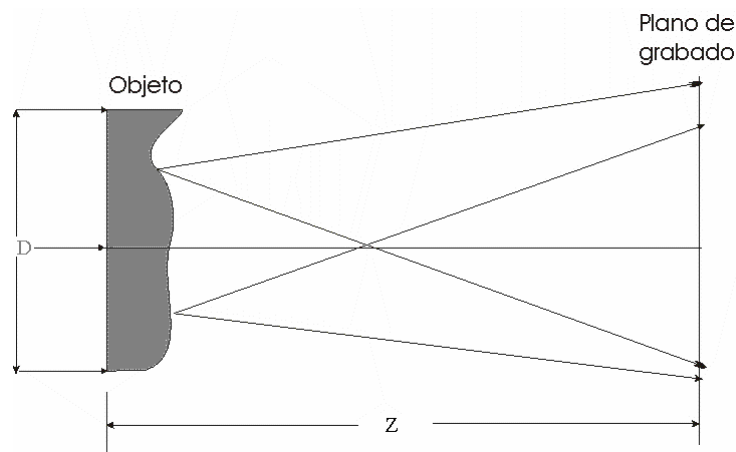


Figura 1.2. Formación del patrón de speckle objetivo

1.2.3. Patrón de speckle subjetivo

El speckle es una imagen que no se puede explicar en términos de óptica geométrica, la cual predice que un punto en el objeto es la imagen de un punto en la imagen [Gasvik (1987)]; esto es debido a que una lente ideal no forma la imagen punto a punto, sino una distribución de intensidades a lo largo de una imagen puntual geométrica debida a la difracción de la apertura de la lente.

En la sección anterior se presentó la descripción del speckle objetivo y el tamaño de mota que se produce en la superficie del objeto, para el patrón de speckle subjetivo se realizan unos cambios en el arreglo óptico. El speckle subjetivo tiene la característica de que se forma en el plano imagen de la lente [Gasvik (1987), Sirohi (1999)], y es producido por la interferencia de varios centros esparcidos en el área de resolución de la lente.

En la imagen del área de resolución citada, las funciones de respuesta al impulso desfasado en forma aleatoria son sumadas, lo cual produce el patrón de speckle. Lo anterior interviene en la definición de los factores que afectan el tamaño de la mota, el cual depende de la función de Airy [Goodman(1996)], y el diámetro del disco de Airy esta dado por la siguiente aproximación

$$\sigma_s = 2.4 \cdot \frac{\lambda b}{D} \quad (1.5)$$

donde D es el diámetro de la lente utilizada en arreglo, b la distancia imagen y λ la longitud de onda de la fuente de iluminación. Las motas en el extremo que se presentan en este patrón de interferencia, determinan el tamaño que tiene el speckle que se forma en el plano imagen de la lente. Por lo que si se introduce el $F\#$ de la lente, dado por (1.5), entonces el tamaño promedio del speckle se puede expresar por la relación (1.6).

$$F\# = \frac{f}{D} \quad (1.6)$$

$$\sigma_s = (1 + m)\lambda F\# \quad (1.7)$$

$$m = \frac{b-f}{f} \quad (1.8)$$

donde m es la amplificación de la lente (1.7), ya que el tamaño del speckle depende de la amplificación y del $F\#$ de la lente. La figura 1.3 muestra la configuración para obtener un patrón de speckle subjetivo.

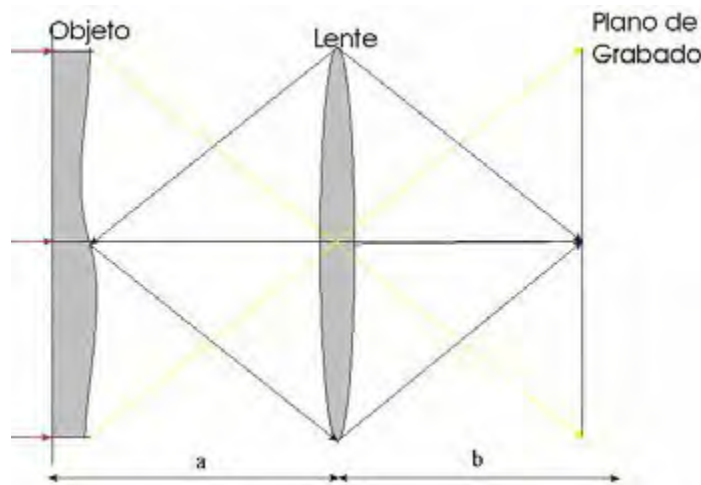


Figura 1.3. Formación del patrón de speckle subjetivo.

1.3. Patrón de speckle y su desplazamiento superficial

El patrón de moteado es utilizado para medir deformaciones o desplazamientos sufridos por el objeto bajo estudio, estos desplazamientos se detectan por medio de un arreglo óptico, el cual es sensible en plano (in-plane) o fuera de plano (out of plane), y depende de donde haya sido deformado el objeto de prueba. En las siguientes secciones se describen las técnicas de desplazamientos en plano y fuera de plano.

1.3.1. Desplazamiento lineal en plano

Cuando el objeto es translúcido, y éste es desplazado una distancia d en su propio plano, y es iluminado por una fuente de luz coherente forma un patrón de speckle. Este patrón de speckle es objetivo, y también se desplaza en la misma cantidad y dirección, ya que la estructura de dicho patrón empieza a cambiar cuando algunas motas comienzan a salir del haz de iluminación, tal como se muestra en la figura (1.4a). Para el desplazamiento en plano usando un patrón de speckle subjetivo, el movimiento que presentan las motas son en dirección opuestas al objeto y su magnitud, la mota es amplificada en una cantidad m , que es la amplificación que introduce la lente usada en el arreglo óptico; esto se muestra en la figura (1.4b).

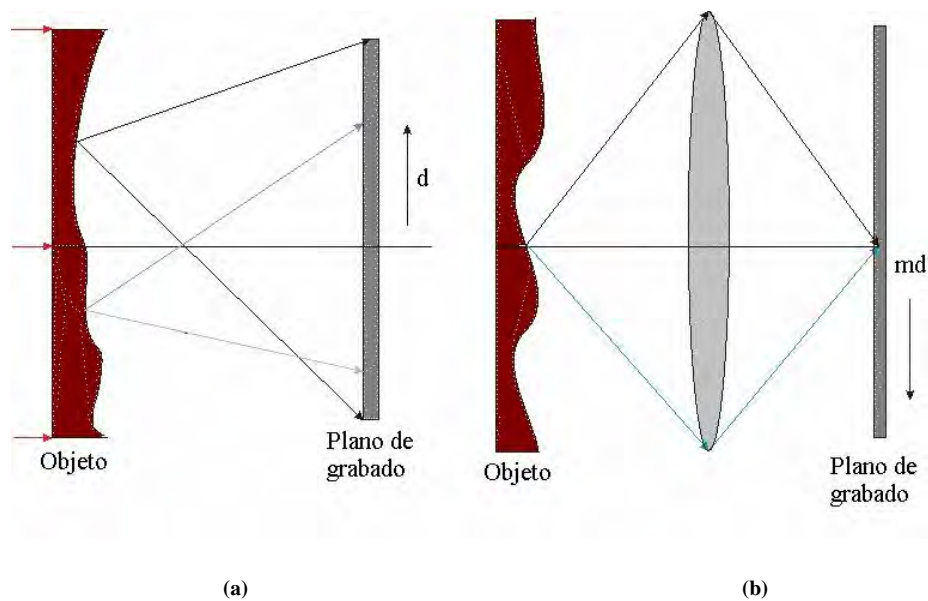


Figura 1.4. Desplazamiento en plano con un (a) patrón de speckle objetivo y (b) patrón speckle subjetivo.

1.3.2. Desplazamiento fuera de plano

Cuando se requiere conocer la deformación que ha sufrido un objeto en dirección fuera del plano, se considera que una mota localizada en una posición de coordenadas $P(r,0)$, como se muestra en la figura (1.5a). esto es debido a la superposición de todas las ondas que provienen del objeto.

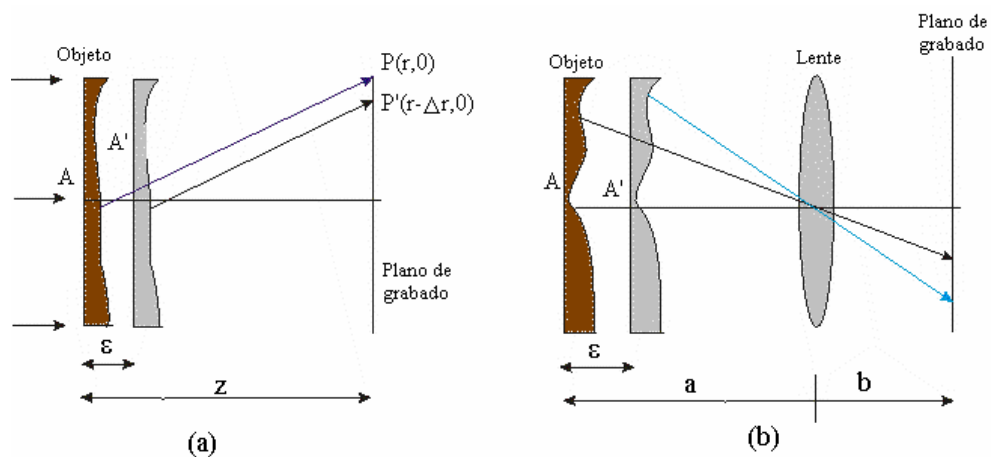


Figura 1.5. Desplazamiento fuera de plano(a) patrón de speckle objetivo y (b) patrón de speckle subjetivo.

Cuando el objeto es desplazado axialmente una cantidad pequeña ϵ , todas las ondas también sufren un desfase muy cercano a la misma cantidad. Además se debe aclarar que cuando el cambio que sufren las ondas son un múltiplo de 2π , existe un estado de speckle similar en un punto de coordenadas $P'(r-\Delta r,0)$, esto significa, que el speckle será desplazado radialmente en una cantidad Δr , por lo que podemos representarlo por las relaciones (1.9a) y (1.9b).

$$\frac{r}{z} = \frac{r - \Delta r}{z - \varepsilon} \quad (1.9a)$$

$$|\Delta r| = \varepsilon \frac{r}{z} \quad (1.9b)$$

Para el caso del patrón de speckle subjetivo, esta situación es mostrada en la figura (1.5b) y en esta situación se obtiene un desplazamiento, determinado por las ecuaciones (1.10a) y (1.10b).

$$\frac{a}{a - \varepsilon} = \frac{r + \Delta r}{r} \quad (1.10a)$$

$$|\Delta r| = \varepsilon \frac{r}{a} \quad (1.10b)$$

donde a es la distancia objeto. Para el desplazamiento axial del objeto, el patrón de speckle cambia radialmente si se expande o se contrae en la dirección del cambio, este cambio se produce en un factor de $\frac{r}{z}$ ó $\frac{r}{a}$. En este caso los desplazamientos radiales del patrón de speckle requiere un desplazamiento fuera de plano mayor a las dimensiones del objeto.

1.4. Obtención del patrón de interferencia

En los párrafos anteriores se ha citado que el tamaño del speckle en interferometría de moteado se puede controlar por el F# de la lente que forma la imagen del speckle. Más

allá, que el tamaño del speckle puede tener dimensiones del doble del tamaño por la adición de un haz de referencia. Y a diferencia de la técnica de holografía, ESPI usa detectores electrónicos, y no emulsiones fotográficas para grabar los patrones de interferencia, aunque tienen resoluciones limitadas por el CCD [Sirohi(1999)]. El uso de los detectores electrónicos simplifica el proceso y presenta la ventaja de que el procesamiento se realiza a velocidades de video, lo que produce una reducción de tiempos llegando casi al procesamiento en tiempo real [Leendertz (1971), Rodríguez (1992), Kerr (1990)]. En las técnicas de speckle con grabado fotográfico, se tiene que realizar una doble exposición fotográfica, las cuales presentan el inconveniente de contener un nivel de DC. Para remover este nivel de DC se hace necesario implementar una técnica de sustracción de imágenes [Malacara(1998)]. Las técnicas de desfaseamiento [Creath (1985)], se integran fácilmente, ya que la técnica permite presentar los mapas de deformación casi en tiempo real, lo que permite un procesamiento digital de las imágenes bastante eficiente. Lo anterior convierte a ESPI en una alternativa muy confiable y de uso industrial, que ha remplazado a la interferometría holográfica, por el uso de una computadora y una cámara digital, tan comunes hoy en día. La figura 1.6 muestra un arreglo experimental típico para la formación de ESPI.

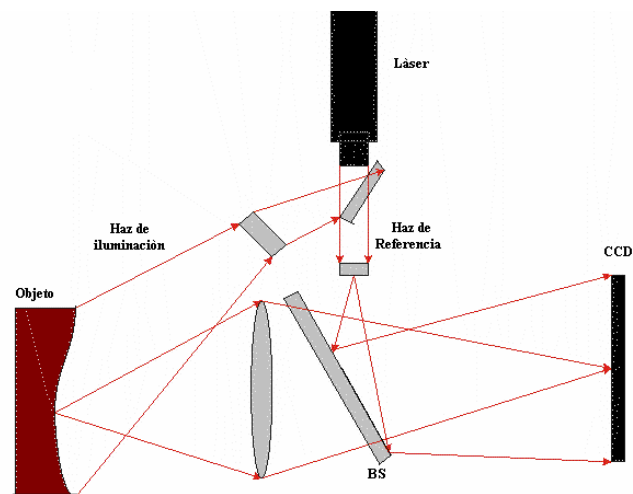


Figura 1.6. Arreglo experimental para ESPI.

Las técnicas de interferometría de moteado (speckle fotográfico) y de interferometría de desplazamiento de moteado (Shearography) se dice que son diferentes, de acuerdo al medio de grabado que emplean, pero debemos recordar que la resolución de un detector electrónico es limitada, en algunos casos en un rango de 50-100 l/mm [Sirohi(1999)], lo que produce un problema ya que en ocasiones el tamaño de la mota que se requiere detectar tienen unas dimensiones que están en el rango de 10-20 μm .

El ESPI fue inventado por varios grupos [Leendertz (1970), Macovski (1971)], con el objetivo de disminuir los tiempos consumidos en el procesamiento químico de las emulsiones fotográficas, lo que se logró con el uso de las cámaras digitales (figura 1.6).

Cuando la superficie del objeto es enfocada hacia la cámara CCD, y cuando está alineado con el haz de referencia, obtenemos motas de mayor tamaño que pueden ser resueltas por la cámara, aunque tenemos una degradación del patrón de interferencia resultante. Esta degradación en la calidad del patrón de interferencia es compensada con la velocidad de grabado y reconstrucción de la información, que día a día se hace más eficiente, conforme las cámaras contienen una mayor cantidad de píxeles que son de menor tamaño y mejoran la resolución.

En el ESPI el campo del haz objeto en el plano imagen (x,y) , y en el plano de la cámara CCD, se representa por la siguiente relación

$$E^o(x, y) = E_0^o(x, y)e^{i\phi^o(x,y)} \quad (1.11)$$

donde la $E_0^o(x, y)$ es la amplitud real y $\phi^o(x, y)$ es la fase aleatoria de la onda del haz objeto, debido a la rugosidad que presenta la superficie del objeto. De manera similar se puede denotar la onda del haz de referencia, por

$$E^R(x, y) = E_0^R(x, y)e^{i\phi^R(x, y)} \quad (1.12)$$

Cuando se tiene el haz de referencia y como es colíneal, éste se superpone con el haz objeto. Cabe hacer notar que el haz de referencia puede ser un frente de onda plano, esférico o un haz arbitrario que sea reflejado [Kreis (1996)]. Una vez que hemos hecho la superposición de los haces objeto y referencia, las intensidades son capturadas y grabadas por la CCD, lo cual está dada por las ecuaciones (1.13a) y (1.13b) [Kreis (1996), Sirohi (1999), Gasvik (1987)]:

$$I_A(x, y) = |E^o(x, y) + E^R(x, y)|^2 \quad (1.13a)$$

$$I_A(x, y) = I^o(x, y) + I^R(x, y) + 2\sqrt{I^o(x, y)I^R(x, y)} \cos \psi(x, y) \quad (1.13b)$$

$$\psi(x, y) = \phi^o(x, y) - \phi^R(x, y) \quad (1.14)$$

donde $\psi(x, y)$ es la diferencia de fase dada por la ecuación (1.14). Cuando se introduce una deformación en el objeto bajo análisis y esta provoca un cambio en la fase $\phi^o(x, y)$ del objeto en cada punto en una cantidad igual a $\Delta\phi(x, y)$, esto produce que el frente de onda después de que el objeto se ha deformado sea expresado como

$$E^o(x, y) = E_0^o(x, y)e^{i[\phi^o(x, y) + \Delta\phi(x, y)]} \quad (1.15)$$

Cuando se hace la superposición de las ondas objeto y de referencia después de deformado el objeto, y la intensidad es grabada por la CCD, se denota por la ecuación (1.16) que es muy similar a la ecuación (1.13b), pero contiene el factor de desplazamiento en fase sufrido por el objeto.

$$I_B(x, y) = I^o(x, y) + I^R(x, y) + 2\sqrt{I^o(x, y)I^R(x, y)} \cos[\psi(x, y) + \Delta\phi(x, y)] \quad (1.16)$$

Una vez obtenidas las intensidades del objeto antes y después de ser deformado, dadas por las ecuaciones (1.13b) y (1.16) respectivamente; se resta el patrón de speckle $I_B(x, y)$ punto a punto en tiempo real del patrón $I_A(x, y)$, tomado como imagen de referencia, esto es porque se asume que la deformación cambia la fase pero no la amplitud. Lo anterior explica la igualdad de intensidades y se expresa por la ecuación (1.17).

$$I^o(x, y) = I^o(x, y) \quad (1.17)$$

Para obtener el término que contiene la información de la deformación o del patrón de interferencia, se obtiene la diferencia de intensidades (1.18).

$$I_A(x, y) - I_B(x, y) = 2\sqrt{I^o(x, y)I^R(x, y)} [\cos\psi(x, y) - \cos(\psi(x, y) + \Delta\phi(x, y))] \quad (1.18)$$

aplicando las identidades trigonométricas correspondientes, se obtiene de la ecuación (1.18), la relación que representa el término del moteado y el término que contiene la información que se ha producido en el objeto y/o el patrón de interferencia.

Esto esta contenido en la ecuación (1.19)

$$(I_A - I_B)(x, y) = 4\sqrt{I^o(x, y)I^R(x, y)} \sin\left[\psi(x, y) + \frac{\Delta\phi(x, y)}{2}\right] \sin \frac{\Delta\phi(x, y)}{2} \quad (1.19)$$

De la ecuación (1.19) se obtiene el resultado en tiempo real, que se despliega en el monitor de la computadora o de televisión convencional, realizando el modulo $|I_A - I_B|$ o el cuadrado de la diferencia de intensidades $(I_A - I_B)^2$. Donde el término al cuadrado de la diferencia de intensidades es la iluminación de fondo que presenta la imagen. El primer término senoidal de la ecuación (1.19) representa el ruido estocástico del speckle que varía de un píxel a otro píxel de la imagen capturada. El ruido del speckle es modulado por el segundo término senoidal de la ecuación (1.19) que es inducido por la deformación que sufre el objeto [Kreis (1996)]. El segundo término es el término conocido como el patrón de interferencia.

1.5 Vector de sensibilidad para sistemas en plano

Para el análisis de deformaciones en un objeto usando un sistema interferométrico con sensibilidad en el plano, se implementa un interferómetro de iluminación dual, en el cual la diferencia de fase representada por $\Delta\phi(x, y)$, en términos del vector de desplazamiento, $d(x, y)$, y del vector de sensibilidad, $\vec{e}(P)$, esta dada por [Kreis (1996)]

$$\Delta\phi(P) = \vec{d}(P) \cdot \vec{e}(P) \quad (1.20)$$

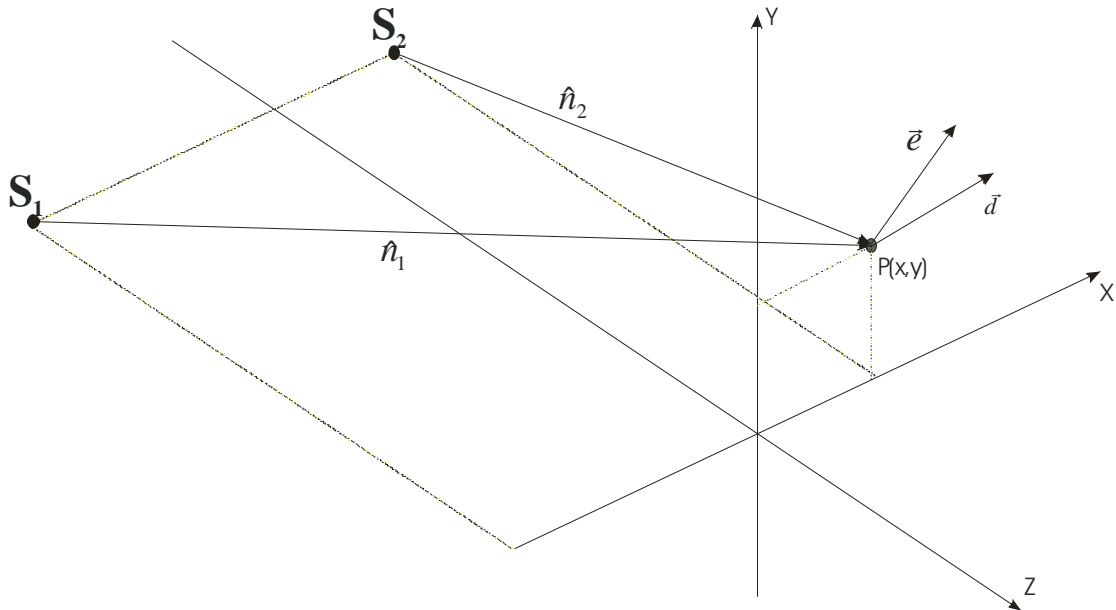


Figura 1.7 Vector de sensibilidad para iluminación dual.

El vector de sensibilidad, está dado por la ecuación (1.21), y es deducido a partir de la figura.1.7 [Martínez (2001)], de donde tenemos

$$e(P) = \frac{2\pi}{\lambda} [\hat{n}_1(P) - \hat{n}_2(P)] \quad (1.21)$$

Donde \hat{n}_1 y \hat{n}_2 son los vectores unitarios de las fuentes de iluminación S_1 y S_2 , respectivamente, en el caso del interferómetro de iluminación dual con sensibilidad en el plano, ésta no depende de la dirección de observación. Las componentes del vector sensibilidad para iluminación divergente están dadas por:

$$e_x(P) = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{x_p - x_{s1}}{\sqrt{(x_p - x_{s1})^2 + (y_p - y_{s1})^2 + (z_p - z_{s1})^2}} - \frac{x_p - x_{s2}}{\sqrt{(x_p - x_{s2})^2 + (y_p - y_{s2})^2 + (z_p - z_{s2})^2}} \right] \quad (1.22a)$$

$$e_y(P) = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{y_p - y_{s1}}{\sqrt{(x_p - x_{s1})^2 + (y_p - y_{s1})^2 + (z_p - z_{s1})^2}} - \frac{y_p - y_{s2}}{\sqrt{(x_p - x_{s2})^2 + (y_p - y_{s2})^2 + (z_p - z_{s2})^2}} \right] \quad (1.22b)$$

$$e_z(P) = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{z_p - z_{s1}}{\sqrt{(x_p - x_{s1})^2 + (y_p - y_{s1})^2 + (z_p - z_{s1})^2}} - \frac{z_p - z_{s2}}{\sqrt{(x_p - x_{s2})^2 + (y_p - y_{s2})^2 + (z_p - z_{s2})^2}} \right] \quad (1.22c)$$

Donde las coordenadas (x_p, y_p, z_p) pertenecen a un punto del objeto, y las coordenadas de las fuentes de iluminación S_1 y S_2 están dadas por (x_{s1}, y_{s1}, z_{s1}) y (x_{s2}, y_{s2}, z_{s2}) respectivamente.

1.6. Vector de sensibilidad para sistemas fuera plano

En el caso de sistemas con un solo haz de iluminación, el vector de sensibilidad está dado por [Puga, et al(2002), Martínez, et al (2004)]

$$\vec{e}(P) = \frac{2\pi}{\lambda} [\hat{n}_o(P) - \hat{n}_i(P)] \quad (1.23)$$

donde $\hat{n}_o(P)$ y $\hat{n}_i(P)$ son los vectores unitarios de la iluminación y observación respectivamente. En el caso de iluminación divergente los vectores $\hat{n}_o(P)$ y $\hat{n}_i(P)$ cambian de dirección para cada punto que se analiza en la superficie del objeto, esto se puede observar de la figura 1.8.

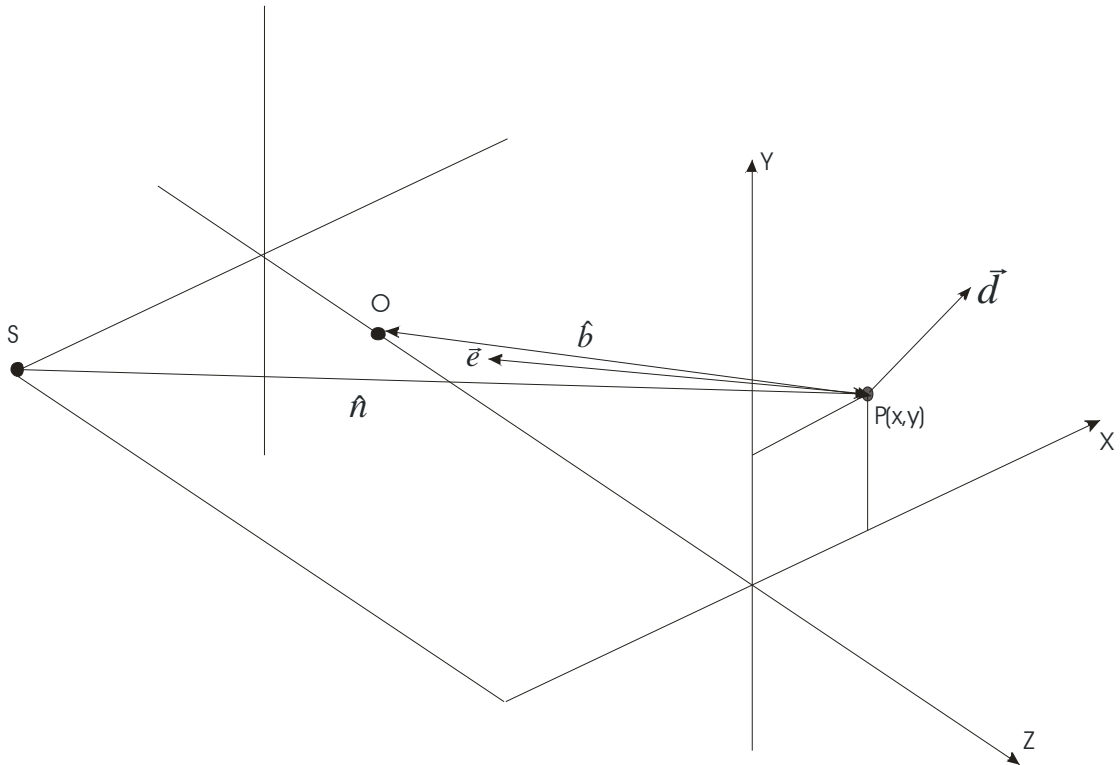


Figura 1.8 Vector de sensibilidad para un haz de iluminación.

Su expresión correspondiente es:

$$\hat{n}_o(P) = \frac{1}{\sqrt{(x_o - x_i)^2 + (y_o - y_i)^2 + (z_o - z_i)^2}} \begin{pmatrix} x_o - x_i \\ y_o - y_i \\ z_o - z_i \end{pmatrix} \quad (1.24a)$$

$$\hat{n}_i(P) = \frac{1}{\sqrt{(x_p - x_{s2})^2 + (y_p - y_{s2})^2 + (z_p - z_{s2})^2}} \begin{pmatrix} x_p - x_{s2} \\ y_p - y_{s2} \\ z_p - z_{s2} \end{pmatrix} \quad (1.24b)$$

donde (x_o, y_o, z_o) y (x_i, y_i, z_i) son las coordenadas del punto objeto y las coordenadas de la fuente de iluminación respectivamente. De las ecuaciones (1.22 y 1.24), podemos

expresar el vector de sensibilidad en función de las coordenadas de la fuente de observación e iluminación por:

$$e_x = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{x_o - x_p}{\sqrt{(x_o - x_p)^2 + (y_o - y_p)^2 + (z_p - z_{s1})^2}} - \frac{x_p - x_s}{\sqrt{(x_p - x_s)^2 + (y_p - y_s)^2 + (z_p - z_s)^2}} \quad (1.25a)$$

$$e_y = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{y_o - y_p}{\sqrt{(x_o - x_p)^2 + (y_o - y_p)^2 + (z_p - z_{s1})^2}} - \frac{y_p - y_s}{\sqrt{(x_p - x_s)^2 + (y_p - y_s)^2 + (z_p - z_s)^2}} \quad (1.25b)$$

$$e_z = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{z_o - z_p}{\sqrt{(x_o - x_p)^2 + (y_o - y_p)^2 + (z_p - z_{s1})^2}} - \frac{z_p - z_s}{\sqrt{(x_p - x_s)^2 + (y_p - y_s)^2 + (z_p - z_s)^2}} \quad (1.25c)$$

1.7. Conclusiones

En el presente capítulo se han descrito las principales características y comportamientos del patrón de moteado objetivo y subjetivo, así como los sistemas interferométricos sensibles en plano y fuera de plano. De lo analizado en este tema se concluye que el ESPI y la Holografía presentan características muy similares siendo una de las diferencias mas remarcables el método de grabado de información. La determinación de las deformaciones en plano y fuera de plano, se pueden realizar obtener por un sistema de doble iluminación y con un sistema de un solo haz de iluminación , según sea el caso.

El desplazamiento o deformación de un objeto, puede ser detectado por distintos métodos ópticos, tales como la holografía y/o la interferometría de moteado. La cuantificación del vector de sensibilidad hace posible la medición de la deformación en



unidades físicas. La determinación de las coordenadas del vector sensibilidad dependen única y exclusivamente del tipo de arreglo interferométrico implementado y el tipo de iluminación.

1.8. Referencias

Creath, K., Holographic contour and deformation measurement using a 1.4 million element detector array, *Appl. Opt.* 28, pp. 2170-2175, 1985.

Gasvik, K.J., *Optical Metrology*, John Wiley & sons, Great Britain, 1987.

Goodman, J.W., *Introduction to Fourier Optics*, Second Edition, McGrawHill, U.S.A., 1996.

Joenathan, C., Pfister, B & Tiziani, H.J., Contouring by electronic speckle pattern interferometry employing dual beam illumination, *Appl. Opt.*, Vol. 29, No. 13, 1905-1911, 1990.

Jones. R. & Wykes, C., *Holographic And Speckle Interferometry*, Cambridge University Press, Great Britain, 1989.

Kerr, D. Mendoza Santoyo, F. Y Tyrer, J.R., Extraction of phase data from electronic speckle pattern interferometric fringes using a single-phase-step method: a novel approach, *J. Opt. Soc. Am. A* vol. 7, No.5, pp. 820-826, 1990.

Kreis, T., *Holographic Interferometry: Principles and Methods*, Akademie Verlag, Germany, 1996.

Leendertz, J. A., Interferometric displacement measurement on scattering surfaces utilizing speckle effect, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 3, pp. 214-218, 1970.

Macovski, A., Ramsey, S.D. & Schaefer, L.F. Time-Lapse interferometry and contouring using television system, J. Applied Optics, Vol. 10, No 12, pp. 2722-2727, 1971.

Malacara, D., Servín, M. Y Malacara; Z., Interferogram analysis for optical testing; Ed. Marcel Dekker, Inc. U. S. A, 1998.

Martínez C., R. Técnicas híbridas espacio-temporales en interferometría de moteado para la detección de fenómenos continuos, tesis doctoral, Centro de Investigaciones en Óptica A. C., León, Guanajuato, México, 2001.

Martínez, Amalia, Iluminación esférica en interferometría de moiré, Tesis doctoral, Centro de Investigaciones en Óptica A.C., León, Guanajuato, México, 2001.

Martínez, Amalia, Rayas, J.A., Rodríguez-Vera, R. & Puga, H.J., Sistemas ópticos para el análisis de componentes mecánicas: ESPI, moiré geométrico e interferometría de rejilla, III simposio “La óptica en la industria”, Tonantzintla, Puebla, México, 2003.

Martínez, Amalia, Rayas, J.A., Rodríguez-Vera, R. & Puga, H.J., Error in the measurement due to the divergence of the object illumination wavefront for in plane interferometers, Opt. Comm., 223, pp. 239-246, 2003.

Martínez, Amalia, Rayas, J.A., Rodríguez-Vera, R. & Puga, H.J., Three-dimensional deformation measurement from the combination of in-plane and out-of-plane electronic speckle pattern interferometers, *App.Opt.*, 43, No.24, 2004.

Puga, H. J., Rodríguez-Vera, R. & Martinez, A., General model to predict errors in phase map interpretation and measurement for out of plane ESPI interferometers, *Optics & laser Technology*, 34, pp. 81-92, 2002.

Rodríguez Vera, R., Kerr, D. & Mendoza-Santoyo, F., Electronic speckle contouring, *J. Opt. Soc. Am. A* Vol. 9, No. 11, 2000-2008, 1992.

Sirohi, R.S. & Siong Chau, F., *Optical methods of measurements: wholefield techniques*, Ed.Marcel Dekker, Inc. U.S.A., 1999.

Capítulo 2

Sistema ESPI en plano para contorneo

2.1 Introducción

La detección de contorno o forma de un objeto utilizando la técnica ESPI, ha sido reportada en diversas fuentes bibliográficas. Entre las técnicas experimentales para la obtención de forma de un objeto están: método de cambio de longitud de onda, cambio de índice refractivo y el método de iluminación dual [Sirohi (1999)]. De las técnicas citadas, la técnica que se implementará es el método de iluminación dual colimada.

2.2 Obtención de la expresión para topografía usando un sistema con iluminación dual colimada

La detección de forma por iluminación dual colimada [Joenathan (1999)], es posible al utilizar un interferómetro sensible en plano, donde los haces iluminan simétricamente el objeto a un ángulo θ , y el grabado del interferograma se hace con una CCD (Figura 2.1).

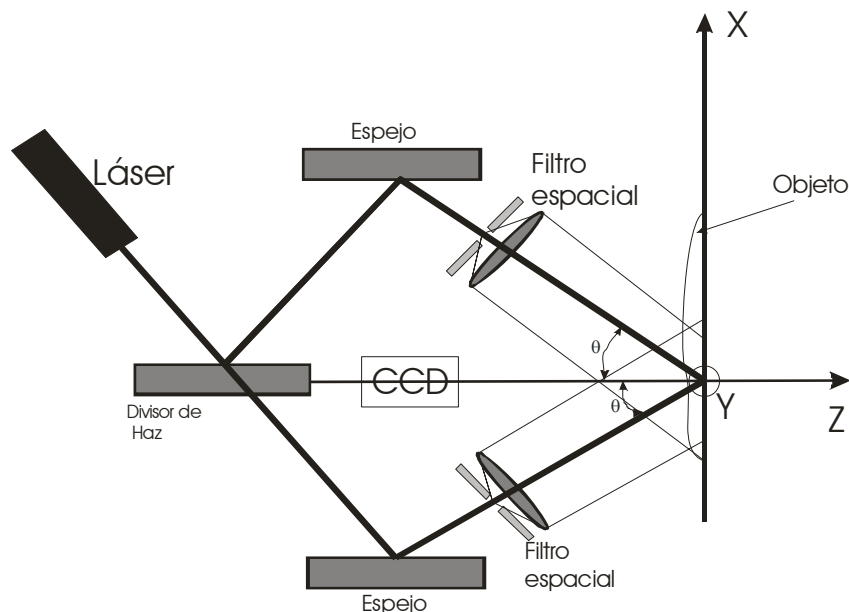


Figura 2.1 Diagrama de un interferómetro con iluminación dual colimada

De las ecuaciones 1.22 para el caso de iluminación dual colimada, se observa que el vector de sensibilidad tiene como única componente e_x [Martínez, et al (2003)]

$$e_x = \frac{4\pi}{\lambda} \text{sen}\theta \quad (2.1)$$

que al introducirla en la ecuación 1.20 se obtiene la ecuación

$$\Delta\phi(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} u \cdot \text{sen}\theta \quad (2.2)$$

El efecto de la componente fuera de plano e_z se cancela por la simetría del interferómetro, y esto sucede para cualquier forma del objeto. La técnica implementada consiste en utilizar un sistema ESPI con iluminación dual, simétrica y colimada como se muestra en la figura 2.1. Se capta mediante una CCD, una imagen del objeto bajo estudio. Posteriormente el objeto es rotado en un pequeño ángulo ω con respecto al eje “y”, tomando una segunda imagen. Estas son restadas para obtener un patrón de franjas que nos dará información de la topografía del objeto.

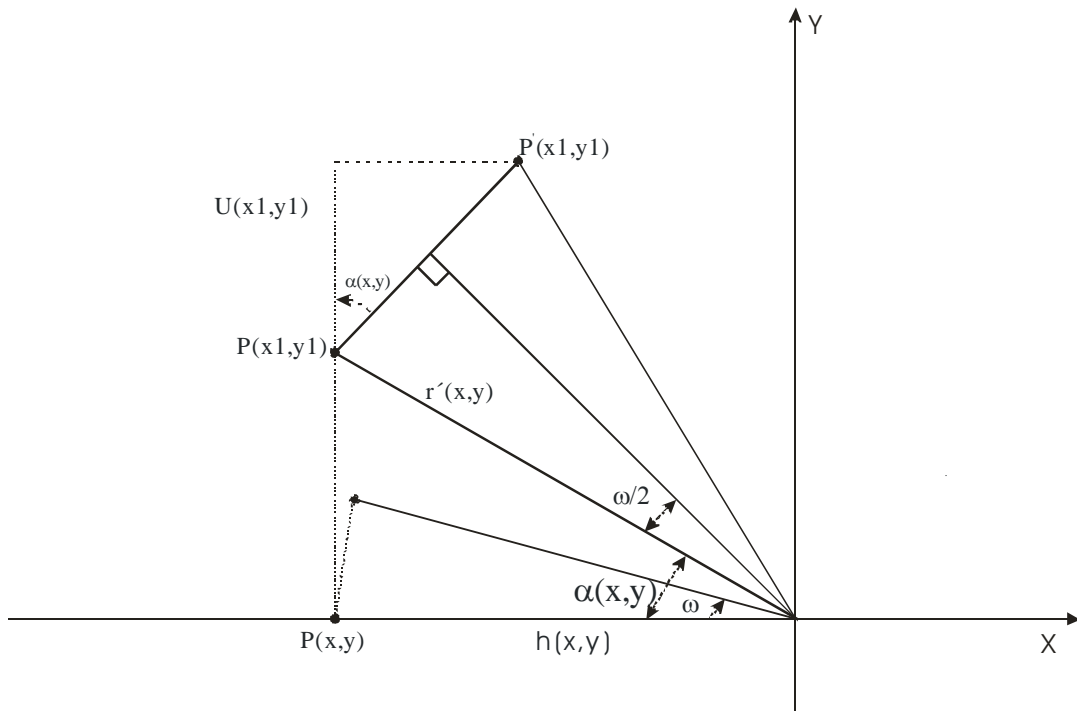


Figura 2.2. Diagrama para determinar la topografía de un objeto

De la figura 2.2 se puede deducir la ecuación de profundidad del objeto. Sea el plano xy un plano de referencia, con respecto al cual será medida la topografía. En el diagrama anterior, se consideran dos puntos del objeto $P(x_0, y_0)$ y $P(x_1, y_1)$, éste último se encuentra a una posición angular de $\alpha(x, y)$. La profundidad de punto $P(x_0, y_0)$ con respecto al plano de referencia es denotada como $h(x, y)$. Si el objeto es rotado con respecto al eje y un ángulo ω , entonces el punto $P(x_0, y_0)$ y $P(x_1, y_1)$ se localizan en una segunda posición, donde para el segundo punto se ha denotado como $P'(x_1, y_1)$.

De un análisis geométrico es posible obtener:

$$h(x, y) = r'(x, y) \cos \alpha(x, y) \quad (2.3)$$

$$u(x, y) = 2 \cdot r'(x, y) \cdot \text{sen}\left(\frac{\omega}{2}\right) \cdot \cos \alpha(x, y) \quad (2.4)$$

$$u(x, y) = 2 \cdot h \cdot \text{sen}\left(\frac{\omega}{2}\right) \quad (2.5)$$

Donde $u(x,y)$ es la componente del vector de desplazamiento en la dirección x . Para un interferómetro con iluminación dual colimada, se tiene que la relación entre la fase y el desplazamiento $u(x,y)$ esta dado por[Martínez, et al(2003)]:

$$\Delta\phi(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot u(x, y) \cdot \text{sen}\theta \quad (2.6)$$

donde θ es el ángulo de iluminación dual. Considerando el hecho de que el ángulo de rotación ω es muy pequeño, y sustituyendo la ecuación 2.3 en la ecuación 2.4, al despejar $h(x,y)$ se obtiene [Joenathan, et al (1990)]:

$$h(x, y) = \frac{\Delta\phi(x, y) \cdot \lambda}{4 \cdot \pi \cdot u(x, y) \cdot \text{sen}\theta} \quad (2.7)$$

la cual determina la topografía del objeto quedando la ecuación dependiente de la fase obtenida de la forma ya descrita, ángulo de rotación del objeto, y ángulo de iluminación dual colimada.

2.3. Conclusiones

Se obtuvo la expresión matemática del término para la cuantificación de la topografía de un objeto, en el caso de un sistema interferométrico sensible en el plano con iluminación dual colimada, partiendo de la geometría del arreglo. El desarrollo matemático sustenta la parte experimental de la técnica ESPI para detección de forma por rotación del objeto.

2.4. Referencias

Joenathan, C., Pfister, B & Tiziani, H.J., Contouring by electronic speckle pattern interferometry employing dual beam illumination, *Appl. Opt.*, Vol. 29, No. 13, 1905-1911, 1990.

Martínez, Amalia, Rayas, J.A., Rodríguez-Vera, R. & Puga, H.J., Error in the measurement due to the divergence of the object illumination wavefront for in plane interferometers, *Opt. Comm.*, 223, pp. 239-246, 2003.

Sirohi, R.S. & Siong Chau, F., *Optical methods of measurements: wholefield techniques*, Ed. Marcel Dekker, Inc. U.S.A., 1999.

Capítulo 3**Detección de la fase óptica****3.1. Introducción**

La detección o medición de la fase de una señal de la cual se conoce su frecuencia, se puede obtener por el proceso de muestreo, lo cual ha llevado a su estudio y desarrollo de diferentes métodos de solución a este problema [Malacara, et al (1998), Hariharan, et al (1987) y (1987)].

La detección de la fase óptica o fase envuelta se ha vuelto crítica en el uso de los métodos de desplazamiento en fase [Hariharan(1987),et al, Freischlad, et al (1990)], usados en el contorno y/o recuperación de forma de objetos, detección de deformaciones [Martínez (2001), Rodríguez-Vera (1993)]. En las siguientes secciones se describen los métodos más conocidos para detectar la fase óptica.

3.2. Desplazamiento de fase (phase stepping)

El análisis de un patrón de franjas que presenta un objeto bajo análisis, permite la extracción de la información correspondiente a la fase óptica; y obtener por desplazamientos de la posición de las franjas la información [Greivenkamp, et al (1992)], lo anterior permite mejorar la precisión y resolución en la obtención de la forma y la deformación del objeto estudiado.

Para la implementación de la técnica de desplazamiento de fase existen diferentes técnicas y algoritmos computacionales; y el desplazamiento de las franjas físicamente se realiza al desplazar un espejo en un brazo del interferómetro propuesto. El desplazamiento del espejo se induce por medio de un piezoeléctrico. La información que se puede determinar por el análisis de franjas es variado, tales como forma,

deformación de superficie, análisis de esfuerzos y sistemas de prueba de formación de imágenes. Un interferograma se puede representar por la expresión matemática [Malacara, et al (1998)]

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\omega x + \phi(x, y)] \quad (3.1)$$

Y de la misma forma podemos expresarla de la siguiente forma [Servín (1994)]

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\phi(x, y)] \quad (3.2)$$

donde x es la coordenada espacial o temporal en la que la irradiancia es medida, ω frecuencia espacial o temporal y $\phi(x, y)$ es la fase en el origen ($x = 0$) [Malacara, et al (1998), Servín (1994)]. De la ecuación (3.1) se asume que la frecuencia ω es conocida, como se describe en la ecuación (3.2), y debido a que existen tres incógnitas, se requieren un mínimo de tres intensidades o interferogramas, para recuperar la fase del frente de onda.

En este caso se utiliza un algoritmo de cuatro pasos o intensidades; con desplazamientos de fase con igual magnitud (α) [Creath (1992)]. En este caso las intensidades están dadas por las ecuaciones (3.3a), (3.3b), (3.3c) y (3.3d)

$$I_1(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\phi(x, y)] \quad (3.3a)$$

$$I_2(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos\left[\phi(x, y) + \frac{\pi}{2}\right] \quad (3.3b)$$

$$I_3(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\phi(x, y) + \pi] \quad (3.3c)$$

$$I_4(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos\left[\phi(x, y) + \frac{3\pi}{2}\right] \quad (3.3d)$$

Cada una de las intensidades registra un desplazamiento en fase de $\frac{\pi}{2}$, y después de resolver el sistema de ecuaciones, se obtiene la fase en cada punto (x, y) , dada por

$$\tan \phi = \frac{I_4 - I_2}{I_3 - I_1} \quad (3.4)$$

Y uno de los algoritmos para detección de fase mas citados y utilizados es el algoritmo de cinco pasos con desplazamiento en fase de $\frac{\pi}{2}$ [Hariharan, et al (1987), Malacara, et al (1998), Surrel (1996), Creath (1986)], definido por

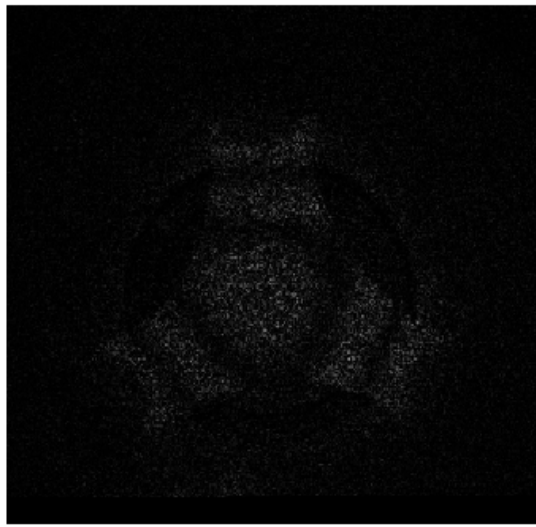
$$\tan \phi = \frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_5 - I_1} \quad (3.5)$$

La resolución en la detección de fase que presentan los algoritmos de tres, cuatro y cinco pasos, ha conducido al desarrollo de algoritmos que toman un número mayor de pasos, como cita la ecuación (3.6).

$$\tan \phi = \frac{\left[\frac{I(0) - I(N)}{2} \right] \cot\left(\frac{2\pi}{N}\right) - \sum_{n=1}^{N-1} I(n) \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi n}{N}\right)}{\left[\frac{I(0) + I(N)}{2} \right] + \sum_{n=1}^{N-1} I(n) \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right)} \quad (3.6)$$

El método de cuatro pasos, permite la recuperación de la fase envuelta, dichas fase contiene la información que se obtiene de los interferogramas, donde la fase del objeto presenta discontinuidades de 2π , y cuando estas discontinuidades son removidas se obtiene la fase desenvuelta que será discutida en secciones posteriores. Como resultado de la necesidad de la obtención de la fase óptica de objetos bajo pruebas interferométricas, se han desarrollado diversos algoritmos computacionales, llegando a funciones generales para N pasos de desplazamientos equidistantes entre franjas, como se muestra en la ecuación (3.6) [Surrel (1996), Joenathan (1994)].

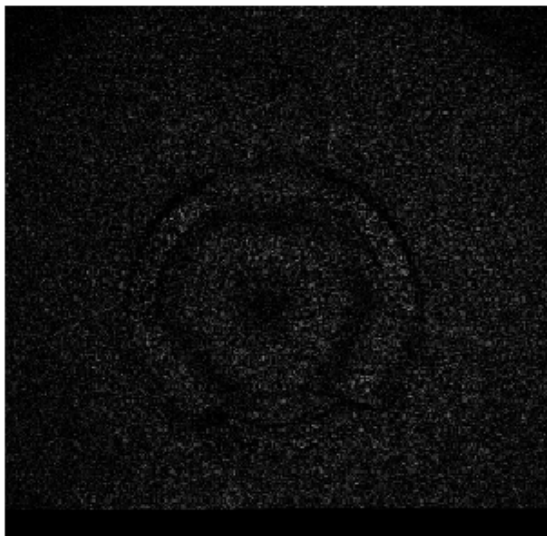
La figura 3.1 presenta los interferogramas grabados después de realizar usar la técnica de contorno descrita en el cap. 2 para el caso experimental estudiado, y de los cuales se obtiene el mapa de fase envuelta que se presenta en la figura 3.2(a), entre cada uno de los interferogramas existe un desplazamiento en fase de $\pi/2$. La figura 3.2(b) presenta un mapa de fase envuelta producto de 21 interferogramas usando el algoritmo N+1 pasos reportado por Surrel.



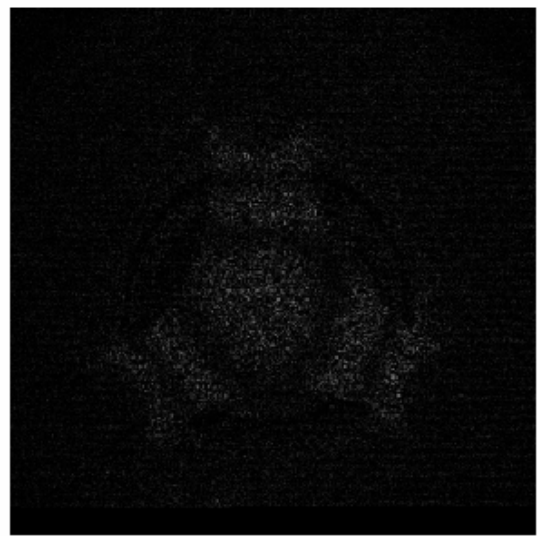
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.1. Interferogramas para detección de forma con un desplazamiento en fase de (a) 0 , (b) $\pi/2$, (c) π , (d) $3\pi/2$

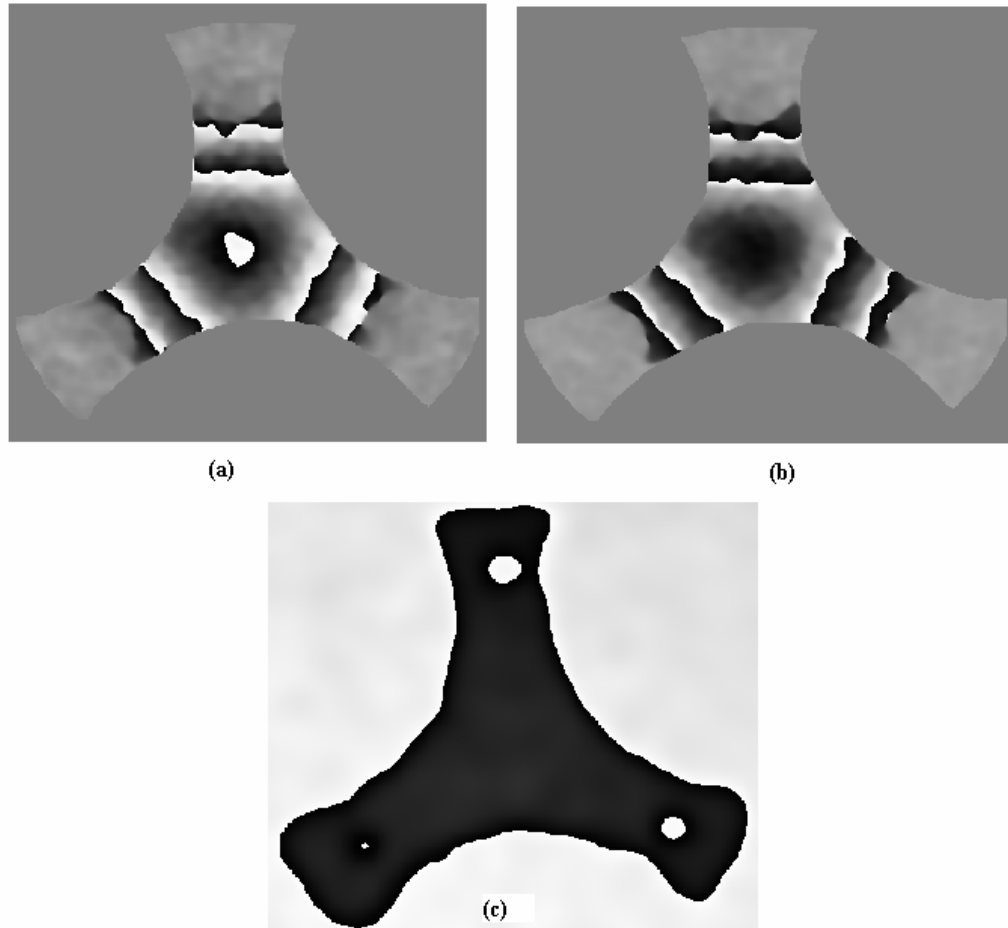


Figura 3.2 (a) Mapa de fase envuelta para tres pasos (b) Mapa de fase envuelta para cuatro pasos desplazados en $\pi/2$, (c) Mapa de fase envuelta para 21 pasos usando el algoritmo (N+1) [Surrel(1996)], con un desplazamiento de $2\pi/21$.

El mapa de fase envuelta de la deformación de la gasket se obtiene a partir de los interferogramas mostrados en la figura 3.3, con desplazamientos en fase de $\frac{\pi}{2}$ entre interferogramas. El mapa de fase envuelta se obtiene por medio del algoritmo de cinco

pasos [Hariharan, et al (1987) y (1987), Malacara, et al (1998), Surrel (1996)], y es presentado en la figura 3.4.

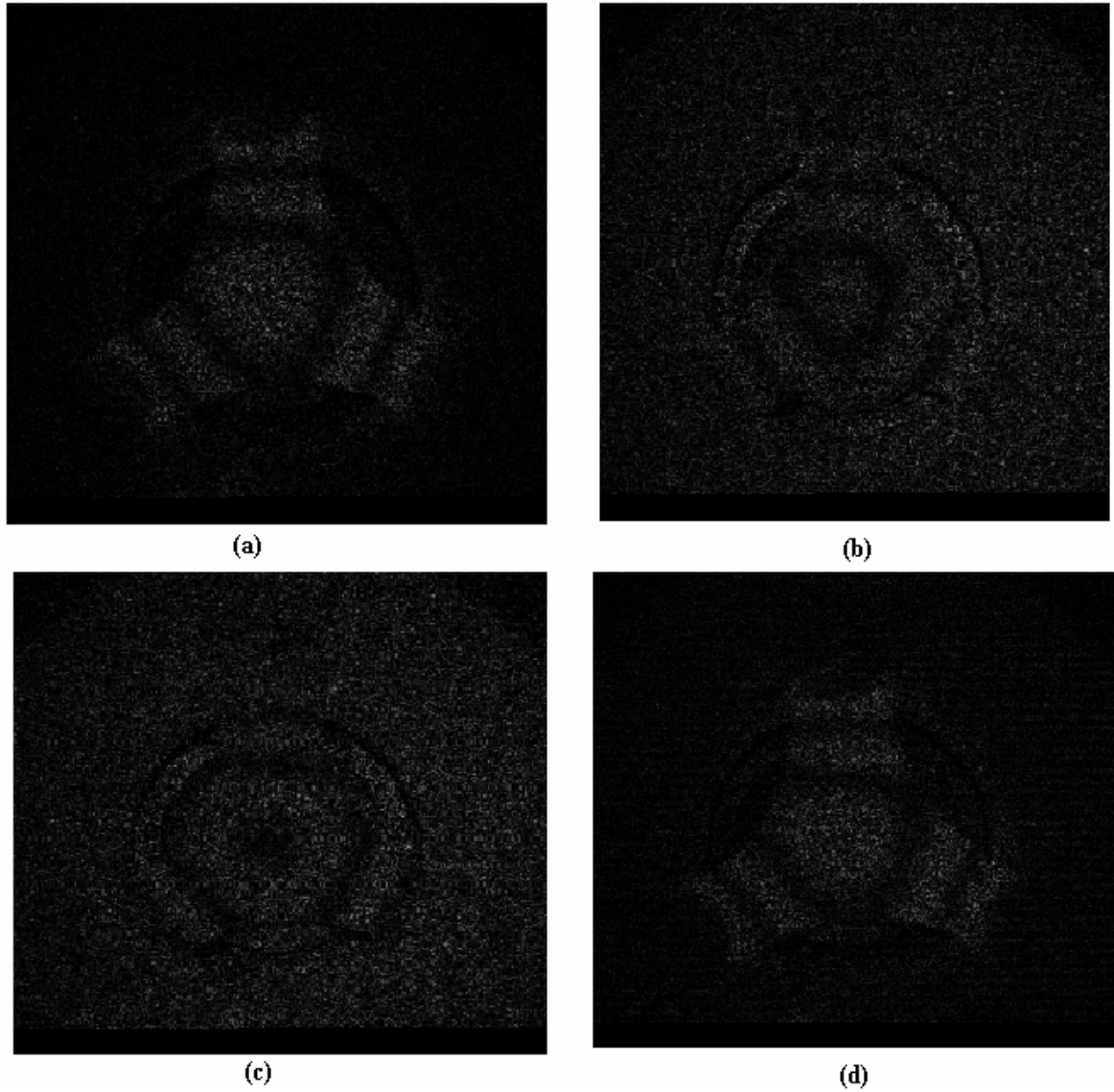


Figura 3.3. Interferogramas para detección de deformaciones con un desplazamiento en fase de (a) 0 , (b) $\pi/2$, (c) π , (d) $3\pi/2$

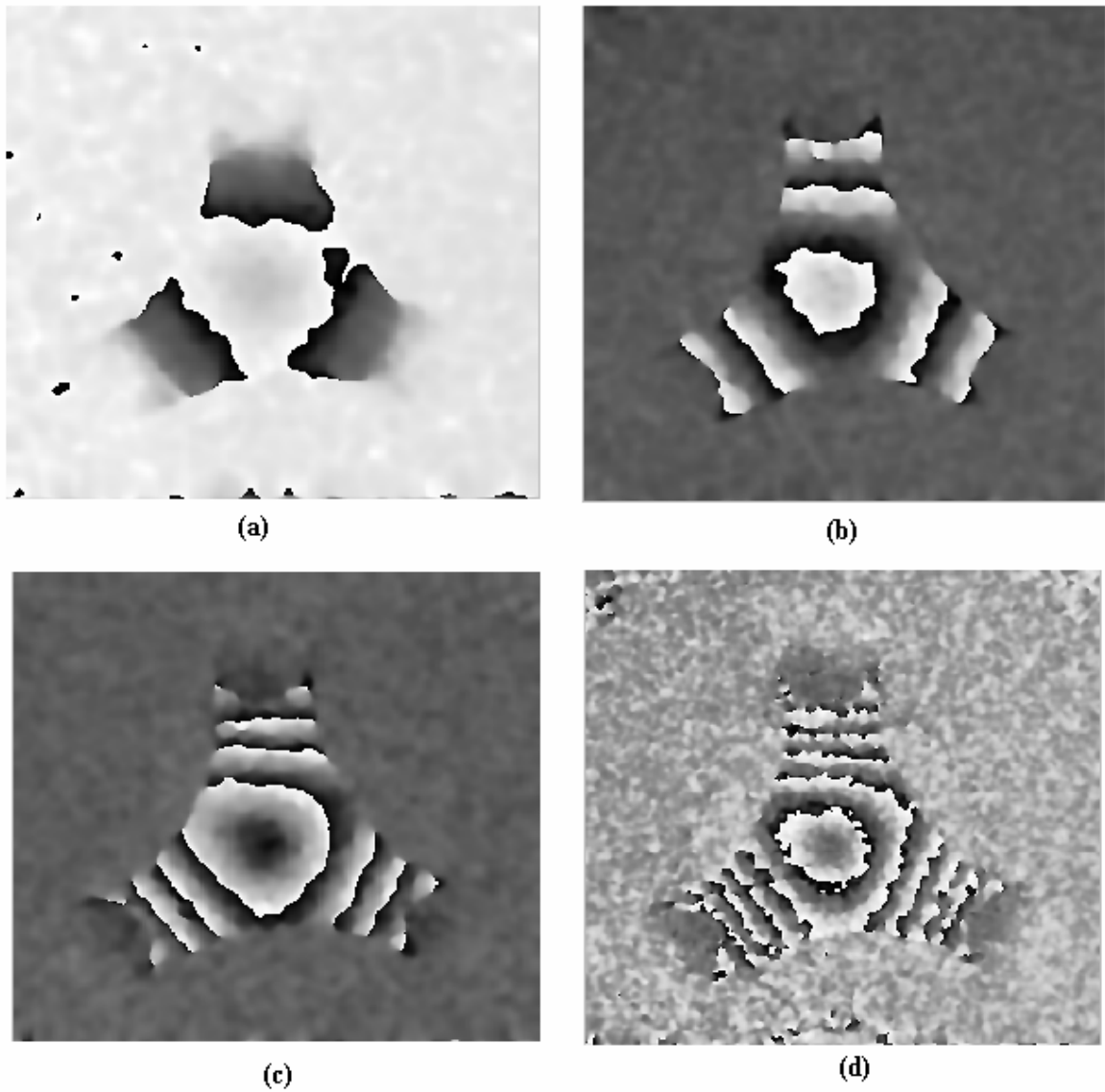


Figura 3.4. Mapa de fase envuelta del desplazamiento inducido por carga estática de (a) 5 Volts(0.5 μm), (b) 10 Volts(1 μm), (c) 15 Volts(1.5 μm), (d) 20 Volts (2 μm).

3.3. Desenvolvimiento de fase

En la sección anterior se discutió la determinación de la fase óptica, obtenida por distintos métodos computacionales, pero para recuperar la forma de la gasket, y determinar la deformación sufrida por la gasket después de aplicarle la carga estática, se hace necesario aplicar un algoritmo de desenvolvimiento de fase.

3.3.1. Desenvolvimiento de mapas de fase consistentes

Esta técnica es uno de los métodos mas simples para obtener un mapa de fase suavizado consistente [Malacara, et al (1998)]. Esto es tenemos un mapa de fase que representamos por $\phi_w(x, y)$ de un tamaño de $N \times N$ píxeles, y para desenvolverlo se desenvuelve la primera fila o renglón, y se toma el último valor del mismo como la condición inicial, para desenvolver la siguiente fila en dirección positiva, esto se puede representar por la formula [Malacara, et al (1998)]

$$\phi(x_{i+1}, y) = \phi(x_i, y_0) + V(\phi_w(x_{i+1}, y_0) - \phi(x_i, y_0)) \quad 1 \leq i \leq N \quad (3.7)$$

Donde $V(x) = \tan^{-1} \left[\frac{\text{sen } x}{\text{cos } x} \right]$ es la función de desenvolvimiento y tiene validez en un rango de $(-\pi, \pi)$, y una vez desenvuelta la primera fila, se procede a desenvolver la siguiente fila, usando el ultimo valor de fase desenvuelta como condición inicial, y así sucesivamente para cada fila, hasta que el mapa de fase ha sido desenvuelto totalmente.

3.3.2. Desenvolvimiento de mapas de fase con una región conectada

Esta técnica se puede aplicar a mapas de fase que no abarcan todo el mapa, o que esta limitados por una región simple conectada. En este método se tiene que definir un cero para una función indicador, definida por

$$\sigma(x, y) = 0 \quad (3.8)$$

la cual existe en un dominio de datos de fase válidos (D), y se escoge un punto de inicio dentro del dominio de fase y se le asigna de forma arbitraria un valor de fase $\phi(x, y) = \phi_0$ y se considera el punto como desenvuelto; si el punto que se escogió no pertenece a la fase desenvuelta, se elige un punto adyacente y así sucesivamente. Este algoritmo solo desenvolverá cualquier región limitada dentro del dominio D que tenga un dato de fase envuelta válida.

3.3.3. Desenvolvimiento de mapas de fase con ruido

Este algoritmo para desenvolvimiento de fase, es uno de los algoritmos mas usados en el desenvolvimiento de mapas de fase inconsistentes [Ghiglia, et al (1994)]. Una inconsistencia en un mapa de fase representa una discontinuidad, o pérdida de información. Este método consiste en obtener un el gradiente de fase envuelta a la largo de la dirección x y la dirección y , lo que se representa por [Malacara, et al (1998)]:

$$\begin{aligned} \phi_x(x_i, y_j) &= V(\phi_w(x_i, y_j) - \phi_w(x_{i-1}, y_j)) \\ \phi_y(x, y) &= V(\phi_w(x_i, y_j) - \phi_w(x_i, y_{j-1})) \end{aligned} \quad (3.9)$$

Las diferencias de fase expresadas por la ecuación (3.9) están en un rango de $(-\pi, \pi)$, lo que indica que para el desenvolvimiento de fase, se integra el gradiente por el método de integración de mínimos cuadrados, para lo cual se hace uso de una función de costo, dada por

$$U(\phi) = \sum_{i=2}^N \sum_{j=2}^M [\phi(x_i, y_j) - \phi(x_{i-1}, y_j) - \phi(x_i, y_j)]^2 + \sum_{i=2}^N \sum_{j=2}^M [\phi(x_i, y_j) - \phi(x_i, y_{j-1}) - \phi(x_i, y_j)]^2 \quad (3.10)$$

La función de costo aplica para cuando tenemos un mapa de fase envuelto de campo completo. El suavizado es una información a priori que restringe la búsqueda de funciones de desenvolvimiento, lo que hace necesario agregar esta información al algoritmo de desenvolvimiento por un teorema de regularización [Marroquín (1995)].

3.3.4. Desenvolvimiento de mapas de fase por phase tracking regularizado

Este método consiste en encontrar dos patrones de franjas desplazados en fase a partir de la fase que se desea desenvolver, y se obtienen usando el seno y el coseno del mapa [Servín(1999), Marroquín (1999)] dado por

$$\begin{aligned} I_c(x, y) &= \cos[\phi_w(x, y)] \\ I_s(x, y) &= \text{sen}[\phi_w(x, y)] \end{aligned} \quad (3.11)$$

donde $\phi_w(x, y)$ es la fase del mapa que se desea desenvolver. En la técnica de phase tracking regularizado (RPT), se asume que una región de la imagen se considera lo suficientemente suave como para modelarse por un plano. Este plano de fase debe

adaptarse por sí mismo a cada región de la imagen en el espacio bidimensional del mapa de fase. La implementación de la técnica hace necesario la propuesta de una función de costo que es minimizada por la fase desenvuelta $\phi_0(x, y)$ en cada punto (x, y) esta dada por [Servín, et al (1999), Malacara, et al (1998)]

$$U(x, y) = \sum_{(\varepsilon, \eta) \in (N_{x,y} \cap L)} \left\{ \begin{array}{l} [I_c(\varepsilon, \eta) - \cos p(x, y, \varepsilon, \eta)]^2 \\ + [I_s(\varepsilon, \eta) - \text{sen}(x, y, \varepsilon, \eta)]^2 \\ + \lambda [\phi_0(\varepsilon, \eta) - p(x, y, \varepsilon, \eta)]^2 m(\varepsilon, \eta) \end{array} \right\} \quad (3.12)$$

$$p(x, y, \varepsilon, \eta) = \phi_0(x, y) + \omega_x(x, y)(x - \varepsilon) + \omega_y(x, y)(y - \eta) \quad (3.13)$$

Donde L es una ventana de una imagen bidimensional de datos de franjas válidos, $N_{x,y}$ es una región contigua de la coordenada (x, y) que está siendo desenvuelta y $m(x, y)$ es un indicador de campo (igual a uno si ha sido desenvuelta y cero en cualquier otro caso). Las funciones $\omega_x(x, y)$ y $\omega_y(x, y)$ son frecuencias locales, y λ es el parámetro de regularización que controla el suavizado de la fase desenvuelta detectada.

Mediante la aplicación del algoritmo de phase tracking regularizado sobre el mapa de fase obtenido experimentalmente, se hace la operación de desenvolvimiento de fase (unwrapping) [Servín (1994) y (1999)]. Mediante esta operación se recupera la forma de la membrana (gasket), como se muestra en la figura 3.5 (a) a partir del mapa de fase de 4 pasos y la figura 3.5(b) de un mapa de fase de 21 pasos. En la figura 3.6 se muestra el mapa de fase desenvuelta de la deformación, a partir del mapa de fase envuelta de 4 pasos.



(a)



(b)

Figura 3.5. Fase desenvuelta de la forma de la gasket a partir de un mapa de fase de(a) cuatro pasos y (b) veintiún pasos.

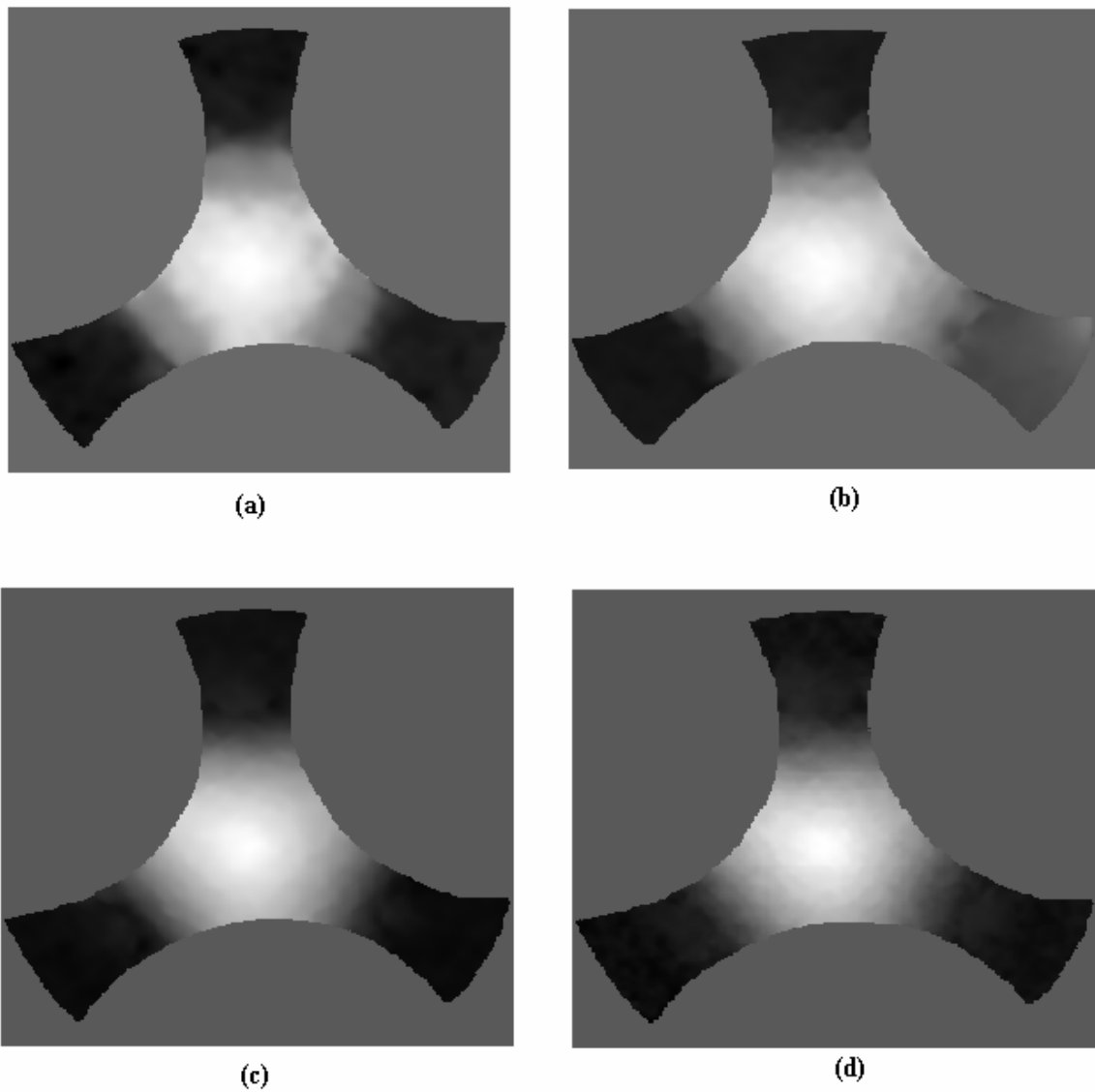


Figura 3.6. Mapa de fase desenvuelta de la deformación de la gasket de un mapa de fase de cuatro pasos, (a) 5 Volts($0.5 \mu\text{m}$), (b) 10 Volts($1 \mu\text{m}$), (c) 15 Volts($1.5 \mu\text{m}$), (d) 20 Volts ($2 \mu\text{m}$).

La recuperación de la forma tridimensional de la gasket, como ya se ha mencionado permite realizar mediciones a nivel de micras por medio de técnicas ópticas, a diferencia de métodos convencionales.

3.4. Conclusiones

El método de desenvolvimiento de fase depende exclusivamente del tipo de mapa de fase que se obtiene, si es de campo completo o presenta algunas zonas limitadas por una forma determinada. Como se menciona una de las limitantes en el desarrollo de las funciones de desenvolvimiento de la fase es la cantidad de suavizado, que traduce en pérdidas de información del objeto.

En el caso en particular de este trabajo, si se sobremuestra, la forma del gasket en sus orillas sufre un suavizado que no refleja la forma de los bordes reales de la gasket. Lo anterior produce un análisis iterativo del algoritmo, cuando se aplica sobre la fase obtenida, y evitar un suavizado excesivo, y recuperar la forma de la gasket, con un grado mínimo de error.

3.5. Referencias

Creath, K., Comparison of phase-measurement algorithms, Proc. SPIE, Vol. 680, pp. 19-28, 1986.

Creath, K. & Wyant, J. C., Holographic and Speckle Tests, Phase Shifting Interferometry, Cap. 15, en Optical Shop Testing, Malacara, D. John Wiley & Sons, Inc., New York. pp. 599-652, 1992.

Freischlad, K. & C. L. Koliopoulos, Fourier description of digital phase measuring interferometry, J. Opt. Soc. Am. (A), 7, pp. 542-551, 1990.

Ghiglia, D. C. & Romero, L.A., Robust two dimensional weighted an unweighted phase unwrapping that uses fast transform and iterative methods, J.O.S.A. A, Vol.11, pp. 107-117, 1994.

Greivenkamp, J. E. & Bruning, J. H., Phase Shifting Interferometry, Cap. 14, en Optical Shop Testing, Malacara, D. John Wiley & Sons, Inc., New York. pp. 501-598, 1992.

Hariharan, P., Oreb, B. F. & Eiju, T., Digital phase-shifting interferometry: a simple error-compensating phase calculation algorithm, applied optics, Vol. 26, No. 13, pp. 2504-2506, 1987.

Hariharan, P., Digital phase-stepping interferometry: effects of multiply reflected beams, Vol. 26, No. 13, pp. 2506-2507,1987.

Joenathan, C., Phase-measuring interferometry new methods and error analysis, *Appl. Opt.*, Vol.33, No. 19, pp. 4147-4155, 1994.

Malacara, D., Servín, M. Y Malacara, Z., *Interferogram analysis for optical testing*; Ed. Marcel Dekker, Inc. U. S. A., 1998.

Marroquín, J. L. & Rivera, M., Quadratic regularization functionals for phase unwrapping, *J. Opt. Soc. Am. A*; Vol. 12, pp. 2393-2400, 1995.

Marroquín, J. L., Rivera, M., Botello, S., Rodríguez-Vera, R. & Servín, M., Regularization methods for processing fringe-pattern images, *Appl. Opt.*, Vol. 38, No. 5, pp. 788-794, 1999.

Martínez, Amalia, *Iluminación esférica en interferometría de moiré*, Tesis doctoral, Centro de Investigaciones en Óptica A.C., León, Guanajuato, México, 2001.

Rodríguez-Vera, R., *Some advances in optical contouring of diffuse objects using moiré and speckle techniques*, tesis doctoral, Loughborough University of Technology, 1993.

Servín, M., *Advanced techniques for fringe analysis*, tesis doctoral, Centro de Investigaciones en Óptica A. C., León, Guanajuato, México, 1994.

Servín, M., Cuevas, F. J., Malacara, D., Marroquín, J.L. & Rodríguez-Vera, R., Phase unwrapping through demodulation by use of the regularized phase-tracking technique, *Appl. Opt.*, Vol. 38, No. 10, pp. 1934-1941, 1999.

Surrel, Y., Design of algorithms for phase measurements by use of phase stepping, Appl. Opt., Vol. 35, No. 1, pp. 51-60, 1996.

Capítulo 4**Implementación de un interferómetro ESPI para topografía y detección de desplazamiento en una membrana gasket****4.1. Introducción**

En los capítulos anteriores se ha desarrollado la teoría que sustenta el trabajo experimental de esta tesis. En este capítulo se presentan los resultados experimentales obtenidos, teniendo como objeto de prueba un elemento de una gasket. Para la medición de la topografía del objeto, se utiliza la técnica de ESPI con iluminación dual. En el caso de detección de desplazamientos fuera de plano, se implementa la técnica de ESPI con un solo haz de iluminación. También se presenta un análisis cualitativo de la rigidez de la gasket, comparando los modos de vibración obtenidos contra los modos que presentan otros materiales. La parte complementaria de este capítulo consiste en el análisis e interpretación de los resultados obtenidos.

4.2. Detección de forma

La técnica de detección de forma fue descrita teóricamente, en el capítulo 2. En este se ha descrito el arreglo interferométrico con sensibilidad en plano, usando la técnica de rotación del objeto [Sirohi (1999), Joenathan, et al (1990)]. El arreglo interferométrico implementado se muestra en la figura 4.1. El arreglo se compone de un láser He-Ne con una longitud de onda (λ) de 632.8 nm, un divisor de haz (BS) con una relación de división 50/50, una lente con una distancia focal de 30 cm y diámetro de 8 cm, y un ángulo de incidencia (θ) de 59°.

El tamaño de la mota es de $22.72 \mu\text{m}$ (ecuación (1.4)), ya que $z = 79 \text{ cm}$, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ y $D = 22 \text{ mm}$ [Kreis (1996)]. El espejo 2 es desplazado por medio de un piezoeléctrico de Thorlabs (PE4) para poder aplicar la técnica de desplazamiento de fase.

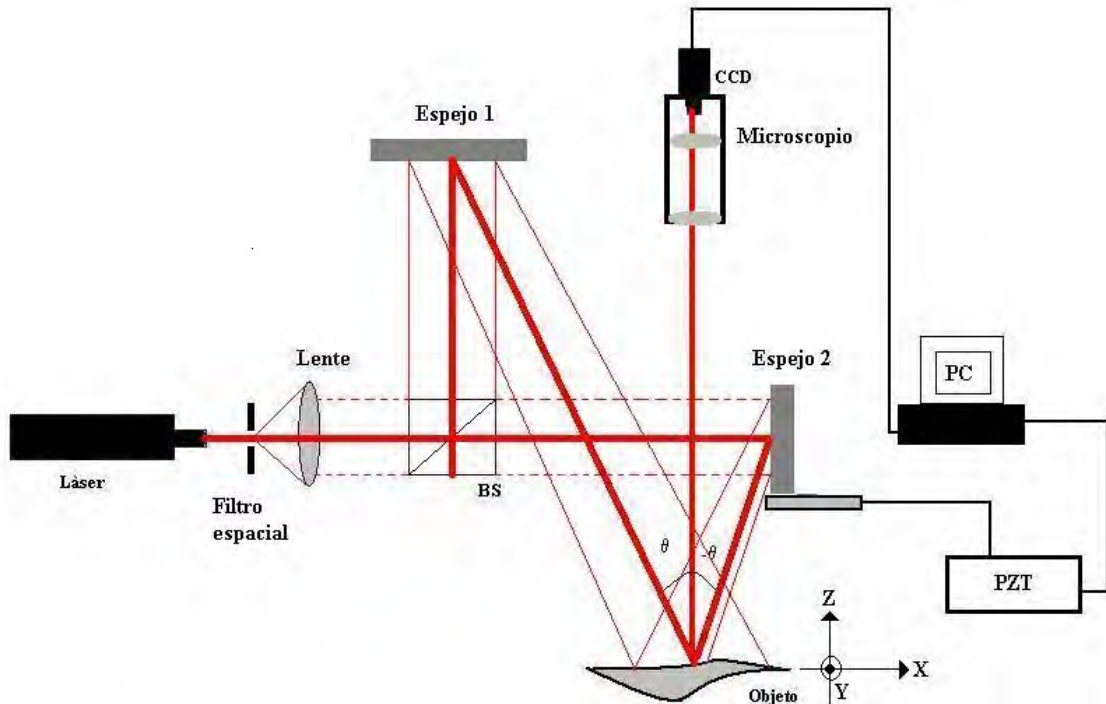


Figura 4.1. Interferómetro con iluminación dual implementado para la técnica de contorneo.

La técnica de contorneo se usa para determinar la forma del objeto y el grosor de la gasket [Joenathan, et al (1990)]. La gasket es iluminada por dos haces que inciden en un ángulo θ y $-\theta$, después se rota la gasket en un ángulo $w = 69.81 \times 10^{-6} \text{ rad}$ con respecto al eje “y”. Por medio de la CCD se capturan los interferogramas para realizar el procesamiento digital de imágenes. Se aplica el método de cuatro pasos con un desplazamiento en fase de $\frac{\pi}{2}$ [Malacara, et al (1998)], y el método para N pasos [Surrel (1993) y (1996)], con veintiún pasos, para obtener la fase envuelta del objeto. Aplicando

el algoritmo de phase tracking regularizado [Servín, et al (1999)], se obtiene la fase desenvuelta de la gasket; una vez que se tiene la fase desenvuelta se aplica la información obtenida a la ecuación (2.7), y se obtiene

$$h(x, y) = 0.71mm \quad (4.1)$$

lo cual corresponde al espesor del objeto bajo estudio. El valor anterior representa un valor muy aproximado a la medida obtenida en el laboratorio de metrología dimensional, obtenido con la máquina de medición por coordenadas (MMC), es de $h(x,y) = 0.7202$ mm. El porcentaje de error que se tiene con respecto a la medición de la MMC, esta dado por:

$$\%error = \frac{h(x, y)}{h_r(x, y)} x 100 \quad (4.2)$$

El porcentaje de error obtenido en esta prueba interferométrica es del 1.4 %, con respecto a la medición, proporcionada por la MMC del laboratorio de metrología dimensional. El error que se induce es mucho menor, ya que los desplazamientos se realizan por medio de una montura controlada por un motor a pasos. Lo anterior disminuye el error que se induce cuando la rotación y el desplazamiento se hacen manualmente, dado que el valor del ángulo de rotación es muy pequeño. La figura 4.2 muestra el gráfico de la forma recuperada de la gasket usando la técnica de contorno por iluminación dual, donde también se aprecia la altura o grosor de la gasket.

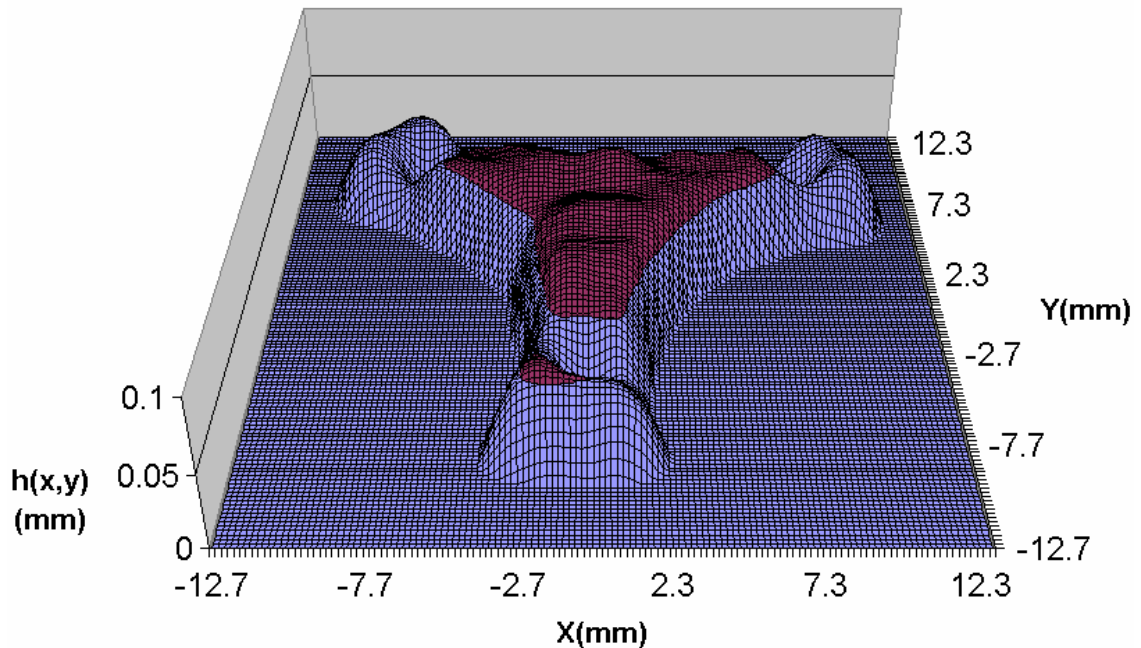


Figura 4.2. Forma recuperada de la gasket por ESPI, usando un interferómetro con iluminación dual.

4.3. Detección de deformaciones

En la sección anterior se detecta la topografía de la gasket mediante la técnica de ESPI utilizando iluminación dual colimada. La información de la topografía es necesaria en el cálculo de las componentes del vector de sensibilidad (ecuaciones 1.22), para el cálculo de las deformaciones en la ecuación (1.20). Se induce una deformación sobre la pieza, aplicando una carga estática por medio de un piezoeléctrico (PZT). El arreglo interferométrico empleado para detección de deformaciones o desplazamientos en la dirección del eje Z (fuera de plano) se muestra en la figura 4.3, el cual es un arreglo para interferometría de moteado (ESPI) con un haz de iluminación. El haz de luz láser ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) es colimado por la lente, la cual tiene una distancia focal de 30 cm. El haz de

luz colimado incide en el divisor de haz (BS), donde se divide en el haz objeto y el de referencia, en una relación 50/50. Se toman dos imágenes que corresponden a la intensidad antes y después de aplicar la deformación al objeto de prueba. El patrón de interferencia obtenido es grabado digitalmente por la cámara CCD que esta montada en el microscopio stereo (Stemi 2000-C). La deformación del objeto es inducida por el piezoeléctrico PE4 de Thorlabs, que presenta un desplazamiento máximo de 15 μm , cuando se le aplica un voltaje de 0-150 Volts, por medio del controlador MDT694 de Thorlabs.

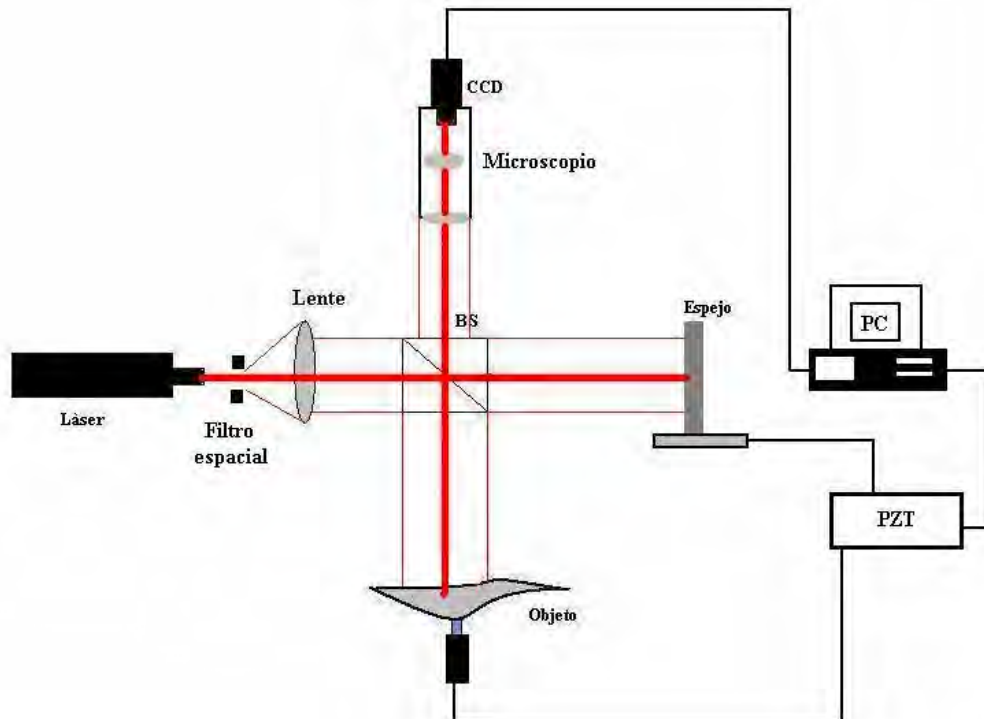
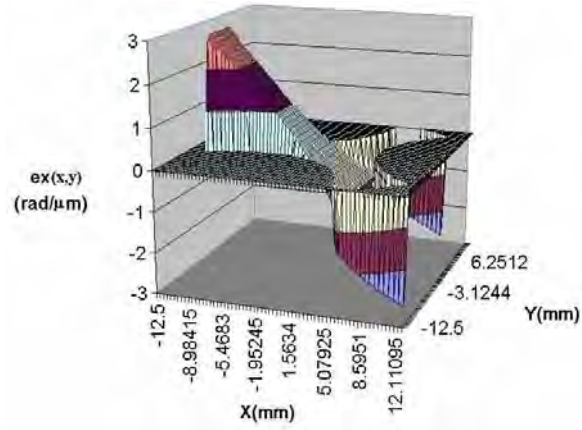


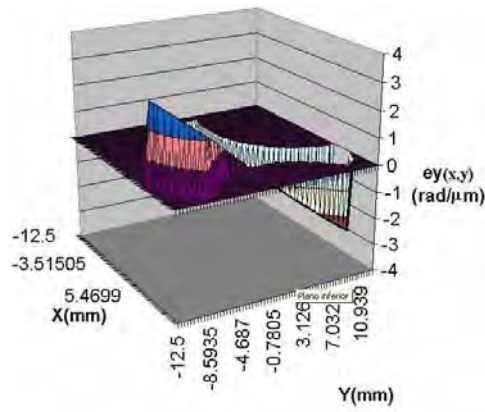
Figura 4.3. Interferómetro con un haz de iluminación implementado para detección de deformaciones.

Utilizando la fase desenvuelta presentada para cada caso, en el capítulo 3 en las figuras 3.6 y haciendo el cálculo de las componente de vector de sensibilidad (ecuaciones 1.25) para el caso de un solo haz de iluminación colimado, es posible entonces el cálculo de la deformación inducida por el piezoeléctrico en la gasket [Martínez, et al (2004); Puga, et al (2002)]. Las componentes del vector de sensibilidad en el sistema con sensibilidad fuera del plano, quedan determinadas por la posición de la fuente de iluminación ($P(x_s, y_s, z_s)$) donde x_s, y_s, z_s corresponden a las coordenadas asociadas a cada punto en la lente colimadora; el punto de observación ($P(x_o, y_o, z_o)$) y el punto objeto ($P(x_p, y_p, z_p)$). En el sistema experimental las coordenadas de la fuente de iluminación asociadas al centro de la lente son (0, 0, -79 cm), mientras que para el punto de observación $P(x_o, y_o, z_o)$ están dadas por (0, 0, 37.3 cm); las coordenadas del objeto $P(x_p, y_p, z_p)$, son los datos obtenidos de la topografía de la gasket. Las componentes del vector de sensibilidad se muestran en la figura 4.4. De estas figuras se observa que las componentes del vector de sensibilidad no son constantes, suposición que siempre se hace al implementar un sistema fuera de plano e iluminación colimada.

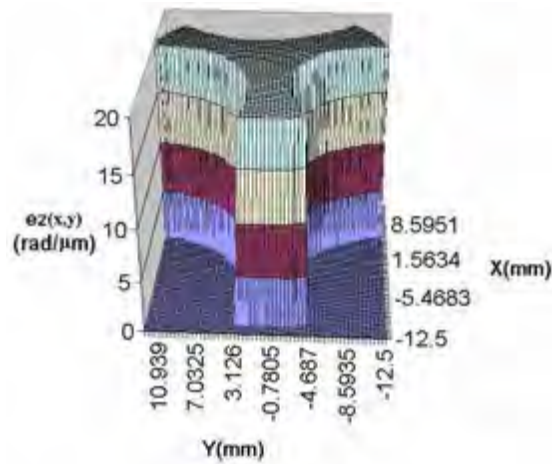
El piezoeléctrico (PZT) está caracterizado de tal forma que se asocia a cada voltaje aplicado por medio del controlador, un desplazamiento en el piezoeléctrico, el cual provoca la deformación aplicada a la gasket. En párrafos posteriores se presentan un gráfico de curvas comparativas entre el valor teórico de desplazamiento y el valor experimental, medido por medio de la técnica óptica descrita.



(a)



(b)

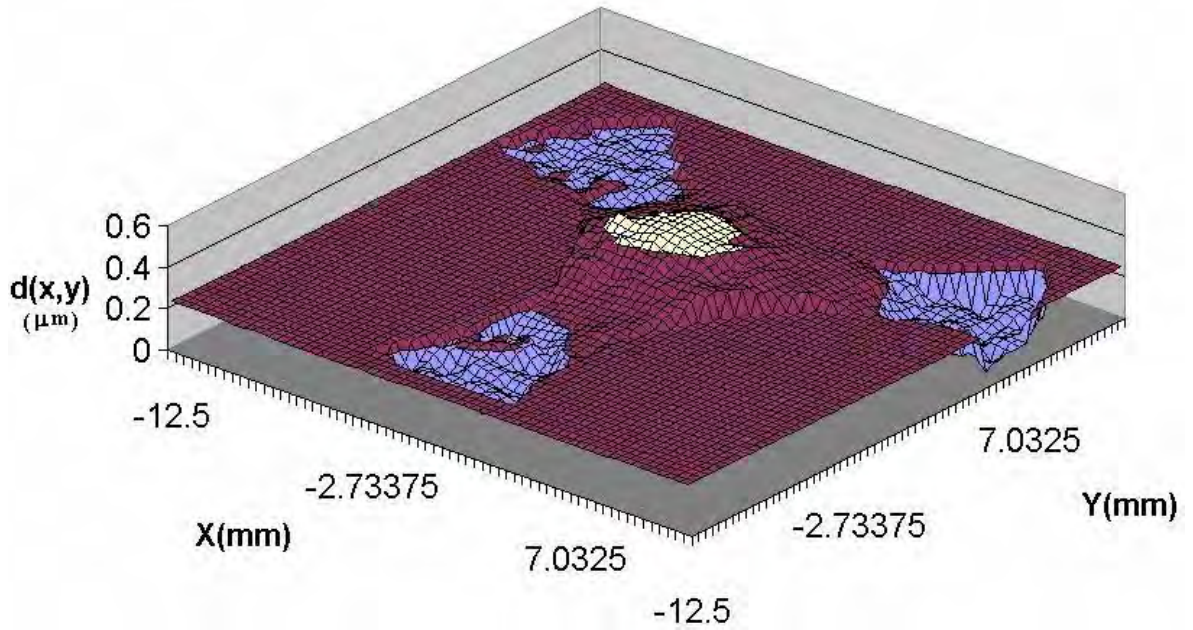


(c)

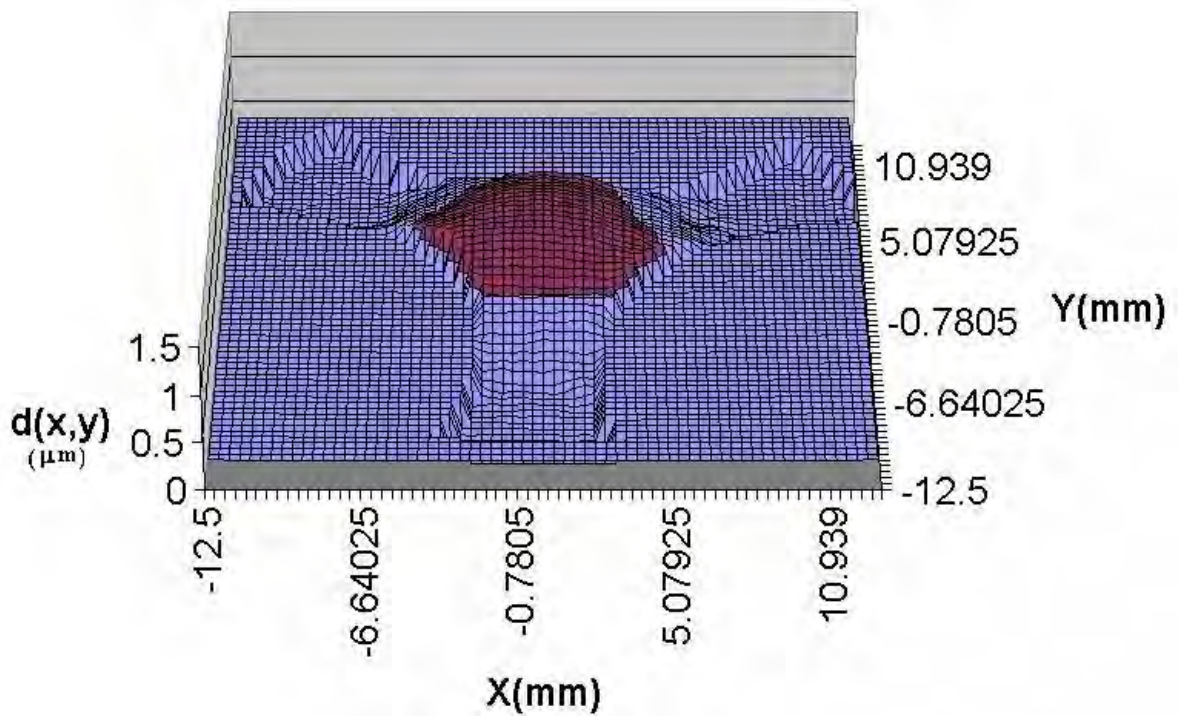
Figura 4.4. Componentes del vector de sensibilidad para un interferómetro tipo Michelson (a) $e_x(x,y)$, (b) $e_y(x,y)$ y (c) $e_z(x,y)$.

Entonces tenemos que el desplazamiento que se produce sobre la gasket es dependiente del voltaje del piezoeléctrico, ya que la cantidad que el piezoeléctrico se desplaza es la deformación que se presenta en la dirección Z del sistema, es decir, es la deformación inducida.

En la figura 4.5 (a) se presenta el desplazamiento de la gasket al aplicar un voltaje igual a 5 Volts, el cual equivale a un desplazamiento de 0.5 micras, y en esta gráfica se muestra que experimentalmente solo se deforma al objeto en una cantidad de $0.458 \mu m$. De igual forma al aplicar un voltaje de 10 volts, solo se detecta una deformación de $0.806 \mu m$, mientras que teóricamente se espera que el desplazamiento sea igual a $1 \mu m$. Este desplazamiento es mostrado en la figura 4.5 (b), donde se aprecia claramente el desplazamiento aplicado en la gasket. En este par de mediciones se empieza a observar el efecto de la rigidez del material, el cual no permite que el desplazamiento teórico se cumpla. En la figura 4.6 (c) y (d) se muestran los resultados experimentales cuando se aplica un desplazamiento de 1.5 y $2 \mu m$, respectivamente; experimentalmente los valores detectados corresponden a $d = 1.10 \mu m$ y $d = 1.32 \mu m$. Los valores registrados para esto desplazamientos, evidentemente son mucho menores, que los esperados teóricamente, lo cual hace patente la rigidez y resistencia de la gasket a la deformación. La rigidez del material que constituye la gasket esta totalmente justificada, ya que de acuerdo a las presiones que pueden ser aplicadas dentro de la DAC (del orden de MPa), esto produciría la fractura de la pieza bajo estudio y por consecuencia de los diamantes usados.

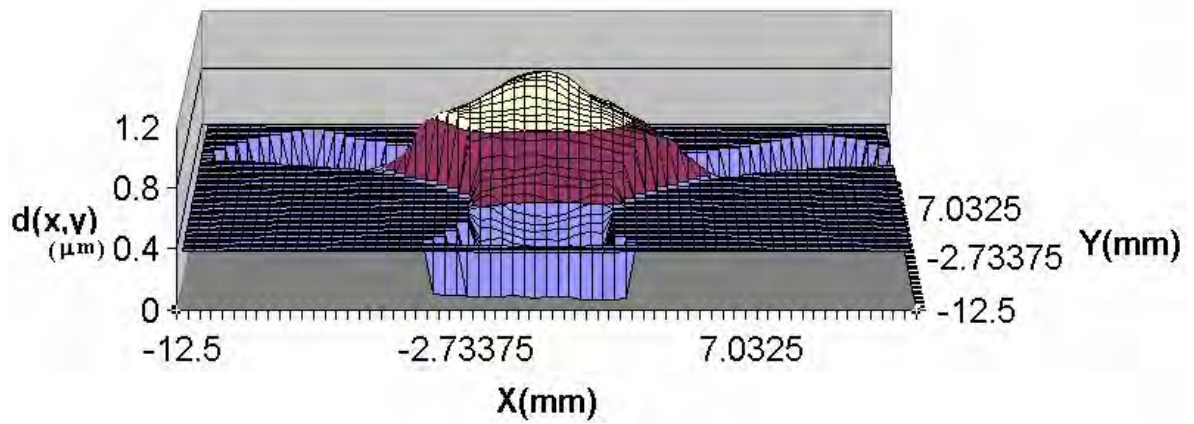


(a)

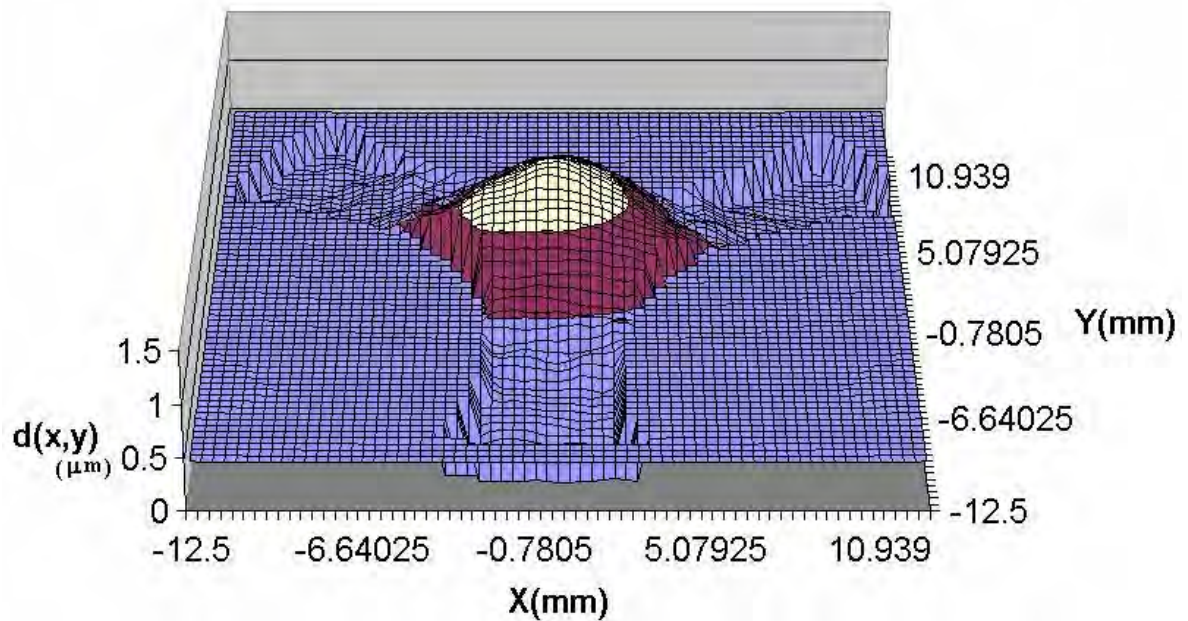


(b)

Figura 4.5. Desplazamiento en el eje Z con respecto a la gasket, al aplicar carga estática por medio del PZT, al aplicar un voltaje de (a) 5 Volts y (b) 10 Volts.



(a)



(b)

Figura 4.6. Desplazamiento en el eje Z con respecto a la gasket, al aplicar carga estática por medio del PZT, al aplicar un voltaje de (a) 15 Volts y (b) 20 Volts.

En la figura 4.7 se presenta un gráfico de los desplazamientos aplicados, por medio del PZT, al aplicar voltaje sobre la gasket, al mismo tiempo que se muestra la curva de los desplazamientos medidos experimentalmente. La tercera curva que se presenta es simplemente la diferencia entre los valores del desplazamiento teórico y el valor experimental que se determino por medio del vector sensibilidad [Martínez, et al (2004), Puga, et al (2002)]. De la figura 4.7 se puede deducir que el desplazamiento no es lineal como se esperaría en forma teórica, esto es debido a la rigidez , y por lo tanto se resiste a ser deformada la gasket.

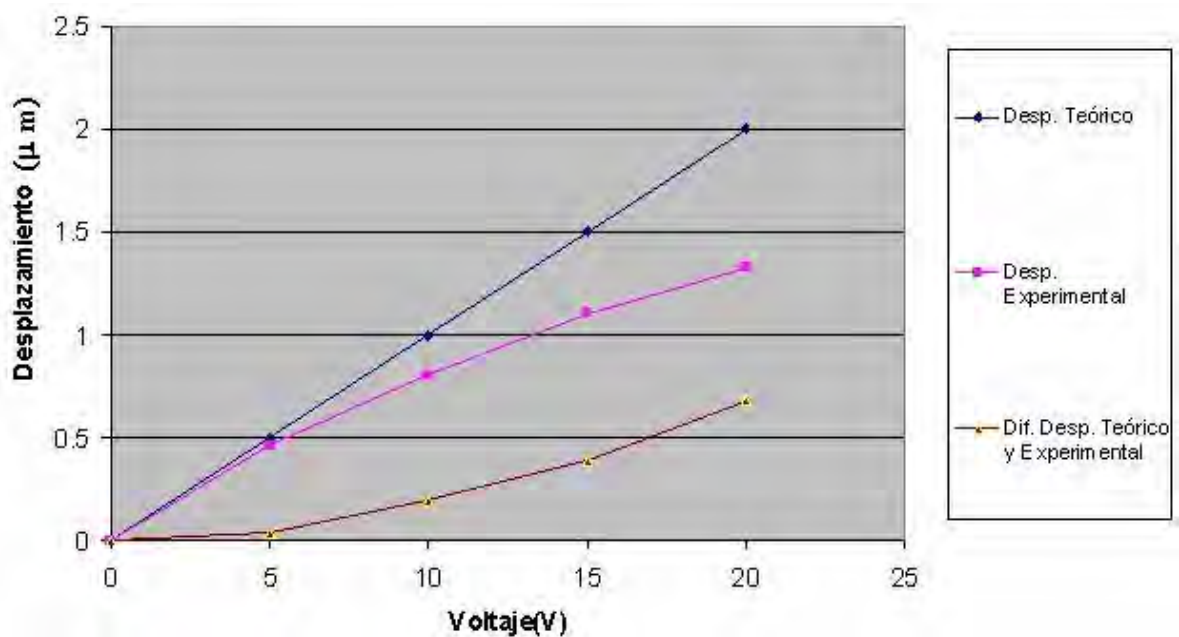


Figura 4.7. Curva de desplazamiento contra voltaje aplicado por el PZT sobre la gasket.

4.4. Análisis cualitativo de vibración

En esta parte del trabajo de tesis se busca justificar la rigidez del material de la gasket, provocando que el objeto entre resonancia. El arreglo implementado para la detección de los modos de vibración se muestra en la figura 4.8. El arreglo consiste en una montura que sujeta el objeto por sus tres extremos, un bocina que induce las vibraciones sobre el objeto, al emitir una frecuencia de audio, la cual es producida por el generador de frecuencias de audio (GFA). El rango de frecuencias de audio usado va desde los cientos de Hertz hasta los kiloHertz.

Los modos de vibración detectados son capturados por el microscopio, que tiene la cámara CCD para digitalizar las imágenes de los modos de vibración.

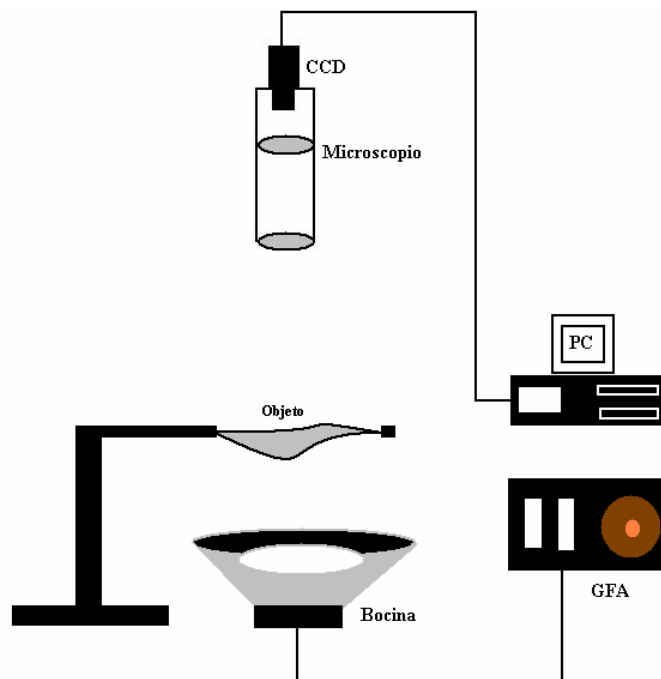


Figura 4.8. Arreglo experimental para detección de modos de vibración del objeto en estudio.

Una vez que se coloca la gasket en el arreglo de la figura 4.8, fue sometido a frecuencias de audio hasta localizar los modos de vibración de la gasket. El resultado y conclusión que produjo la realización de esta prueba, ayudo a reforzar la teoría de que por la rigidez del material no podía entrar en resonancia la gasket. Lo anterior era de esperarse por los resultados previos obtenidos en el análisis de deformaciones, la figura 4.9 presenta la imagen que la gasket presento durante el desarrollo de la prueba. Como resultado de esta prueba, no se obtuvieron modos de vibración para la gasket, dada la rigidez del acero.



Figura 4.9. Comportamiento de la gasket sometida a frecuencias de audio, para la detección de modos de vibración.

El resultado nulo de la prueba motivo a presentar una comparación contra membranas de distintos materiales, siendo los materiales utilizados látex, aluminio y plástico rígido, este último se asemeja en su comportamiento al material de la gasket (acero inoxidable). Así pues cada una de las membranas fue sometida a la misma prueba, donde se le

aplicaban distintas frecuencias de audio, las cuales permitían la detección de los modos de vibración que presenta cada material. En la figura 4.10, se muestran los modos de vibración que presenta la membrana de látex, siendo este material el que menos resistencia presenta para entrar en resonancia, y por consecuencia presenta mayor número de modos. En el rango de 0 Hz hasta 1 kHz, presenta un modo en una frecuencia de 440 Hz; tres modos en 612 Hz, cuatro modos en 675 Hz y tres modos en 711 Hz, en dirección opuesta a los modos de vibración en 612 Hz de frecuencia. Estos modos de vibración son mostrados en la figura 4.10(a), (b), (c), (d) respectivamente. En el rango de frecuencia correspondiente a los Hertz, se detectaron cinco modos de vibración, en una frecuencia de 1.05 kHz (figura 4.10 (f)). La figura 4.10 (e) muestra un modo no definido totalmente, pero se incluye porque a partir de este modo vibración, en una frecuencia de 850 Hz, se definen los cinco modos de vibración antes citados.

En la misma forma la membrana de aluminio fue sometida a vibración, en el rango de 0 Hz hasta 1 KHz, se presenta un modo de vibración en 290 Hz y 480 Hz, como se presenta en la figura 4.11 (a) y (b). En la frecuencia de 2.85 kHz se presentan dos modos de vibración, mientras que se detectan tres modos en las frecuencias de 3.9 kHz y 4 kHz (figura 4.11 (c), (d) y (e)). De igual forma se presenta en la figura 4.11 (f) seis modos de vibración detectados a una frecuencia de 5.4 kHz en la membrana de aluminio.

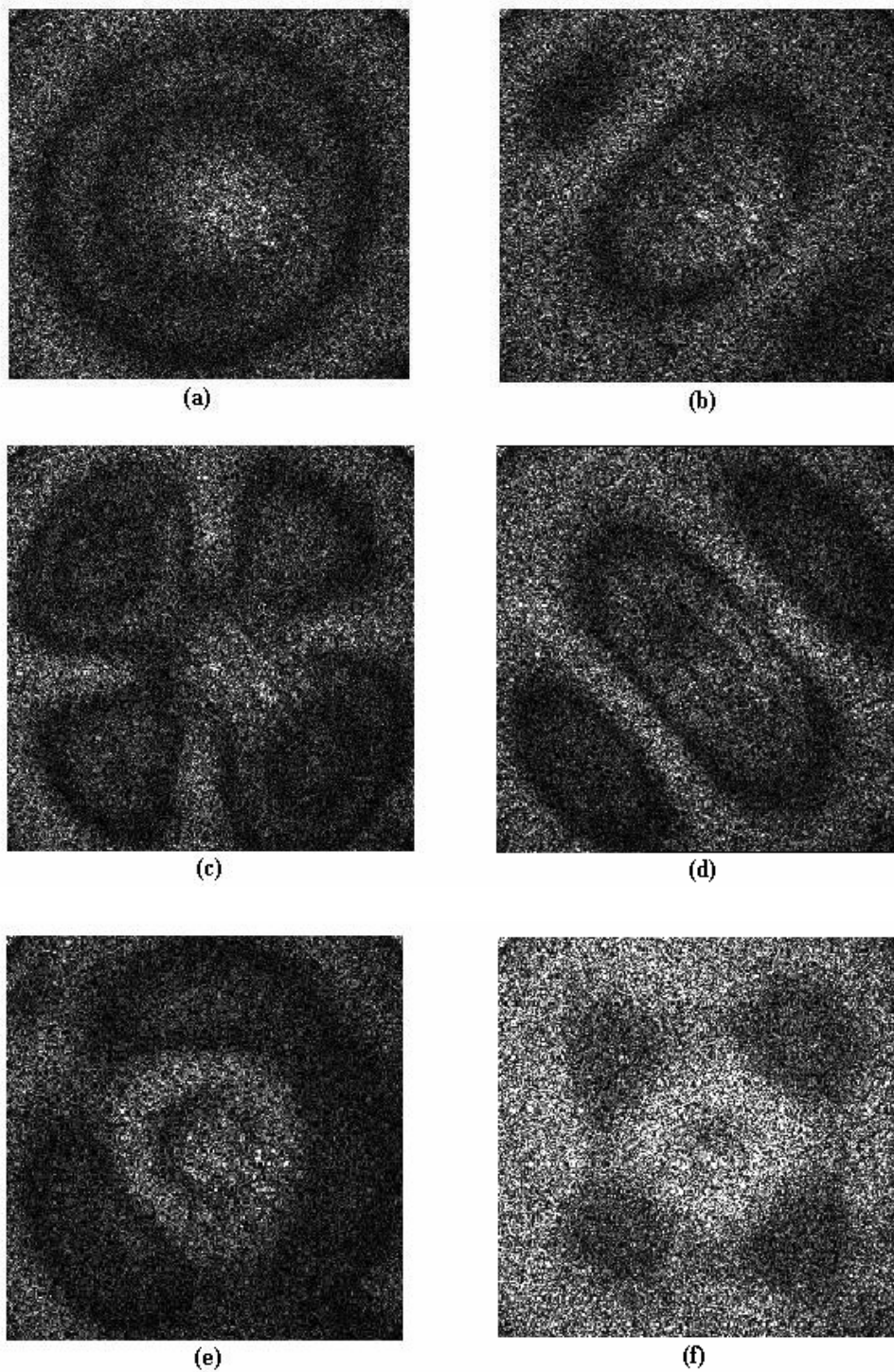


Figura 4.10. Modos de vibración obtenidos para una membrana de látex sometida a frecuencias de resonancia de (a)440 Hz ,(b) 612Hz,(c)675 Hz, (d)711 Hz, (e) 850 Hz, (f) 1.05 kHz.

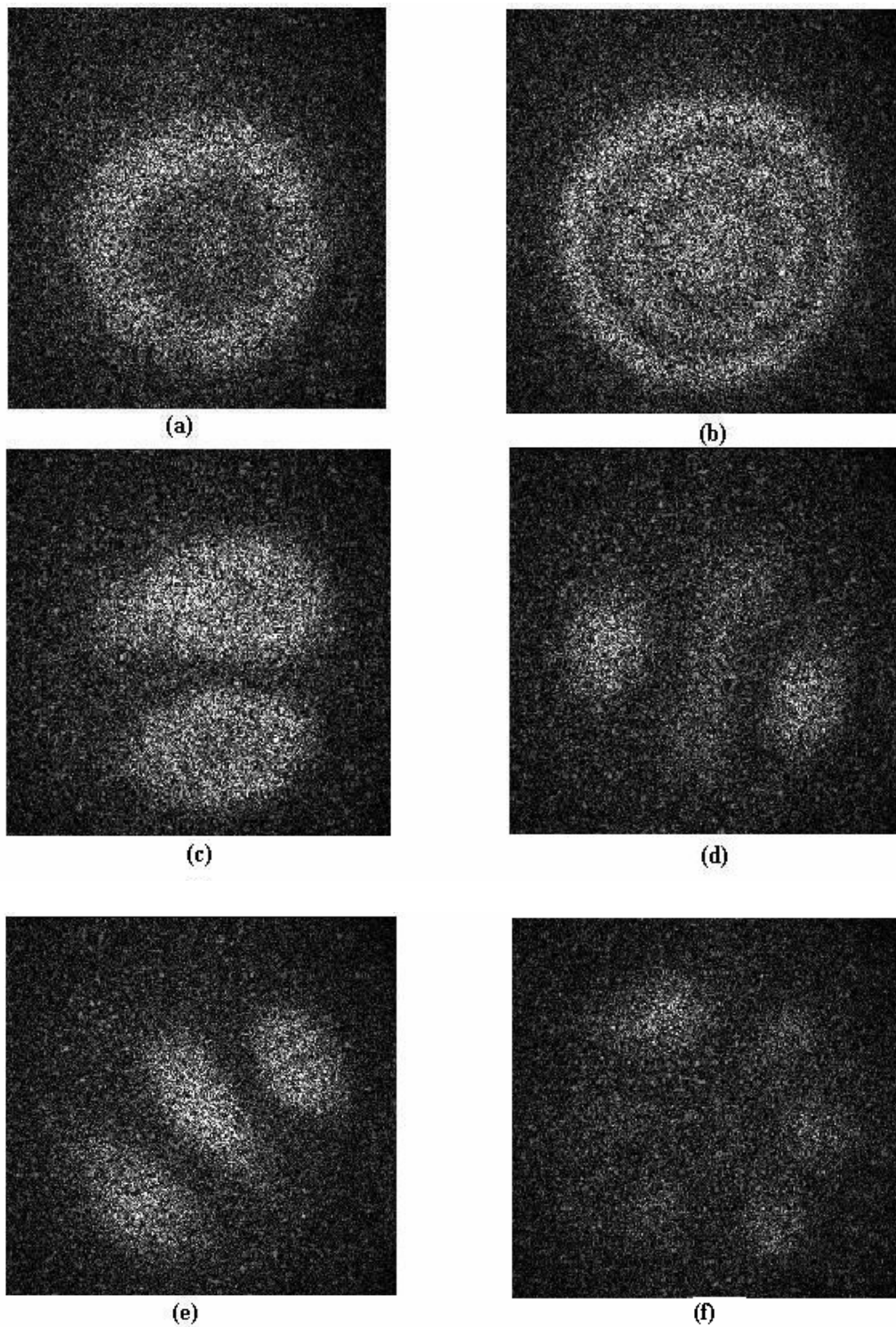


Figura 4.11. Modos de vibración obtenidos para una membrana de aluminio sometida a frecuencias de resonancia de (a) 290 Hz, (b) 480 Hz ,(c)2.85 kHz, (d) 3.9 kHz, (e) 4 kHz, (f) 5.4 kHz.

A diferencia de las membranas de látex y aluminio, las cuales presentan múltiples modos de vibración a distintas frecuencias, en la cuales estos materiales entran en resonancia; el plástico y el acero de la gasket no muestran esta característica en la misma forma.

La membrana de plástico al ser sometida a frecuencias de audio solo presenta un modo de vibración, en el rango de los cientos de Hertz, este modo se detecta en frecuencias de 125 Hz y 240 Hz. Al someter el plástico a frecuencias mayores no se detecta modo alguno de vibración, a diferencia del látex y el aluminio que presentan múltiples modos de vibración. La figura 4.12 muestra el único modo de vibración que presenta el plástico en la frecuencias antes mencionadas.

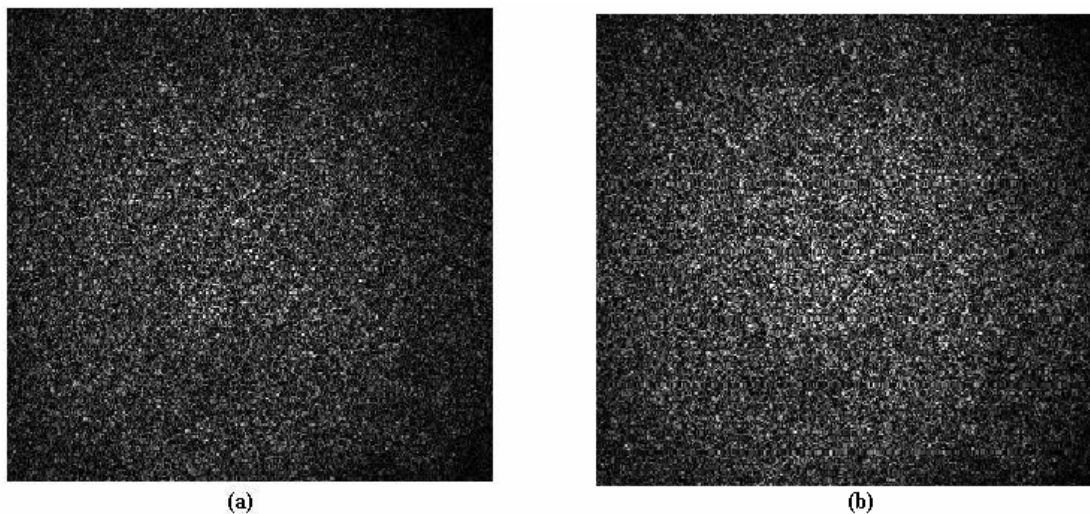


Figura 4.12. Modos de vibración obtenidos para una membrana de plástico rígido sometida a frecuencias de resonancia de (a) 125 Hz,(b) 240 Hz.

Cabe aclarar que el análisis por vibración presentado no es el tema esencial de este trabajo, por lo que queda el análisis matemático y teórico de esta técnica para un trabajo futuro, que ayude a encontrar y sustentar este análisis de la gasket.

4.5. Discusión y análisis de los resultados experimentales

Los resultados presentados en este capítulo, permiten obtener medidas del orden milimétrico, micrométrico y hasta algunos nanómetros. En la detección de forma como se presentó, se hace una comparación de la medida obtenida usando ESPI, y la medida detectada por la MMC, donde como se reportó existe un porcentaje de error (1.4 %). Este porcentaje de error exige una re-calibración del sistema para lograr compensar dicho nivel de error; esta compensación tiene múltiples implicaciones, como la reducción del error humano que afecta considerablemente las mediciones. El mejoramiento del sistema interferométrico implica una automatización del mismo, ya que con esto se reduce la variación en los desplazamientos en fase y posición del objeto (rotación), así como en el grabado de los interferogramas, que incrementarían su calidad notablemente. Profundizando en el tema del ángulo de rotación del objeto en la técnica de contorno, el valor de dicho ángulo es muy crítico, ya que solo es de algunos minutos de arco, y lograr este desplazamiento manualmente, resulta casi imposible. Esto hace necesario que el desplazamiento angular de la pieza se tenga que hacer con una plataforma desplazada por un motor a pasos que evita la decorrelación de las franjas de interferencia. Aunque corregir los errores físicos del sistema de detección de topografía disminuye considerablemente el error inducido a las mediciones, es importante también considerar el tratamiento computacional que se aplica a los interferogramas obtenidos. Lo anterior implica encontrar el nivel adecuado de filtrado, lo que evita pérdida de información importante que pudiese tener el mismo nivel de intensidad que el ruido presente el interferograma. Todas las cuestiones mencionadas en los párrafos anteriores implican una mejoría muy notable, que el nivel microscópico es de suma importancia, a diferencia del mundo macroscópico, en el cual se pudiesen inclusive despreciar estos valores.

Las implicaciones de error para la técnica de contorno, se deben considerar con la misma importancia para la técnica de medición de deformaciones; ya que afecta de la misma forma en la cuantificación en unidades reales de dichos desplazamientos. En los resultados experimentales obtenidos para la deformación inducida por medio del PZT, que actúa sobre la gasket, se observa que los valores medidos para los desplazamientos experimentales difieren de los valores teóricos. Los valores teóricos se conocen previamente, ya que el piezoeléctrico se ha caracterizado previamente a las pruebas de deformación de la gasket. Es por esta razón que entra en el análisis de la gasket, la rigidez que presenta el material, el cual evita que las deformaciones no alcancen los valores esperados, ya que el material presenta una resistencia mayor que la cantidad de desplazamiento deseado. La rigidez del material para desplazamientos de varias micras, presenta una serie de datos que no corresponden a los desplazamientos teóricos, esto se puede entender de la siguiente forma, el nivel de deformación plástica se sobrepasa. Al sobrepasar el nivel de plasticidad del material el material no recupera su posición original y por lo tanto las mediciones posteriores son erróneas, y no corresponden al valor teórico.

Como complemento de las pruebas que fueron aplicadas a la gasket se somete a vibración, en esta prueba se somete al objeto frecuencias de audio, hasta que se alcanza la frecuencia de resonancia. En el resultado obtenido experimental no se logra encontrar modo de vibración alguno en la gasket, esto motiva la comparación contra materiales con menor rigidez al acero y buscar una justificación para los valores de desplazamiento obtenidos. Al encontrar que materiales tan maleables como el látex y la oblea de aluminio presentan múltiples modos de vibración en distintas frecuencias, se usa un material que presenta mayor rigidez (plástico), el cual es muy rígido pero muy quebradizo, como las cerámicas. El plástico presenta una rigidez mayor que el látex y el

aluminio y tiende a comportarse como el acero de la gasket, en esta parte como se aclaró sólo es una análisis comparativo, por lo que queda pendiente hacer el análisis teórico y matemático de vibraciones, al igual que la automatización y calibración del sistema.

4.6. Conclusiones

Se presentan los resultados experimentales de la técnica de contorno por rotación del objeto, así como el cálculo de desplazamientos fuera de plano para la membrana metálica (gasket) bajo estudio, mediante el uso de sistema ESPI. Usando la técnica de contorno ESPI se determinó la altura (espesor) de la gasket, presentando el error de la medición por medios ópticos con respecto a la medición proporcionada por la máquina de medición por coordenadas.

La determinación de desplazamiento inducido por el piezoeléctrico, se cuantifica por medio de la obtención de la fase y el cálculo de las componentes del vector de sensibilidad en el caso de iluminación plana.

La rigidez del acero que compone la gasket evita que el material se deforme por carga estática mas de 1.4 micras para el esfuerzo aplicado, y esta teoría es reforzada por el análisis cualitativo y comparativo de vibración. El análisis de vibración teórico y práctico queda como parte del trabajo futuro de este trabajo de tesis, así mismo la automatización del sistema para desplazamientos fuera de plano.

4.7. Referencias

Joenathan, C., Pfister, B & Tiziani, H.J., Contouring by electronic speckle pattern interferometry employing dual beam illumination, *Appl. Opt.*, Vol. 29, No. 13, 1905-1911, 1990.

Kreis, T.(1996), *Holographic Interferometry: Principles and Methods*, Akademie Verlag. Germany, 1996.

Malacara, D., Servín, M. Y Malacara, Z., *Interferogram analysis for optical testing*; Ed. Marcel Dekker, Inc. U. S. A., 1998.

Martínez, Amalia, Rayas, J.A., Rodríguez-Vera, R. & Puga, H.J., *Sistemas ópticos para el análisis de componentes mecánicas: ESPI, moiré geométrico e interferometría de rejilla*, III simposio “La óptica en la industria”, Tonantzintla, Puebla, México, 2003.

Martínez, Amalia, Rayas, J.A., Rodríguez-Vera, R. & Puga, H.J., Error in the measurement due to the divergence of the object illumination wavefront for in plane interferometers, *Opt. Comm.*, 223, pp. 239-246, 2003.

Martínez, Amalia, Rayas, J.A., Rodríguez-Vera, R. & Puga, H.J., Three-dimensional deformation measurement from the combination of in-plane and out-of-plane electronic speckle pattern interferometers, *App.Opt.*, 43, No.24, 2004.

Puga, H. J., Rodríguez-Vera, R. & Martínez, A., General model to predict errors in phase map interpretation and measurement for out of plane ESPI interferometers, *Optics & Laser Technology*, 34, pp. 81-92, 2002.

Servín, M., Cuevas, F. J., Malacara, D., Marroquín, J.L. & Rodríguez-Vera, R., Phase unwrapping through demodulation by use of the regularized phase-tracking technique, *Appl. Opt.*, Vol. 38, No. 10, pp. 1934-1941, 1999.

Sirohi, R.S. & Siong Chau, F., *Optical methods of measurements: wholefield techniques*, Ed. Marcel Dekker, Inc. U.S.A., 1999.

Surrel, Y., Phase Stepping: a new self-calibrating algorithm, *Appl. Opt.*, Vol. 32, No. 19, pp. 3598-3600, 1993.

Surrel, Y., Design of algorithms for phase measurements by use of phase stepping, *Appl. Opt.*, Vol. 35, No. 1, pp. 51-60, 1996.

Capítulo 5**Conclusiones generales y trabajo futuro**

En este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas de los resultados presentados en este trabajo de tesis.

5.1. Conclusiones generales

i. Se presentó un análisis teórico y experimental de la interferometría de moteado (ESPI), en el caso de iluminación colimada, para detección de forma y deformaciones de una gasket.

ii. Del análisis de las componentes del vector de sensibilidad para el sistema interferométrico con sensibilidad fuera de plano e iluminación colimada se obtuvo que las componentes de sensibilidad no son constantes.

iii. Así mismo se ha presentado la determinación de forma y altura de la membrana metálica, por medio de un sistema ESPI, utilizando iluminación dual colimada. Se obtiene el porcentaje de error de la medición de la altura entre la medición por medios ópticos y la obtenida por la Máquina de Medición por Coordenadas (MMC), del laboratorio de metrología dimensional del CIO.

iv. Se presentaron y reportaron los resultados experimentales de los desplazamientos aplicados a la gasket. El sistema óptico empleado consiste en un sistema sensible fuera de plano. Se muestra la diferencia entre el valor teórico del desplazamiento y el valor

experimental obtenido. Se presenta un gráfico que contiene la curva del comportamiento del desplazamiento teórico y la curva de desplazamientos experimentales. Dentro de la misma curva se grafica la diferencia existente entre el desplazamiento teórico y práctico.

v. Se presentó un análisis cualitativo de modos de vibración del material de la gasket bajo estudio, con respecto a otros materiales que no presentan el mismo nivel de rigidez, y que por lo tanto se pueden deformar con mayor facilidad, que el acero de la gasket.

vi. El microscopio estereo es utilizado para cubrir un campo de observación centímetros, en específico, para detectar objetos de dimensiones de varios milímetros y/o varias micras.

5.2. Trabajo futuro

i. Se presentó un sistema para detección de forma por iluminación dual, así como un sistema para detección de desplazamiento fuera de plano, falta por automatizar el sistema óptico. Esto es a partir del mismo arreglo interferométrico por desplazamiento de plataformas o bases se pueda pasar de un interferómetro de iluminación dual (detección de forma) a un interferómetro tipo Michelson (detección de desplazamiento).

ii. Se pretende la automatización de la aplicación de la rotación del objeto y captura del número de interferogramas necesarios para la obtención de forma en unidades reales, con una calibración previa.

iii. Se presentó un análisis meramente cualitativo mediante los modos de vibración, por lo que para trabajo futuro queda la realización del sustento teórico, matemático y experimental para determinar, propiedades mecánicas (rigidez, dureza, etc.) de la gasket.

iv. Uno de los objetivos futuros es la caracterización de Micro Electro Mechanicals Systems (MEMS), tanto en obtención de forma y deformación de estas piezas de nivel microscópico, en donde la técnica a nivel microscópico no tendría la misma resolución.

Apéndice A

Hoja de datos técnicos PZT PE4 de Thorlabs®

COPYRIGHT © 1999 by THORLABS INC.

PE4

COARSE 4mm (MECHANICAL)
FINE 15µm (SEPARATE @150V)

THORLABS		PO BOX 3068 NEWTON NJ	
TITLE ADJUSTER BODY		PIECE USED	
PCL NUMBER: 40001320 ← 5070 (AMERICAN) ← 427			
MATERIAL: 303 STAINLESS			
SYMBOL	UNIT	APPROVAL	PIECE
TD	AC	REV	DATE
DATE	REV	BY	OF
06/26/99	A	A	1 OF 1
DWG NO.	PIEC NO.		
0056-EDM	PE4		

INFORMATION ONLY, NOT FOR MANUFACTURING

Apéndice B

Trabajos derivados del proyecto de tesis

B.1 Participación en congresos

1. Interferometría de moteado en la detección de deformaciones fuera de plano en una membrana metálica.

Daniel D. Aguayo, J. A. Rayas, J. Mauricio Flores M., R. Rodríguez-Vera, Amalia. Martínez

1er encuentro participación de la mujer en la ciencia.

León, Gto., Mayo 2004.

2. Interferometría De Moteado En La Detección De Deformaciones Fuera De Plano En Una Membrana Metálica.

Daniel D. Aguayo, J. A. Rayas, J. Mauricio Flores M., R. Rodríguez-Vera, Amalia Martínez

Taller de procesamiento digital de imágenes y óptica.

Guanajuato, Gto. Junio de 2004.

3. Recuperación de contorno y relieve de objetos mediante proyección de autoimágenes.

J. Mauricio Flores M, J. A. Rayas, Daniel D. Aguayo, R. Rodríguez-Vera, Amalia. Martínez

1er encuentro participación de la mujer en la ciencia.

León, Gto., Mayo 2004.

4. Recuperación de contorno y relieve de objetos mediante proyección de autoimágenes.

J. Mauricio Flores M, J. A. Rayas, Daniel D. Aguayo, R. Rodríguez-Vera, Amalia Martínez

1er encuentro participación de la mujer en la ciencia.

León, Gto., Mayo 2004.

5. Microscopic shape and deformation measurement by a projected Talbot image

R. Rodríguez-Vera, J. M. Flores Moreno, Daniel D. Aguayo, J. A. Rayas, Amalia Martínez

12th International Conference on Experimental Mechanics

Politecnico di Bari, Italy, August - September 2004

6. Tecnologías Ópticas Para El Contorneo De Piezas

Amalia Martínez, J. A. Rayas, J. Mauricio Flores M., Daniel D. Aguayo, R. Rodríguez-Vera.

IV Simposio La óptica en la industria

Ensenada, B. C., Septiembre 2004.

Apéndice C

Microscopía estereoscópica

C.1. Introducción

La necesidad de determinar las dimensiones de una estructura, objeto, o porción de material ha impulsado el desarrollo de instrumentos ópticos para amplificar y definir una pequeña área de un objeto. Lo anterior es consecuencia de que el ojo a simple vista no puede analizar dimensiones microscópicas, ya que la profundidad de observación del ojo humano es muy limitada. Esta razón, ha llevado al hombre a la construcción de sistemas ópticos simples y complejos para auxiliarse en el estudio de diversas ramas de la ciencia y de la vida diaria. Resulta casi imposible hoy en día pensar que un análisis sanguíneo no pueda realizarse y determinar bacterias, virus, etc., de un tamaño microscópico. Así pues es nuestro interés llevar a cabo el estudio de piezas mecánicas, ópticas, a nivel microscópico.

C.2. El microscopio óptico

El microscopio tiene como función principal formar un imagen real del objeto usando un ocular y un objetivo, como componentes principales. La figura C.1. muestra un esquema de un microscopio compuesto [Malacara (1989) y (1992)], y de la figura C.2 se deducen las relaciones matemáticas referentes a la amplificación, y el tamaño de las motas.

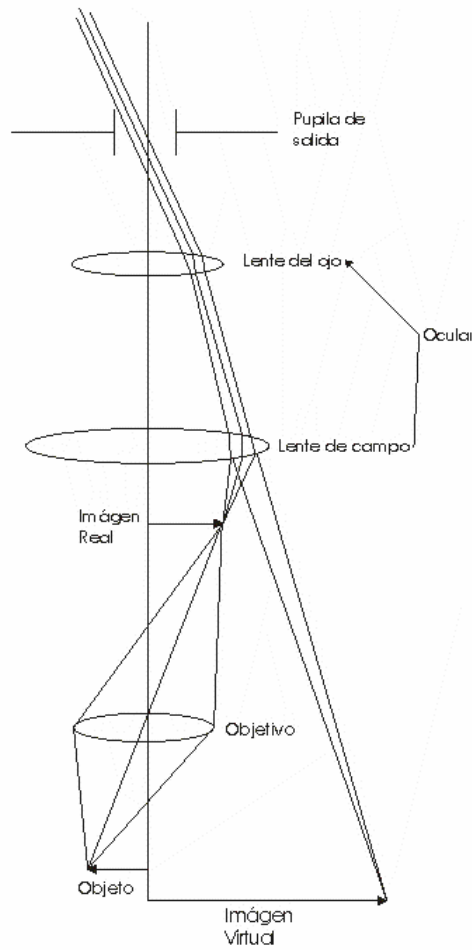


Figura C.1. Diagrama esquemático de un microscopio compuesto

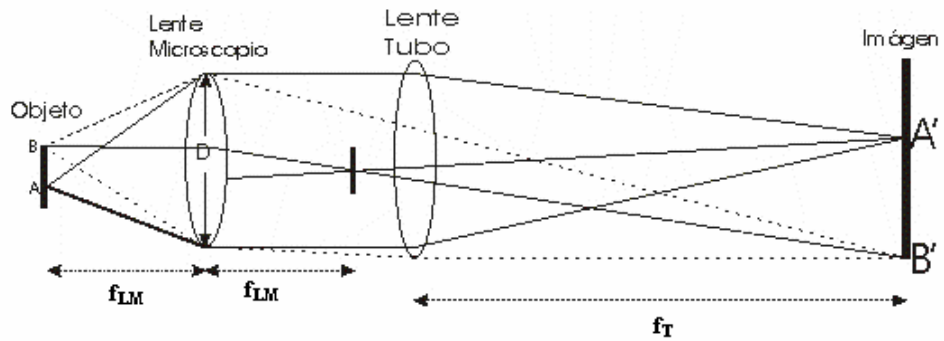


Figura C.2. Arreglo de lentes de un microscopio

La amplificación este microscopio (Figura C.2), puede ser deducida a partir de la relación existente entre las distancias focales de las lente de microscopio y tubo, representadas por f_{LM} y f_T , respectivamente, de lo que se obtiene:

$$M = \frac{A'B'}{AB} \quad (C.1)$$

$$M = \frac{f_T}{f_{LM}} \quad (C.2)$$

En el capítulo uno se describió el fenómeno de moteado, y el diámetro de las motas está dado por la resolución del sistema, la cual se expresa [Lokberg, et al (1997)]

$$d_s = 1.22\lambda F_{eff} \quad (C.3a)$$

$$d_s = 1.22\lambda \frac{D}{f_T} \quad (C.3b)$$

donde λ es la longitud de onda del láser, F_{eff} es la razón focal o f-numero, y usando la condición del seno de Abbe, tenemos [El Jarad, et al]

$$d_s = 1.22\lambda \frac{1}{2NA} \quad (C.4)$$

donde NA es la apertura numérica del objetivo. Cabe aclarar que la resolución en el espacio objeto está limitada por el diámetro de la mota.

C.3. El microscopio estereo

El microscopio estereo tiene la característica de tener un par de oculares. A principios de 1890 Horatio Greenough, diseña el prototipo de lo que son hoy en día los microscopios estereo, para la compañía Carl Zeiss de Jena. Este diseño presentaba un sistema de lentes positivas, y la compañía Zeiss, le implemento prismas inversores para producir una imagen derecha, el microscopio que se uso en este trabajo de tesis, es fabricado por dicha compañía.

A diferencia de un microscopio convencional, el microscopio estereo presenta un gran número de objetivos de diferente apertura numérica para producir un alto contraste y minimiza las aberraciones ópticas. Además tiene la característica de incluir un zoom óptico, que evita el cambio continuo de objetivos, y de aprovechar la función del ojo y cerebro humano (visión estereoscópica), para formar imágenes tridimensionales.

Hoy en día vienen acompañados de una cámara CCD, lo que permite digitalizar la información. Dichos microscopios se clasifican como tipo Greenough y de Objetivo Principal Común (CMO). El microscopio empleado en nuestro arreglo propuesto es del tipo Greenough. La figura C.3, muestra un diagrama esquemático del microscopio Stemi 2000-C de Zeiss, y la tabla C.1 contiene la descripción de los componentes.

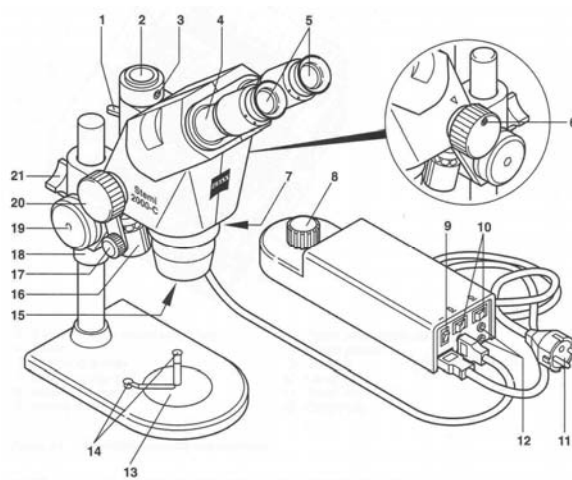


Figura C.3. Microscopio estereo Stemi 2000-C de la compañía Zeiss.

No.	Designación
1	Switch para cambio de haz
2	Salida de cámara CCD
3	Tornillo de ajuste de CCD
4	Tubo binocular
5	Ocular
6	Tronillo Hexagonal
7	Tornillo de sujeción a la montura
8	Control de Ajuste(Brillo)
9	Switch de Encendido/Apagado
10	Switch de lampara
11	Cable de alimentación
12	Conector de lampara(2 Polaridades)
13	Platina para objeto
14	Pinza de sujeción en laPlatina
15	Vidrio protector (de polvo)
16	Lámpara
17	Adaptador de lámpara
18	Anillo de Seguridad
19	Enfoque del microscopio
20	Ajuste de zoom
21	Tornillo de seguro

Tabla C.1. Componentes del microscopio Stemi 2000-C de Zeiss

El microscopio Stemi 2000C tiene dimensiones de 65x336x371 mm, con un peso de 4.8 kg., incluyendo cables de alimentación, fuente de alimentación y lámpara. La figura C.4 presenta un diagrama del sistema óptico del microscopio estereo, que aquí se describe.

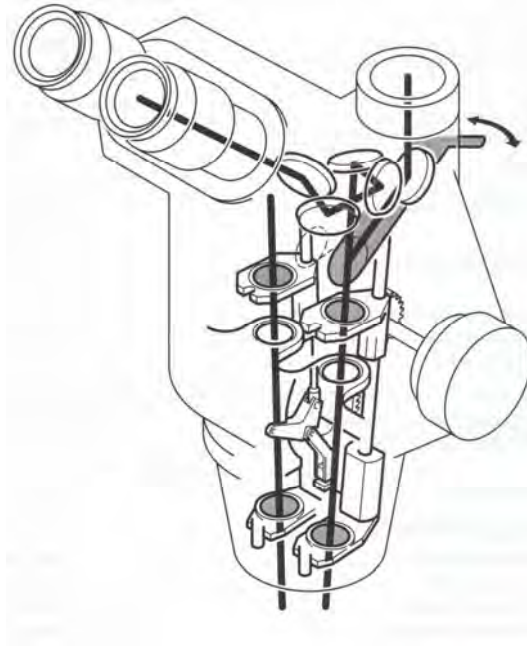


Figura C.4. Sistema óptico microscopio Stemi 2000-C

El sistema óptico del microscopio tiene un ángulo stereo de 11° , con un ángulo de visión de 35° , permitiendo acercamientos en un rango de 0.65X-5X. Las características de amplificación y campo del objeto que son cubiertos por el microscopio se describen en la Tabla C.2. Es importante mencionar la apertura numérica del ocular que presenta el sistema la cual se calcula por su relación con el F# [Hecht (1998), Malacara (1989)], dada por

$$NA = \frac{1}{2 \cdot F\#} \quad (C.5)$$

Donde el F# es calculado con un diámetro de la lente de 2.6 mm y un foco de 23 mm, para que el F# tenga un valor de 8.84, y sustituyendo este valor en la ecuación (C.5), se tiene un valor para la apertura numérica de 0.056.

VSS		OCULAR							
		W 10X/ 21 foc		W 10X/ 23 spect. foc		W 16X/ 16 foc		W 16X/ 10 spect. foc	
		Amplificación total	Campo objeto(mm)	Amplificación total	Campo objeto(mm)	Amplificación total	Campo objeto(mm)	Amplificación total	Campo objeto(mm)
0.3X	285	1.95X-15X	107.7-14	1.95X- 15X	118-15.3	3.1X-24X	82.1-10.7	4.9X-37.5X	51.3-6.7
0.4X	210	2.8X-20X	80.8-10.5	2.6X-20X	88.5-11.5	4.2X-32X	61.5-8	6.5X- 50X	38.5-5
0.63X	130	4.1X-31.5X	51.3-6.7	4.1X-31.5X	56.2-7.3	6.6X-50.4X	39.1-5.1	10.2X- 78.8X	24.4-3.2
1X	¹¹²⁻ ₉₂	6.5X-50X	32.3-4.2	6.5X-50X	35.4-4.6	10.4X-80X	24.6-3.2	16.3X-125X	15.4-2
2X	31	13X- 100X	16.2-2.1	13X-100X	17.7-2.3	20.8X- 60X	12.3-1.6	32.5X-250X	7.7-1

Tabla C.2. Características de los oculares y campos de objeto del Stemi 2000C

[Carl Zeiss(1998)].

C.4. Conclusiones

La amplificación es un criterio muy importante al usar o escoger un microscopio, pero se debe considerar con la misma importancia el campo de observación del objeto espécimen. El microscopio estereo presenta muchas ventajas en la detección de profundidad y contraste en la determinación e interpretación de la estructura de un objeto en estudio. En la manipulación de microestructuras, la implementación de técnicas interferométricas requiere el mismo nivel de resolución que nivel macroscópico. Al ser sistemas adaptables, el desempeño puede ser mejorado por la adición de componentes, aunque como en todos los ámbitos estos instrumentos, también son limitados principalmente por su resolución. Estas características de adaptabilidad y simpleza en el manejo, así como su interacción con el ambiente de las computadoras

hace que sean aplicados no solamente en óptica, sino en medicina y la industria. El uso de este microscopio no termina en los resultados que se presentan posteriormente en el capítulo 5 de este trabajo de tesis. El alcance de estos microscopios implica desde el estudio de semiconductores, caracterización de MEMS(Micro Electro Mechanicals Systems), etc.

C.5. Referencias

El Jarad, A., Gulker, G. & Hinsch, K. D., Microscopic ESPI: Better fringe quality by the Fourier transform method.

Hecht, E., Óptica, Addison Wesley Americana, España, 1998.

Lokberg, O. J., Seeberg, B.E. & Vestli, K., Microscopic video speckle interferometry, Opt. Las. Eng., Vol. 26, pp. 313-330, 1997.

Malacara, D., Óptica básica , Fondo de cultura económica, México, 1989.

Malacara, D., Optical Shop Testing, John Wiley & sons, Inc., U.S.A., 1992.

Operating Manual Stemi 1000/2000/2000C, Stereo Microscopes, Carl Zeiss Mikroskopie, 1998, www.zeiss.de.